

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

დავით ჯაფარიძე

რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური

შერჩევა ელექტროსისტემაში

ინჟინერიის (0719) დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი

დისერტაცია

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

სრული პროფესორი

ომარ ზივზივაძე

ქუთაისი, 2022 (წელი)

სარჩევი

შესავალი	5
თავი 1. რეაქტიულ სიმძლავრესთან დაკავშირებული საკითხები და ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა	
1.1. ენერგეტიკული პროცესი ცვლადი დენის წრედში, რეაქტიული სიმძლავრე	14
1.2. რეაქტიული სიმძლავრის წყაროები და მომხმარებლები	18
1.3. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი ელექტროსისტემაში	30
1.3.1. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის გავლენა ელექტროენერჯის ხარისხზე	30
1.3.2. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადგადადინების გავლენა ძაბვის დანაკარგებზე	33
1.3.3. აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა უბალანსობის ურთიერთგავლენა	37
1.4. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა	40
1.4.1. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის კრიტერიუმები	42
1.4.2. ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შერჩეული სტრატეგია	44
დასკვნა I თავის მიმართ	48
თავი 2. ელექტროსისტემის მართვის საშუალებები და ელექტრული ქსელის ენერგეტიკული მახასიათებლები	
2.1. ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები	51
2.2. ელექტრულ ქსელში რეჟიმის პარამეტრთა გაანგარიშება	54
2.2.1. სიმძლავრის დანაკარგების გამოვთლა კვანძური დატვირთვების მიხედვით	54
2.2.2. ქსელის კვანძში ძაბვის გადახრის შეფასება კვანძური დატვირთვების მიხედვით	57

2.3. ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკური მართვის პრობლემური საკითხები -----	59
2.3.1. ძაბვის რეგულირება ელექტროსისტემაში -----	59
2.3.2. სიმძლავრის დანაკარგების მართვა -----	62
2.4. მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების გზები -----	65
დასკვნა II თავის მიმართ -----	69
თავი 3. ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის მათემატიკური მოდელი	
3.1. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის არსებული მეთოდების მიმოხილვა -----	70
3.2. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის კრიტერიუმი და მათემატიკური მოდელი -----	85
3.3. სისტემაწარმომქნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური გადანაწილება მანაწილებელ ქსელში -----	90
დასკვნა III თავის მიმართ -----	94
თავი 4. საქართველოს ელექტროსისტემა	
4.1. საქართველოს ელექტროსისტემის არსებული მდგომარეობა -----	96
4.2. საქართველოს ელექტროენერგეტიკული რესურსები და ქვეყნის ელექტრული სისტემის განვითარების პერსპექტივა -----	101
4.3. საქართველოს ელექტრული სისტემის ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები -----	105
4.4. საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევა -----	111
4.4.1. ავტონომიური რეჟიმი -----	113
4.4.2. სინქრონული პარალელური კავშირი რუსეთის ელექტროსისტემასთან -----	127
4.4.3. სინქრონული პარალელური კავშირი აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან -----	129
დასკვნა IV თავის მიმართ -----	133

ძირითადი შედეგები და ზოგადი დასკვნები -----	135
გამოყენებული ლიტერატურა -----	138
დანართები -----	142
დანართი 1 -----	142
დანართი 2 -----	147
დანართი 3.1 -----	148
დანართი 3.2 -----	159

შესავალი

რეაქტიული სიმძლავრისა და მასთან დაკავშირებული თემების შესწავლა ელექტრული სისტემების მიმართულებით ერთ-ერთი ძირითადი საკვლევი საკითხია. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულად მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს და კომპენსაციის შედეგად გამოწვეულ მთელ რიგ თანმდევ ეფექტს: ძაბვის რეგულირება; ელექტროენერგიის ხარისხის ამაღლება; ენერგოსისტემის მუშაობის საიმედოობის გაზრდა და სხვა. მთლიანი ქსელის აუცილებელი გათვალისწინების თვალსაზრისით ამ პრობლემას ელექტროენერგეტიკაში ანალოგია თითქმის არ მოეპოვება.

აღნიშნული პრობლემატური საკითხის შესახებ მნიშვნელოვანი კვლევის შედეგები და ცნობები ძირითადად ჩნდება XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან. თუმცა დღემდე, მოცემული საკითხის ირგვლივ ფართო სამეცნიერო საზოგადოებაში ჯერ კიდევ არ არის ერთგვაროვანი შეხედულება და დამოკიდებულება. რის გამოც, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციასთან დაკავშირებით არსებობს სხვადასხვა მიდგომები და მოსაზრებები.

ნ.ა. მელნიკოვი [2; 5] გახლდათ ერთ-ერთი პირველთაგანი, რომელმაც ხაზი გაუსვა მკვებავ და მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული სიმძლავრის განაწილების ურთიერთ ასიმეტრიულობას. კერძოდ, მან აღნიშნა, რომ ზემოაღნიშნული ძაბვის ქსელი არის რეაქტიული სიმძლავრის არარაციონალური წყარო, შესაბამისად აქ არსებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მანაწილებელ ქსელში გადინება ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით არამიზანშეწონილია და იგი მაშუნტებელი რეაქტორების საშუალებით ადგილზე უნდა გაკომპენსირდეს. შესაბამისად, მან ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსებისა და ძაბვის რეგულირების საკითხი პირობითად გაჰყო ურთიერთდაკავშირებულ ორ ქვე-ამოცანად.

ნ.ა. მელნიკოვი და ლ.ა. სალდატკინა [2; 5] რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას განიხილავენ, როგორც სისტემურ პრობლემას. ისინი აღნიშნავენ, რომ ზემადალი ძაბვის სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საკითხი უმთავრესად დაკავშირებულია ძაბვის რეგულირების ამოცანასთან. მათ შემოგვთავაზეს ზემადალი ძაბვის ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომელიც ეფუძნება ქსელის საკუთარ და ურთიერთ რეაქტიულ წინაღობებსა და ძაბვის მოთხოვნილ სიდიდეს კვანძში. უნდა აღინიშნოს, რომ მოცემულ სადისერტაციო ნაშრომში სისტემაწარმომქნელი ქსელისათვის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი სწორედ ამ პრინციპით იქნა მიღებული.

ვ.ა. ვენიკოვისა და ვ.ი. იდელჩიკის [1; 4] მოსაზრებით ელექტრული ქსელის საკონტროლო კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები უნდა შეირჩეს მოცემულ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან გამომდინარე. აღნიშნული კი უნდა დასაბუთდეს შესაბამისი ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის საფუძველზე.

ვ.ი. იდელჩიკმა [4; 31] ელექტროსისტემაში ძაბვის რეგულირებისა და რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საკითხი განიხილა, როგორც ელექტრული სისტემის რეჟიმების ოპტიმიზაციის ამოცანა. მოცემული კომპლექსური ოპტიმიზაციის ამოცანის მიზნის ფუნქცია არის ელექტროსისტემაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაცია და ის გადაწყვეტილია გრადიენტის მეთოდით.

ამ ამოცანის საწყის პარამეტრს წარმოადგენს ელექტროსადგურთა აქტიური სიმძლავრის მნიშვნელობები (მაბალანსებელი კვანძის გარდა), ხოლო შეზღუდვის უტოლობებია: ა) ძაბვათა დასაშვები მნიშვნელობები კვანძებში; ბ) კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის წყაროთა დასაშვები დიაპაზონი; გ) ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის შესაძლო ინტერვალი [4; 31].

ტ.ჯ.ე. მილერი [32] აღნიშნავს, რომ მანაწილებელ და ზემადალი ძაბვის ქსელებისათვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზანი და მისი პრაქტიკული განხორციელება აბსოლუტურად სხვადასხვა საკითხებია. მან დატვირთვის სხვადასხვა რეჟიმებში გამოიკვლია ზემადალი ძაბვის შორეული ელექტროგადამცემი ხაზების გასწვრივ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი. რის საფუძველზეც, დაადგინა ზემადალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზის გასწვრივ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისას რეჟიმის პარამეტრთა (დენი, ძაბვა) განაწილება.

რ.ლ. ჰაუთი [32] შეეხო ერთობ მნიშვნელოვან და საინტერესო საკითხს, კერძოდ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის გავლენა ელექტრული სისტემის მდგრადობაზე. მან აჩვენა, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის შესაბამისი კომპენსაცია დადებითად მოქმედებს ელექტრული სისტემის სტატიკურ და დინამიკურ მდგრადობაზე.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მეთოდებს შორის ყველაზე უფრო ზუსტ მეთოდს წარმოადგენს სისტემური მიდგომის მეთოდი, რაც გულისხმობს ელექტროსისტემის ყველა ძაბვის საფეხურის ქსელის ყველა ელემენტისა და ყველა სამომხმარებლო კვანძის გათვალისწინებას. ეს მეთოდი, ფაქტიურად, უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს, მაგრამ ერთის მხრივ ხასიათდება დიდი განზომილებით (ელექტროსისტემის ელემენტებისა და სამომხმარებლო კვანძების დიდი რიცხვი) და მეორე მხრივ, საწყისი ინფორმაცია, შედარებით, დაბალი ხარისხისაა [17; 18].

შეიძლება ითქვას, რომ აღნიშნულ სფეროში მრავალწლიანი გამოკვლევები მიმართული იყო დასმული ამოცანის განზომილების შემცირებისა და ცალკეული ქვესისტემების საინფორმაციო დაშორიშორების გადალახვაზე. სხვაგვარად, რომ ვთქვათ სისტემური მიდგომის პრინციპის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემაა ქსელის არსებული ინფორმაციის დიდი მოცულობა, ამიტომ აქტუალური ხდება ექვივალენტირების სხვადასხვა საშუალების მოძებნა.

ამ კუთხით დიდი წვლილი მიუძღვის ი.ს. ჟელესკოს [19; 20], მას შემოთავაზებული აქვს გაერთიანებულ ენერგოსისტემათა ექვივალენტირების

სხვადასხვა ხერხები. აგრეთვე ი.ს. ჟელესკო აქტიურად ეხება რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანის ეკონომიკურ ასპექტებს და ეკონომიკური კრიტერიუმების გათვალისწინებით მიღებული აქვს რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევის სხვადასხვა მათემატიკური მოდელები. უნდა აღინიშნოს, რომ ი.ს. ჟელესკომ შეისწავლა საკითხი - ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევა ელექტროენერჯის დანაკარგების გათვალისწინებით [33].

გ. მახარაძემ [3] ელექტრული ქსელის კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა განიხილა ორი მიდგომით:

1. მოცემულია (ცნობილია) ელექტროსადგურების რეაქტიული დატვირთვები და საჭიროა მოხმარების კვანძებში განისაზღვროს რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრე;
2. მოხმარების კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრის განსაზღვრასთან ერთად განისაზღვროს ელექტროსადგურების ოპტიმალური რეაქტიული დატვირთვები.

ორივე ამ შემთხვევაში ამოცანის კრიტერიუმს წარმოადგენს მეურნეობის დაყვანილი ხარჯები, რომელიც შეიცავს მოხმარების კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების ხარჯებს მასთან დაკავშირებულ საექსპლუატაციო ხარჯებთან ერთად და ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებით გამოწვეულ ხარჯებს (ელექტროსადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის გამომუშავებასთან დაკავშირებით დამატებითი ხარჯები საჭირო არ არის) [3].

გ. მახარაძემ მ. კიკალიშვილთან ერთად შეისწავლა $6 \div 35$ კვ საშუალო ძაბვის მაგისტრალურ და რადიალურ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის საკითხი [23]. მათ მოცემული ამოცანის გადასაჭრელად გამოიყენეს ქსელის ექვივალენტობის პარციალური მეთოდი [22].

გ. მახარაძემ ფ. ახალაძესთან ერთად შეისწავლა ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისას მკვებავ და მანაწილებელ ქსელთა ინტერესების ურთიერთგათვალისწინების საკითხი [24]. საბოლოოდ მიიღეს, რომ

ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მიზანშეწონილია განხორციელდეს თანადაფინანსების პრინციპით [25].

დღესდღეობით, მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა ისწრაფვის ინდივიდუალური კომპენსაციისაკენ, ანუ საკითხი საგრძნობლად ლოკალიზდა ცალკეულ, ინდივიდუალურ ელექტრომომხმარებელამდე [10; 26; 27].

ვ.ჰოფმანი, ი.შლაბახი და ვ.ჯუსტი [26] ძირითადად განიხილავენ რეაქტიული სიმძლავრის ინდივიდუალური კომპენსაციის საკითხებს. ისინი აქტიურად ემხრობიან სხვადასხვა ტიპის ერთფაზა და სამფაზა ელექტრომომხმარებელთა დატვირთვის კოეფიციენტის კორექციისათვის კონდესატორთა ბატარეის გამოყენებას. მათ გაანალიზებული აქვთ ინდივიდუალური კომპენსაციის თანმდევი მთელი რიგი პრობლემატური საკითხები, როგორცაა: კონდესატორთა ნარჩენი ელექტრული ველის განმუხტვა, შესაძლო რეზონანსის პირობები, კონდესატორთა დაცვა მ.შ დენებისა და გადაძაბვებისაგან, მაღალი სიხშირის ჰარმონიკებით მდიდარი არაწრფივ დატვირთვათა ინდივიდუალური კომპენსაციის თავისებურებები და სხვ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების კუთხით ახალი თაობის მაკომპენსირებელი დანადგარების (FACTS Devices) გამოყენება ყველაზე პროგრესული ნაბიჯია [9; 10; 11; 32].

მ. ერემია, ჩ. ლიუ, ა. ედრის და სხვა თანაავტორები [10] განიხილავენ სხვადასხვა ტიპის თანამედროვე FACTS მოწყობილობებს, აქ წარმოდგენილია მათი მოქმედების პრინციპი და გამოყენების არეალი. FACTS (Flexible AC Transmission System) მოწყობილობები წარმოადგენენ რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებად მულტიფუნქციურ დანადგარებს [10]. მათ იყენებენ არამხოლოდ რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების კუთხით, არამედ სხვა ტექნიკური მიზნებისთვისაც, როგორცაა: ელექტროგადამცემ ხაზთა გამტარუნარიანობის ზრდა, ელექტრული სისტემის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის ამაღლება და სხვ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროენერგეტიკის მომავალი ჭკვიან და ნეირონულ ქსელებშია [10; 38], რომელთაც ტრადიციულ ელექტრულ ქსელთან შედარებით არ აქვს მკვეთრად გამოკვეთილი ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურა. ის უფრო მეტად მოქნილი, რევერსული, საიმედო და ეკონომიკურია. ამ კუთხით, მომავალში ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების ამოცანაში აქტიურ მონაწილეობას მიიღებს არამხოლოდ ელექტროსადგურები და გადამცემი ქსელის ოპერატორები, არამედ საკუთრივ ელექტრომომხმარებლები.

მოცემული სადისერტაციო ნაშრომი სწორედ ამ პრობლემატურ ამოცანას ეხება. უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროთა შერჩევის ჩვენს მიერ შერჩეული სტრატეგია ძირითადად ეფუძნება ნ.ა. მელნიკოვის, ლ.ა. სალდატკინასა და ი.ს. ჟელესკოს [2; 5; 19] ხედვებსა და მიდგომებს.

გამომდინარე ზემოთქმულიდან, მოცემულ ნაშრომში ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი განიხილება შემდეგი სტრატეგიის მიხედვით [21; 35; 37]:

- სისტემური მიდგომის პრინციპი გამოყენებული იქნება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მიმართ, ამ ქსელის კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის კრიტერიუმად განიხილება ძაბვის ხარისხი აღნიშნული ქსელის კვანძებში;
- თუ მივიღეთ, რომ ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით, ამ ქსელის რომელიმე კვანძში საჭიროა გარკვეული სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, მაშინ ეს სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მოცემულ კვანძში მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისა და ოთხი თავისაგან.

სადისერტაციო ნაშრომის პირველი თავი ეთმობა ზოგად თეორიულ საკითხებს რეაქტიული სიმძლავრის შესახებ. აგრეთვე პირველ თავში დასმულ და ჩამოყალიბებულ იქნა ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა.

პირველ პარაგრაფში აღნიშნულია რეაქტიული სიმძლავრის ბუნება და მისი ენერგეტიკული ხასიათი. მეორე პარაგრაფში განხილულია რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებლები და წყაროები, მაკომპენსირებელ დანადგართა სახესხვაობები, მათი მუშაობის პრინციპები და თავისებურებანი.

მესამე პარაგრაფში მოცემულია ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის გავლენა ელექტროენერჯის ხარისხსა და აქტიური სიმძლავრის ბალანსზე.

მეოთხე პარაგრაფში განიხილება ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი, ჩამოყალიბებულია დისერტაციის ძირითადი მიზანი და ამოცანა. შესწავლილია ელექტროსისტემაში პრობლემის გადაწყვეტის არსებული კრიტერიუმები, დასმულია მრავალკრიტერიანობის პრობლემა და აღნიშნულია მისი გადაჭრის გზები/მეთოდები. შემოთავაზებულია ჩვენს მიერ შერჩეული ძირითადი კრიტერიუმები და პრობლემის გადაჭრის სტრატეგია.

მეორე თავის პირველ პარაგრაფში შეისწავლება ელექტრული ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები და კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ წინაღობათა მატრიცის თვისებები და მისი შედგენის ხერხები.

მეორე პარაგრაფის პირველ ქვეპარაგრაფში განიხილება კვანძში სიმძლავრის დანაკარგების გამოსათვლელი გამოსახულება, რომლის საშუალებითაც დანაკარგები იანგარიშება არა შტოებში გამავალი სიმძლავრეების, არამედ კვანძური დატვირთვებისა და საკუთარ და ურთიერთ წინაღობების საშუალებით. აქვე განიხილება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის საკითხი.

მეორე ქვეპარაგრაფში მიღებულია რთული შეკრული ქსელის საკონტროლო კვანძში ძაბვის მუშა მნიშვნელობის გამოსათვლელი გამოსახულება, რომელიც ეფუძნება კვანძურ რეზულტატიურ დატვირთვა/გენერაციებსა და კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ წინააღმდეგობებს.

მესამე პარაგრაფი ეთმობა ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკური მართვის არსებულ მიდგომებსა და საშუალებებს, რომლებიც ძირითადად მიზნად ისახავს ელექტრულ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაციასა და ძაბვის რეგულირების ოპტიმიზაციას, რისი მეშვეობითაც შესაძლებელია გავაუმჯობესოთ ქსელის ეკონომიკური და ტექნიკური მაჩვენებლები.

მეოთხე პარაგრაფში განიხილება მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საშუალებები.

მესამე თავში წარმოდგენილია ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროთა შერჩევის ჩვენს მიერ მიღებული მათემატიკური მოდელები.

პირველ პარაგრაფში განიხილება რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევის არსებული მიდგომები და საშუალებები.

მეორე პარაგრაფში მიღებულია ზემოაღნიშნული ძაბვის ($U_{\delta} \geq 220$ კვ) სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომლის საილუსტრაციოდ განხილულია რიცხვითი მაგალითი, ის მოცემულია დანართ 1-ში.

მესამე პარაგრაფში მიღებულია მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომლის საილუსტრაციოდ განხილულია რიცხვითი მაგალითი, ის მოცემულია დანართ 1-ში.

ნაშრომის ბოლო მეოთხე თავი კი სრულიად ეთმობა საქართველოს ელექტროსისტემას, ძირითადად აქცენტი გადატანილია ზემოაღნიშნული ძაბვის სისტემაწარმომქნელ ქსელზე.

პირველ და მეორე პარაგრაფებში აღწერილია საქართველოს ელექტროსისტემის არსებული მდგომარეობა და მომავალი გამოწვევები.

მესამე პარაგრაფში გაანგარიშებულ და მიღებულ იქნა საქართველოს ელექტროსისტემის პერსპექტიული სისტემაწარმოქმნელი ქსელის საკუთარ და ურთიერთ აქტიური და რეაქტიული წინაღობები.

მეოთხე პარაგრაფში საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმოქმნელ ქსელში, პერსპექტიული პროექტების გათვალისწინებითა და მიღებული მათემატიკური მოდელის საშუალებით, ჩატარდა გამოთვლები და საკონტროლო კვანძებში შერჩეულ იქნა რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები. აღნიშნული გამოთვლები ჩატარდა საქართველოს ელექტროსისტემის სამი შესაძლო სცენარით ოპერირებისას (ავტონომიური რეჟიმი, პარალელური სინქრონული რეჟიმი აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან, პარალელური სინქრონული რეჟიმი რუსეთის ელექტროსისტემასთან) დატვირთვის ორი ზღვრული რეჟიმების (მაქსიმალური, მინიმალური) გათვალისწინებით.

დასასრულ, მსურს ღრმა მადლიერება გამოვხატო საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორ გურამ მახარაძის მიმართ კვლევისას გაწეული თანამშრომლობისა და ნაყოფიერი განხილვებისათვის.

თავი 1. რეაქტიულ სიმძლავრესთან დაკავშირებული საკითხები და ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა

1.1. ენერგეტიკული პროცესი ცვლადი დენის წრედში, რეაქტიული სიმძლავრე

რეაქტიული სიმძლავრე წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად პარამეტრს, რომელიც აღწერს და ახასიათებს ელექტრული სისტემის რეჟიმებს. ამიტომ გამართლებულად მიგვაჩნია, რომ მოვახდინოთ ფოკუსირება ამ ცნების ირგვლივ და დეტალურად განვიხილოთ მისი ფიზიკური შინაარსი.

პირველ რიგში შევნიშნოთ, რომ ტერმინი „რეაქტიული სიმძლავრე“ შემოტანილ და დამკვიდრებულ იქნა ცვლადი სინუსოიდალური დენისა და ძაბვის ელექტრული წრედების თეორიაში. ამიტომ, მკაცრად შეიძლება ითქვას, რომ მხოლოდ ამ პირობებშია გამართლებული ამ ცნების გამოყენება. ყველა სხვა შემთხვევაში სადაც კი მას შევხვდებით ელექტრული სისტემის რეჟიმების ანალიზისას ის ამახინჯებს რეჟიმის ენერგეტიკულ მახასიათებელს. ამ პირობებში სისტემის ან მისი რომელიმე ელემენტის რეჟიმი მკაცრად განისაზღვრება ცვლადი მყისა სიმძლავრით [1; 2].

მყისა სიმძლავრე ტოლია მუშაობის შესრულების სისწრაფისა დროის მოცემულ მომენტში, ან სხვაგვარად მუშაობის წარმოებულის დროით [1].

$$P = \frac{dA}{dt} = u \cdot i \quad (1.1)$$

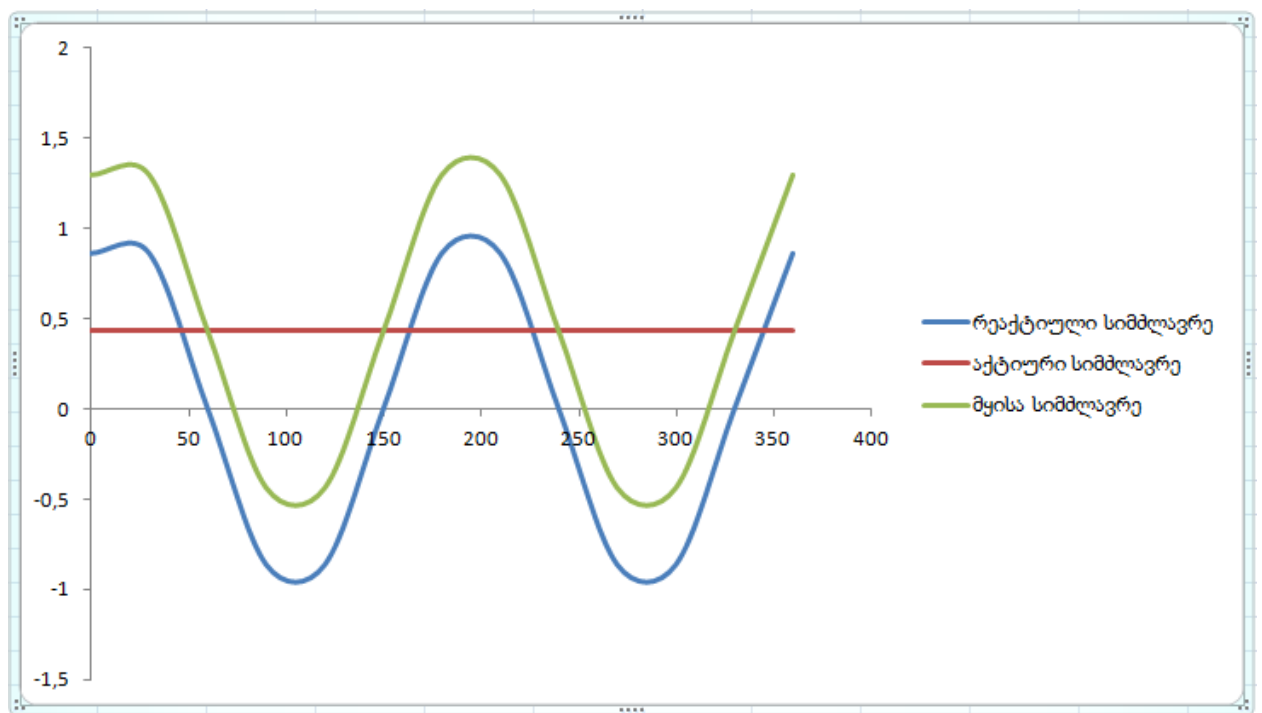
სადაც: A – მუშაობა, ჯ; $u = U_m \sin \omega t$ – ცვლადი სინუსოიდალური ძაბვის მყისა მნიშვნელობა, ვ; $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ – ცვლადი სინუსოიდალური დენის მყისა მნიშვნელობა დროის მოცემულ t მომენტში, ა; φ – კუთხე ძაბვისა და დენის ვექტორებს შორის.

მაშასადამე:

$$\begin{aligned}
 P &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{1}{2} U_m I_m [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = \\
 &= \frac{1}{2} U \cdot \sqrt{2} \cdot I \sqrt{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \\
 &= p_a + p_r \qquad (1.2)
 \end{aligned}$$

(1.2) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ მყისა სიმძლავრე შეიცავს ორ შესაკრებს, რომელთაგან ერთ-ერთი $p_a = UI \cos \varphi$ მუდმივი სიდიდეა და აქტიურ სიმძლავრეს უწოდებენ, ხოლო მეორე შესაკრები $p_r = UI \cos(2\omega t - \varphi)$ ცვლადი ჰარმონიული სიდიდეა, რომელიც 2ω კუთხური სიხშირით ირხევა დროში და მას რეაქტიულ სიმძლავრეს უწოდებენ [1].

ნახ 1.1-ზე ნაჩვენებია მყისა, აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა დროზე დამოკიდებულების გრაფიკები $y = f(t)$ [1].



ნახ.1.1. მყისა, აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა დროზე დამოკიდებულების გრაფიკები

ნახ.1.1-დან ჩანს, რომ პერიოდის განმავლობაში მყისა სიმძლავრე იღებს, როგორც დადებით ისევე უარყოფით მნიშვნელობებს. აშკარაა, რომ სიმძლავრის დადებითი მნიშვნელობები შეესაბამება სიმძლავრის გადაცემას კვების წყაროდან

მომხმარებლისაკენ, ხოლო უარყოფითი მნიშვნელობები კი მცირე რაოდენობის სიმძლავრის დინებას მომხმარებლიდან კვების წყაროსაკენ.

განვსაზღვროთ ენერჯის რაოდენობა, რომელსაც გენერირებს წყარო პერიოდის განმავლობაში [1; 2]:

$$W = \int_0^T [p_a(t) + p_r(t)]dt = \int_0^T UI \cos\varphi dt - \int_0^T UI \cos(2\omega t - \varphi) dt$$

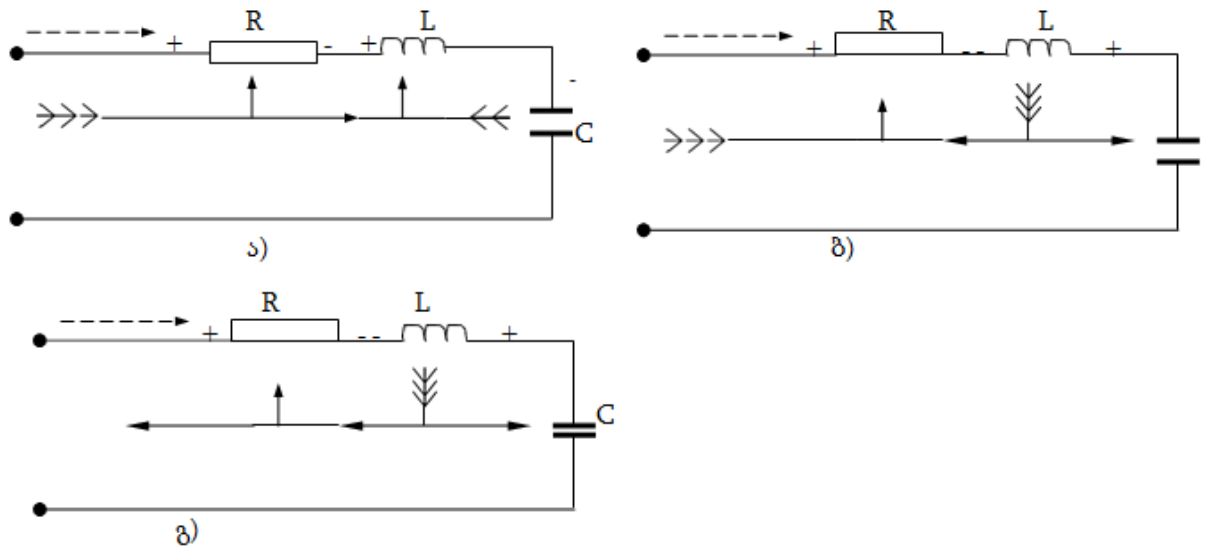
$$= T \cdot p_a \quad (1.3)$$

მოცემული შედეგი პირდაპირ მიგვანიშნებს, რომ წყაროს მიერ მიწოდებული და დატვირთვის მიერ მოხმარებული ენერჯია ცვლადი დენის პერიოდის განმავლობაში დაკავშირებულია მყისა სიმძლავრის მხოლოდ ერთ მდგენელთან – p_a აქტიურ სიმძლავრესთან. ამ სიმძლავრის გენერაცია შესაძლებელია მხოლოდ ელექტროსადგურზე სინქრონული გენერატორის მეშვეობით, მისი მოხმარება კი წარმოადგენს სასარგებლო სამუშაოს შესრულების პროცესს.

მყისა სიმძლავრის მეორე შემდგენი (p_r – რეაქტიული სიმძლავრე) ცვლადი დენის წრედში განსაზღვრავს ენერჯის პერიოდულ მიმოცვლას კვების წყაროსა და დატვირთვის შორის. აღნიშნული რხევითი პროცესი ცვლადი დენის $f = 50$ ჰც სიხშირესთან მიმართებით ორჯერ მეტი სიხშირით მიმდინარეობს. პერიოდის განმავლობაში რეაქტიული სიმძლავრის მიერ შესრულებული მუშაობა ნულის ტოლია.

რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია-მოხმარება პირობითია, კერძოდ როცა ქსელში ჭარბობს ინდუქციური ელემენტები $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, მაშინ $p_L > p_C$. ამ დროს, ცვლადი დენის ნახევარი პერიოდის რაღაც მონაკვეთზე ინდუქციურ ელემენტში ენერჯია შედის როგორც ტევადური ელემენტიდან ასევე კვების წყაროდან (ნახ.1.2, ა) [3]. ამ შემთხვევაში წყარო და ქსელის ტევადური ელემენტი მოგვევლინება, როგორც რეაქტიული სიმძლავრის მიმწოდებელი ხოლო ინდუქციური ელემენტი კი მომხმარებელი, ამ დროს წყაროდან სიმძლავრე მიეწოდება წრედის R აქტიურ ელემენტსაც. მაგრამ ცვლადი დენის იმავე ნახევარ პერიოდის დანარჩენ

მონაკვეთზე სიმძლავრე წრედის ინდუქციური ელემენტიდან გამოდის და შედის როგორც ტევადურ ელემენტში, ასევე კვების წყაროში (ნახ.1.2, ბ) [3].



ნახ.1.2. რეაქტიული სიმძლავრის მიმოცვლა ელექტრული წრედის ელემენტებს შორის

დენის ნულოვან მნიშვნელობაზე გადასვლამდე დენი წრედში ჯერ კიდევ საკმაოდ დიდია და აქტიური წინააღობის მიერ მოხმარებული ენერგია დიდია, რის გამოც წრედს ენერგიის რაოდენობა მიეწოდება წყაროდანაც (ნახ.1.2,გ). ანალოგიური სურათია, როდესაც წრედში ჭარბობს ტევადური ელემენტი $\omega L < \frac{1}{\omega C}$. ამრიგად მივიღეთ, რომ როცა ქსელში $\omega L \neq \frac{1}{\omega C}$ მაშინ ქსელის ელემენტები (ინდუქტივობა, ტევადობა, კვების წყარო) ცვლადი დენის ნახევარ პერიოდის გარკვეულ მომენტში არიან რეაქტიული სიმძლავრის წყაროები ან მომხმარებლები და იმავე ნახევარპერიოდის დარჩენილ ნაწილში პირიქით [3]. რაც შეეხება R აქტიურ წინააღობას, ის სიმძლავრის მიმოცვლით პროცესში მონაწილეობას არ იღებს და მონაწილეობს აქტიური სიმძლავრის მოხმარების შეუქცევად პროცესში. იმ შემთხვევაში კი, როცა $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ რეაქტიული სიმძლავრის მიმოცვლის პროცესში გენერატორი (კვების წყარო) არ მონაწილეობს და ეს მიმოცვლა ხორციელდება ქსელის ტევადურ და ინდუქციურ ელემენტებს შორის ყოველი ნახევარპერიოდის ინტერვალში. ამასთან პირველ მეოთხედში ტევადური ელემენტი ენერგიის წყარო და ინდუქტივობა მომხმარებელი, ხოლო მეორე მეოთხედის განმავლობაში

პირიქით. ქსელის ელემენტებს შორის ამ ხასიათის რეაქტიული სიმძლავრის მიმოცვლას თან სდევს აქტიური სიმძლავრის დიდი დანაკარგი, რაც არაეკონომიურია და ამ დანაკარგების შემცირების მიზნით, ხშირ შემთხვევაში მიზანშეწონილია ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმა [3].

1.2. რეაქტიული სიმძლავრის წყაროები და მომხმარებლები

ელექტროსისტემებში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად მომხმარებლებს წარმოადგენენ სინქრონული და ასინქრონული ძრავები, ვენტილური გარდამსახები, ინდუქციური ელექტროლუმენები, ტრანსფორმატორები და საჰაერო ხაზები მათ ინდუქციურ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების სახით და სხვა. ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგი ჯამური რეაქტიული დატვირთვის თითქმის 50%-ს აღწევს, ამასთან დანაკარგების 70-75% მოდის ტრანსფორმატორებში დანაკარგებზე. სამრეწველო საწარმოებში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითადი მომხმარებლებია ასინქრონული ძრავები, რომლებზედაც მოდის საწარმოს მიერ მოთხოვნილი ჯამური რეაქტიული სიმძლავრის 65-70% [4; 5].

რეაქტიული სიმძლავრის წყაროა ელექტროსადგურთა სინქრონული გენერატორები, მაღალი და ზემაღალი ($U_{\text{ფ}} \geq 220$ კვ) ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზები, რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროები.

ელექტრულ ქსელებში მაკომპენსირებელ დანადგარებს წარმოადგენენ: სინქრონული კომპენსატორები, კონდენსატორთა ბატარეა, მაშუნტებელი რეაქტორები და რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები - ე.წ. FACTS მოწყობილობები. კომპენსაციის მიხედვით განარჩევენ ძირითადად ორ ხერხს: გრძივი და განივი კომპენსაცია. გრძივი კომპენსაციის დანიშნულებას წარმოადგენს ხაზის ელექტრული პარამეტრის (რეაქტიული წინაღობის) კომპენსირება, ხოლო განივი კომპენსაციისა რეაქტიული დატვირთვის კომპენსირება.

სინქრონული კომპენსატორები წარმოადგენს შემსუბუქებული კონსტრუქციის მქონე სინქრონულ ძრავს, რომელსაც ცხადპოლუსა როტორი აქვს, მასზე განთავსებულია აგზნების გრაგნილი. სტატორი მიერთებულია ცვლად სამფაზა ქსელში. კომპენსატორი მუშაობს უქმი სვლის რეჟიმში, ამ რეჟიმში ის ქსელიდან მოიხამრს აქტიური სიმძლავრის მცირე რაოდენობას, რომელიც მისი ნომინალური სიმძლავრის $2 \div 4\%$ –ს შეადგენს და განიხილება როგორც დანაკარგები კომპენსატორის სტატორსა და როტორში [4].

კომპენსატორის დადებითი მხარეა ძაბვის დადებითი რეგულირების ეფექტი [4], ხოლო მის უარყოფით მხარეს შეადგენს: ა) უფრო მიზანშეწონილია დაყენებული იქნას მხოლოდ 6 ან 10 კვ ძაბვის ქსელში; ბ) ექსპლუატაციისა და მონტაჟის შედარებითი სირთულე; გ) აქტიური სიმძლავრის შედარებით დიდი დანაკარგები.

კონდენსატორთა ბატარეა ძირითადად გამოიყენება: ა) ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის გენერირებისთვის (განივი კომპენსაცია) და ბ) ხაზის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციისთვის (გრძივი კომპენსაცია).

სინქრონული კომპენსატორისაგან განსხვავებით კონდენსატორთა ბატარეის ნაკლი შემდეგში მდგომარეობს [4]:

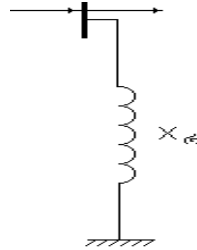
- კონდენსატორთა ბატარეას შეუძლია მხოლოდ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში მუშაობა.
- ძაბვის რეგულირების უარყოფითი ეფექტი.
- სამსახურის შედარებით მოკლე ვადა (8-10 წელი).

სინქრონულ კომპენსატორთან შედარებით კონდენსატორთა ბატარეის უპირატესობა შემდეგში მდგომარეობს [4]:

- შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს როგორც დაბალ (0,38 კვ), ასევე შედარებით უფრო მაღალ (6, 10 კვ) ძაბვაზე, და ასევე 35-110 კვ ძაბვებზეც კი;
- აქტიური სიმძლავრის შედარებით მცირე დანაკარგები;
- ექსპლუატაციისა და მონტაჟის სიმარტივე.

მიუხედავად გარკვეული უარყოფითი მხარეებისა, კონდენსატორთა ბატარეა უფრო ფართოდ გამოიყენება მანაწილებელ ქსელებში, ვიდრე სინქრონული კომპენსატორები.

კონდენსატორთა ბატარეა შეიძლება დაყენებული იქნეს: უშუალოდ მომხმარებელთან (ინდივიდუალური კომპენსაცია); მანაწილებელ ქსელებში (ჯგუფური კომპენსაცია); ქვესადგურის დაბალი და საშუალო ძაბვის (0,38; 6; 10 კვ) შემკრებ სალტებზე (ცენტრალიზებული კომპენსაცია).



ნახ. 1.3. მაშუნტებელი რეაქტორი

მაშუნტებელი რეაქტორი გამოიყენება ძირითადად ზემადალი ძაბვის (330 კვ და მეტი) ქსელში, როგორც ხაზების მიერ გენერირებული ჭარბი ტევადური რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებელი (იხ.ნახ.1.3). მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდე მოცემული კვანძის ძაბვის კვადრატის პროპორციულია. მაშუნტებელი რეაქტორი შეიძლება იყოს რეგულირებადი და არარეგულირებადი [6].

ქვესადგურის სალტებზე ძაბვის დასაშვები გადახრის პირობებში რეგულირებადი მაშუნტებელი რეაქტორის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე $\frac{U_{წ}^2}{X_{წ}}$ შეადგენს, სადაც $X_{წ}$ რეაქტორის რეაქტიული წინაღობა.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმებში ზემადალი ძაბვის ქსელის კვანძებში ძაბვის დასაშვები მნიშვნელობის უზრუნველყოფის მიზნით, კვანძებში დაყენებულმა მაშუნტებელმა რეაქტორებმა უნდა შეძლოს ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის 60-80%-ის კომპენსაცია [4]. მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში, ქსელის კვანძებში ძაბვის სათანადო დონის უზრუნველყოფის მიზნით, მაშუნტებელი რეაქტორების ჩართვა, უმეტეს შემთხვევაში, არ არის აუცილებელი. მაშუნტებელი რეაქტორები ნეგატიურად მოქმედებს ხაზების სტატიკურ და დინამიკურ მდგრადობაზე და რელეურ დაცვაზე. გამომდინარე აქედან, გამოურთავი რეაქტორების გამოყენება დასაშვებია მხოლოდ ცალკეულ შემთხვევებში [3].

ზემადალი ძაბვის ($U_{წ} \geq 330$ კვ) შორეული ელექტროგადამცემ ხაზთა უქმი სვლისა და ცალმხრივი კვების რეჟიმებში, როდესაც რეაქტიული სიმძლავრის

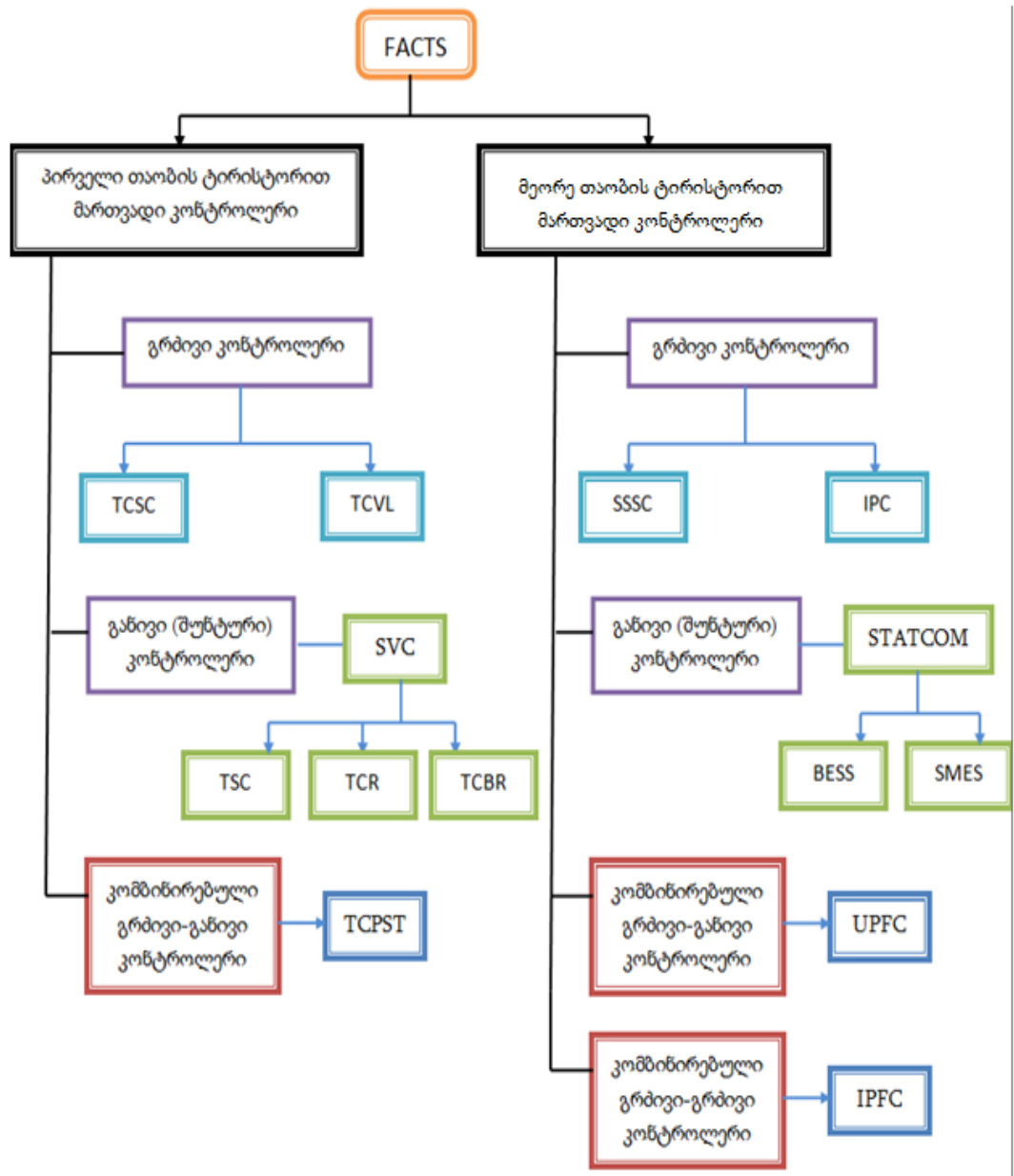
სიჭარბე მაქსიმალურია, ძაბვის სიდიდე კვანძებში და მისი განაწილება ხაზის გასწვრივ საგანგაშო ხასიათს იძენს, რამაც შესაძლოა საფრთხე შეუქმნას ელექტროდინამიკურ ელექტრული იზოლაციას და შეამციროს მათი ექსპლუატაციის ვადა, შექმნას ელექტრული გვირგვინის წარმოქმნისათვის ხელსაყრელი პირობები [7]. მეორეხრივ, შიდასასისტემო და სისტემათაშორის ხაზებზე დიდ ნიშნულს აღწევს რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგადადინებები, რაც იწვევს აქტიური სიმძლავრისა და ენერჯის დიდ დანაკარგებს, აგრეთვე რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტს ელექტროსისტემაში. ამ უარყოფით მოვლენათა თავიდან აცილების მიზნით ზემოაღნიშნული ძაბვის ელექტრული ქსელის კვანძებში და საკუთრივ ხაზის გასწვრივ მაშუნტებელი რეაქტორების განთავსება ეფექტურ და გამართლებულ ღონისძიებად მიიჩნევა [7; 8].

რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები - FACTS მოწყობილობები ელექტრული ენერჯის მოხმარებისა და ქსელში სიმძლავრეთა ნაკადგადადინების მასობრივმა ზრდამ კიდევ უფრო გამოკვეთა რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების გამოყენების აუცილებლობა. სწორედ ამიტომ აუცილებელი გახდა თანამედროვე ტექნოლოგიებსა და ძალურ ელექტრონიკაზე დაფუძნებული FACTS (Flexible AC Transmission System) მოწყობილობათა დანერგვა.

აღნიშნულ დანადგართა გამოყენება ეფექტურად შესაძლებელია შემდეგ საკითხებში: სიმძლავრეთა ნაკადის კონტროლი, პარალელურ ხაზებს შორის ნაკადგანაწილების რეგულირება, ძაბვის რეგულირება, ელექტრული სისტემის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის ამაღლება და სხვ [9].

სიმძლავრეთა ნაკადი ძირითადად დაკავშირებულია შემდეგ სიდიდეებზე: კვანძთა ძაბვის მუშა მნიშვნელობები – U ; ელექტროგადაცემის ხაზის ელექტრული პარამეტრები: გრძივი კომპლექსური წინაღობა – Z , განივი კომპლექსური გამტარობა – Y ; კვანძთა შორის ძაბვათა ძვრის კუთხე – θ .

FACTS მოწყობილობები ზემოქმედებენ ერთ ან მეტ პარამეტრზე და შესაბამისად აქვთ ფუნქციონირების სხვადასხვა დანიშნულება, ისინი კლასიფიცირებულნი არიან ორ თაობად, იხილეთ ნახ.1.4.



ნახ. 1.4. FACTS მოწყობილობათა კლასიფიკაცია

ორივე თაობაში ისინი კომპენსაციის შინაარსიდან გამომდინარე დაყოფილნი არიან შემდეგ კატეგორიებად:

- გრძივი კომპენსაცია (Series controller), როგორცაა: TCSC (ტირისტორით მართვადი კონდესატორთა ბატარეა). ძირითადი დანიშნულებაა ეგზ-ს რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია და ხაზის გამტარუნარიანობის გაზრდა.
- განივი (შუნტური) კომპენსაცია (Shunt controller), როგორცაა: SVC (რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყარო) და STATCOM. ძირითადი

ფუნქციაა ძაბვის რეგულირება და რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია, სისტემის დინამიკური მდგრადობის ამაღლება.

- კომბინირებული გრძივი-განივი კომპენსაცია (Combined series-shunt controller), როგორცაა UPFC. ასეთ მოწყობილობებს შეუძლიათ, როგორც აქტიური ასევე რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების რეგულირება.
- კომბინირებული გრძივი-გრძივი კომპენსაცია (Combined series-series controller), როგორცაა IPFC. გამოიყენება პარალელურ ხაზებს (ჯაჭვთა) შორის სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების რეგულირებისას.

რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები (SVS-Static Var Systems) გახლავთ დისკრეტულ და მუდმივ რეჟიმში მომუშავე მართვადი რეაქტიული სიმძლავრის წყაროთა კომბინაცია, რომლებიც მუშაობენ კოორდინირებულ რეჟიმში. რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროებს შორის ყველაზე მეტად გავრცელებული დანადგარებია: SVC და STATCOM, განვიხილოთ თითოეული მათგანი [10].

SVC (Static Var Compensator) დანადგარი IEEE-სა და CIGRE ორგანიზაციების მიერ განისაზღვრება შემდეგნაირად: „რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, რომელიც მასში განთავსებული ინდუქციური და ტევადური ელემენტების ცვლილებით არეგულირებს დანადგარსა და ელექტრულ ქსელს შორის რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადგადადინებებს“. როგორც წესი SVC-ის გამოყენების უმთავრესი მიზანია ელექტრული ქსელის სუსტ წერტილებში ძაბვის რეგულირება, ის შესაძლოა განთავსებულ იქნას ქსელის საკონტროლო კვანძებში, უშუალოდ მომხმარებელთან ან ელექტროგადამცემი ხაზის გასწვრივ. არამართვად რეაქტორებსა და კონდენსატორთა ბატარეასთან შედარებით SVC-ის უპირატესობა გახლავთ მისი მუშაობის სისწრაფე და საიმედოობა [10].

SVC-ის ელექტროსისტემაში განთავსება/ჩართვა შესაძლებლობას გვაძლევს გავაუმჯობესოთ ქსელის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები. SVC დანადგარი მაღალი და ზემოდალი ძაბვის სისტემაწარმოქმნელ ქსელში [10]:

- ელექტროსისტემის სუსტ კვანძებში ასტაბილურებს ძაბვის მუშა მნიშვნელობებს;
- საჰაერო ელექტროგადამცემ ხაზებში ამცირებს სიმძლავრის დანაკარგებს;
- ზრდის ელექტროგადამცემ ხაზთა გამტარუნარიანობას და ამცირებს ახალი ხაზების მშენებლობის აუცილებლობას;
- ხელს უწყობს სიმძლავრისა და ძაბვების რხევათა შემცირებას;
- ამაღლებს ელექტროსისტემის სტატიკურ/დინამიკურ მდგრადობას;

SVC დანადგარი საშუალო და დაბალი ძაბვის მანაწილებელ ქსელში [10]:

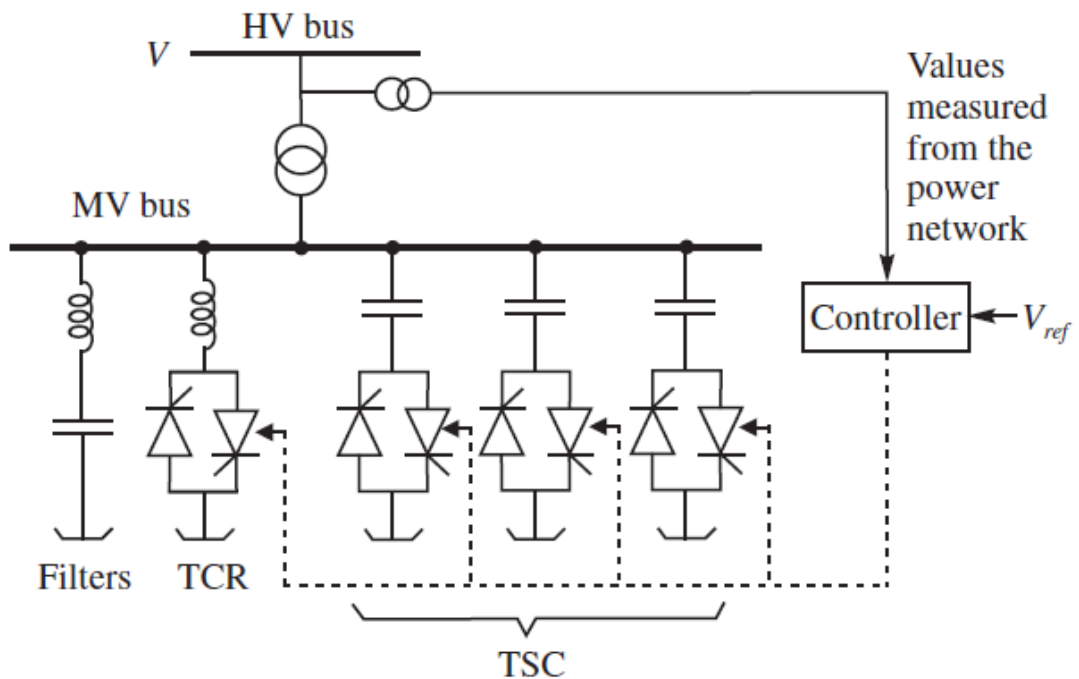
- გრძელი ელექტროგადამცემის ხაზის ბოლოს ასტაბილურებს ძაბვის მნიშვნელობას;
- ამცირებს რეაქტიული სიმძლავრის დინებას მაღალი და ზემოდალი ძაბვის ქსელიდან მანაწილებელ ქსელში, რაც ელექტროსისტემაში ამცირებს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს და დადებითად მოქმედებს ელექტროენერჯის ტარიფზე;
- აბალანსებს არასიმეტრიულ დატვირთვებს;
- ამცირებს ძაბვის რხევასა და ციმციმს ელექტრომომხმარებელთან;

ნახ.1.5-ზე წარმოდგენილია SVC-ის გამართვებული ერთფაზა ჩანაცვლების სქემა, აღნიშნულ სქემაზე შესაძლებელია გამოვყოთ შემდეგი ძირითადი კომპონენტები [10]:

- ტირისტორით მართვადი რეაქტორი (TCR-Thyristor-Controlled Reactor), რომელიც მართვადი ტირისტორების საშუალებით უწყვეტად არეგულირებს კოჭის ინდუქტივობას, $L = 0$ (ტირისტორები ჩაკეტილია) მნიშვნელობიდან $L = max$ (ტირისტორები სრულიად გახსნილია) მნიშვნელობამდე;
- ტირისტორულ-გადამრთველიანი კონდენსატორები (TSC - Thyristor-Switched Capacitors), რომლის კონდენსატორები ჩაირთვება/გამოირთვება სტატიკური მართვადი ტირისტორების მეშვეობით. TCR-ის შესაბამისი მართვის საშუალებით შესაძლებელია SVC-ის მუშაობა მაქსიმალური ინდუქციური მნიშვნელობიდან მაქსიმალურ ტევადურ მნიშვნელობამდე. ეს

კომბინაცია საშუალებას გვაძლევს SVC მოიხმაროს ან გენერიროს შესაბამისი რაოდენობის რეაქტიული სიმძლავრე;

- ფილტრები - ისინი გამოიყენებიან განსაკუთრებით დაბალი რიგის ჰარმონიკთა ჩასახშობად, რომლებსაც გენერირებს TCR. ფილტრებში არსებული კონდენსატორთა ბატარეები ჰარმონიკთა კომპენსაციასთან ერთად ელექტრულ ქსელში გენერირებს რეაქტიულ სიმძლავრესაც.



ნახ. 1.5. SVC-ის ერთფაზა ჩანაცვლების სქემა.

SVC დანადგარებში გამოყენებული ანტი-პარალელური მართვადი ტირისტორების ფუნქციაა დენის უწყვეტი გატარება ცვლადი ძაბვის ტალღის ერთი სრული ციკლის/პერიოდის განმავლობაში. ეს გულისხმობს, რომ ყოველი ნახევარ-პერიოდის დასაწყისში ტირისტორთა მართვადი იმპულსები მიწოდებულ უნდა იქნას შეთანხმებულად ისე, რომ დენი კონდენსატორებსა და/ან რეაქტორებში შენარჩუნდეს უწყვეტად. თუ კი ტირისტორს არ მიეწოდა ბრძანების იმპულსი ის დაიკეტება არა მყისიერად, არამედ ძაბვის მყისა მნიშვნელობის ნულოვან სიდიდეზე გადასვლისას, ეს დროის ის მომენტია, როდესაც ჩაირთვება მეორე ტირისტორი [10].

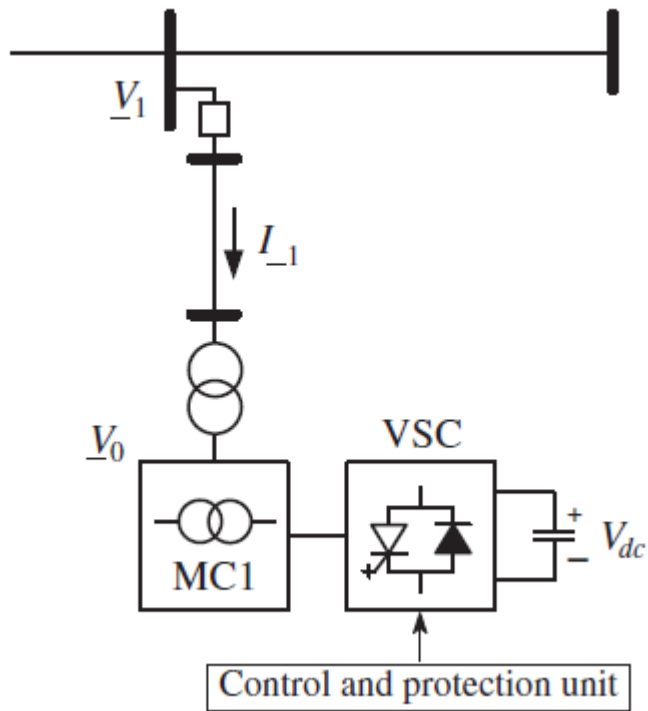
STATCOM (STATic synchronous COMpensator) მოწყობილობა ელექტრულ სისტემაში ირთვება პარალელურად, რომლის ფუნქციაა ქსელთან რეაქტიული

სიმძლავრის მიმოცვლა (მისი მოხმარება ან გენერაცია). აღნიშნული FACTS დანადგარი გახლავთ კიდევ ერთი რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყარო, რომელსაც ხშირად უწოდებენ „მოწინავე SVC“-ს. აღნიშნულ მოწყობილობას შეუძლია გენერირებული ძაბვის როგორც ამპლიტუდის ისევე ფაზური ძვრის ძალიან სწრაფი და ეფექტური კონტროლი. ძაბვის წყაროს გარდამქმნელის ფუნქციას დანდგარიდან გამომავალი ძაბვის ამპლიტუდის, ფაზისა და სიხშირის კონტროლი. შესაბამისად STATCOM ქსელის საკომპენსაციო კვანძში გენერირებს ფაქტობრივად წმინდა სინუსოიდალური ტიპის რეაქტიულ დენს, რეაქტიული დენი კი, თავის მხრივ, არეგულირებს ძაბვის მუშა მნიშვნელობას კვანძში [10].

STATCOM დანადგარი ძირითადად გამოიყენება ელექტროსისტემაში დინამიკური (სწრაფი) კომპენსაციისათვის, ის უზრუნველყოფს ძაბვის დინამიკურ (სწრაფ) კონტროლს (მაგ., ძაბვის ციმციმის/რხევის კონტროლი) და აგრეთვე შესაძლებელია გამოიყენებოდეს სტატიკური მდგრადობის ზღვრის გასაზრდელათ და რეჟიმის პარამეტრების (ძაბვის მუშა მნიშვნელობა, სიმძლავრეთა ნაკადგადადინება) რხევათა ჩასახშობად [10].

STATCOM დანადგარი შეიცავს ძაბვის წყაროს გარდამქმნელს (VSC-Voltage Source Converter), მაგნიტურ წრედს (MC-Magnetic Circuit), განივად ჩართულ მადახლებელ ტრანსფორმატორს, ამომრთველს, კონტროლისა და დაცვის მოწყობილობას (Control and protection unit), იხ. ნახ.1.6.

ძაბვის წყაროს გარდამქმნელი (VSC) ნახევარგამტარული ტირისტორული გარდამქმნელი ბლოკის მეშვეობით გენერირებს ნომინალური სიხშირის კვადრატული ფორმის ცვლადი ძაბვის ტალღებს. ეს კვადრატული ტიპის ძაბვათა ტალღები მიმდევრობით დაკავშირებულია MC – მაგნიტურ წრედთან (იხ. ნახ.1.6), რათა STATCOM-მა გენერიროს მაღალი ხარისხის სინუსოიდული ძაბვა მისაღები ჰარმონიული შემდგენებით. უნდა აღინიშნოს, რომ განივად ჩართული ძაბვის წყაროს გარდამქმნელი (VSC) ქსელში ფაქტობრივად ყოველთვის გენერირებს ნომინალური სიხშირის ჯერად ჰარმონიკებს [10].



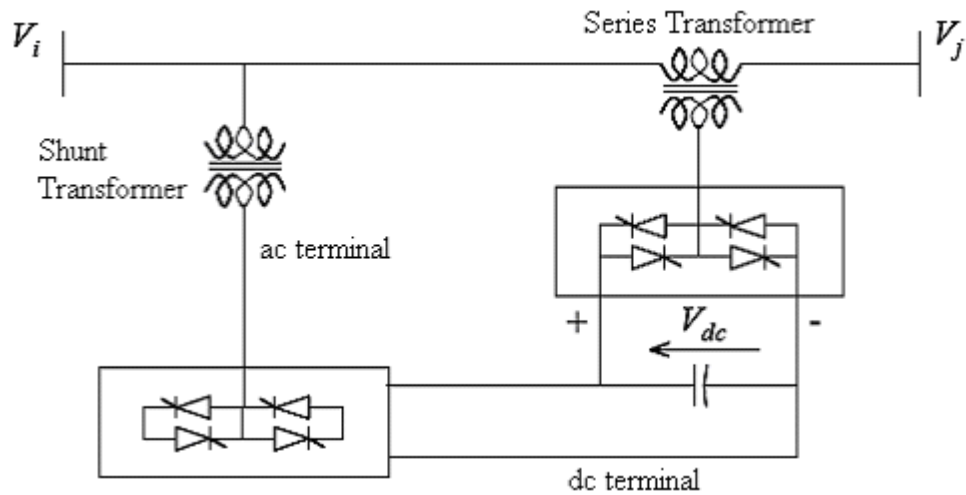
ნახ.1.6. STATCOM კონტროლერი

ქსელიდან მიღებული ენერჯის ხარჯზე მუდმივი დენის კონდესატორი იმუხტება U_{dc} ძაბვამდე და ამ დროს კონდესატორში დაგროვებული ელექტრული ველის ენერჯია ტოლია:

$$W_c = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{2}$$

დაგროვებული ენერჯის ინვერტირების გზით ვღებულობთ 50 ჰერცის ცვლად U_0 ძაბვას, რომელიც ფაზით თანხვედრილია ქსელის U_1 ძაბვასთან, U_0 - ის სიდიდის შეცვლა შესაძლებელია ტირისტორების გაღების კუთხის რეგულირებით, იხ.ნახ.1.6. U_1 და U_0 ძაბვების სხვაობის ნიშნის მიხედვით შეიძლება ქსელიდან მივიღოთ ან ქსელში გავცეთ ინდუქციური რეაქტიული სიმძლავრე. კერძოდ, როცა $U_1 - U_0 > 0$, მაშინ STATCOM ქსელიდან ღებულობს ინდუქციურ რეაქტიულ სიმძლავრეს და კონდესატორი დამუხტვის რეჟიმშია, ხოლო როცა $U_1 - U_0 < 0$ მაშინ STATCOM ქსელში გასცემს ინდუქციურ რეაქტიულ სიმძლავრეს და კონდესატორი განმუხტვის რეჟიმშია. ე.ი. 1.6 ნახაზზე წარმოდგენილი სქემის მიხედვით STATCOM მუშაობს სინქრონული კომპენსატორის რეჟიმით და მას ხშირად სტატიკურ სინქრონულ კომპენსატორსაც უწოდებენ.

UPFC (Unified Power Flow Controller) - წარმოადგენს ყველაზე მრავალმხრივ და მრავალფუნქციურ მაკომპენსირებელ დანადგარს, რომელიც გახლავთ კომბინირებული გრძივი-განივი კონტროლერი (Combined series-shunt controller), (იხ.ნახ.1.7.). ასეთ მოწყობილობებს შეუძლიათ, როგორც აქტიური ასევე რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების რეგულირება [11].



ნახ. 1.7. UPFC კონტროლერი

აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგადადინების მნიშვნელობები მაღალი და ზემაღალი ძაბვის ხაზებში გახლავთ [7]:

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \lambda} \sin \delta; \quad Q = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \lambda} \cos \delta - \frac{U_2^2}{Z_c} \operatorname{ctg} \lambda \quad (1.4)$$

სადაც: U_1, U_2 – ძაბვის მუშა მნიშვნელობა ხაზის თავსა და ბოლოში, კვ; δ – ეგზის ბოლოებში კვანძთა ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე; Z_c – ზემაღალი ძაბვის ეგზის ტალღური წინაღობა, ომი; $\lambda = \beta_0 \cdot l$ – ზემაღალი ძაბვის ეგზის ტალღური სიგრძე.

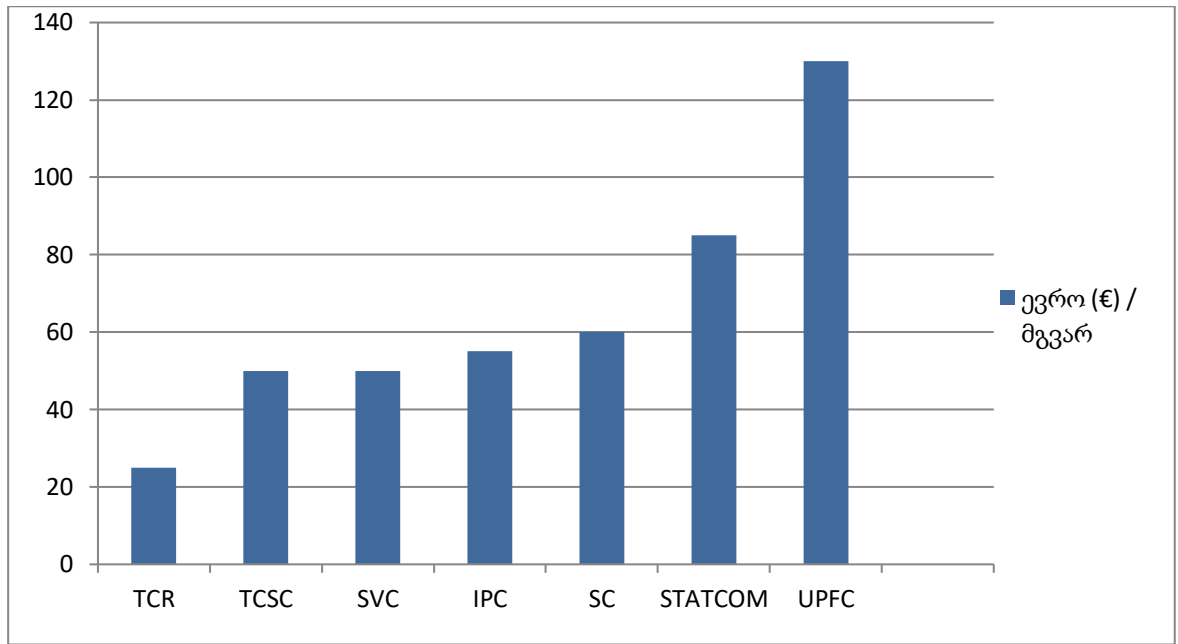
UPFC დანადგარი ქსელში ჩართულია როგორც გრძივად ასევე განივად და (1.4) გამოსახულებაში შემავალ პარამეტრთა ცვლილებით და მათზე მანიპულირებით ახორციელებს აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების რეგულირებას. მისი ერთ-ერთი უარყოფითი მხარეა ის, რომ სხვა მაკომპენსირებელ დანადგართა შედარებით ძვირია.

როგორც ვხედავთ FACTS მოწყობილობების რიცხვი საკმაოდ დიდია (იხ.ნახ.1.4.), ამიტომ საჭიროა ვიცოდეთ ამ დანადგართა როლი ელექტრულ სისტემაში და რა შემთხვევაში რომელი მათგანი გამოიყენება (იხ. ცხრ.1.1) [9].

ასევე გასათვალისწინებელია მათი ფინანსური სიდიდეც, სხვადასხვა დასახელების მაკომპენსირებელ დანადგართა ფარდობითი ღირებულება ევრო/მგვარ ნაჩვენებია ნახ.1.8-ის ორდინატთა ღერძზე, ხოლო FACTS მოწყობილობების დასახელება აბსცისათა ღერძზე [12].

„ცხრილი 1.1 “ FACTS მოწყობილობათა როლი ელექტრულ სისტემაში

პრობლემა ელექტრულ სისტემაში	პრობლემის კორექციის გზა	რეკომენდირებული FACTS მოწყობილობები
მაბვის რეგულირება:		
დაბალი ძაბვა მაქს. დატვირთვისას	რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია	STATCOM, SVC
მაღალი ძაბვა მინ. დატვირთვისას	რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარება	STATCOM, SVC, TCR
მაღალი ძაბვა ავარიული ამორთვისას	რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარება, გადატვირთვის აცილება	STATCOM, SVC, TCR
დაბალი ძაბვა ავარიული ამორთვისას	რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია, გადატვირთვის აცილება	STATCOM, SVC
თერმული ზღვარი:		
გადამცემი ქსელის გადატვირთვა	გადატვირთვის შემცირება	TCSC, SSSC, UPFC, IPC
წრედთა პარალელურად მუშაობის დარღვევა, მოშლა	წრედის გადატვირთვის შეზღუდვა	TCSC, SSSC, UPFC, IPC
სიმძლავრეთა ნაკადგადადინება:		
პარალელურ ხაზებს შორის დატვირთვის განაწილება	ხაზის გრძივი წინაღობის რეგულირება(კორექცია)	IPC, TCSC, SSSC, UPFC
სიმძლავრეთა ნაკადგადადინება ავარიის შემდგომ რეჟიმში	ქსელის გადაწყობა (მოქნილობა), თერმული მედეგობის შენარჩუნება	IPC, TCSC, SSSC, UPFC
სიმძლავრის ნაკადის მიმართულების რევერსირება (შეცვლა)	კვანძებს შორის ძაბვათა ძვრის კუთხის ცვლილება, კორექცია	IPC, SSSC, UPFC



ნახ.1.8. FACTS მოწყობილობათა ღირებულება

1.3. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი ელექტროსისტემაში

1.3.1. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის გავლენა ელექტროენერჯის ხარისხზე

ელექტრულ სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ჯამური გენერაციაა [6]:

$$Q_{\Sigma\phi} = P_{\phi} \cdot tg\phi_{\phi} + Q_c \pm Q_{ab} \pm Q_{ad}$$

სადაც: $Q_{\phi} = P_{\phi} \cdot tg\phi_{\phi}$ – ელექტროსადგურთა სინქრონული გენერატორების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ;

Q_c – მაღალი და ზემოდალი ძაბვის ($U_{\phi} \geq 220$ კვ) ეგხ-თა ტევადურ გამტარობაში გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ;

Q_{ab} – მეზობელ სისტემაში გაცემული (–) ან მეზობელ სისტემიდან მიღებული (+) რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ;

Q_{ad} – ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა სიმძლავრე. (–) თუ ის მუშობს რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების

რეჟიმში, ხოლო (+) თუ კი ის მუშაობს რეაქტიული სიმძლავრის გენერირების რეჟიმში;

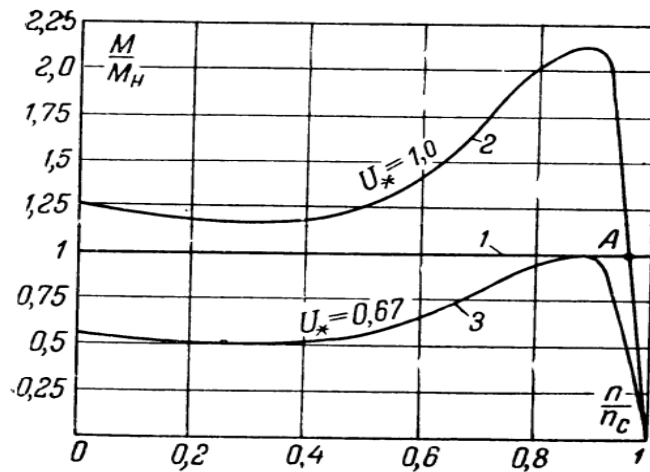
რეაქტიული სიმძლავრის ჯამური მოხმარება ელექტრულ სისტემაში [6]:

$$Q_{\Sigma\phi} = P_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\phi} + \Delta Q_b + \Delta Q_{\phi} + \Delta Q_{\phi\tau}$$

სადაც: $Q_{\phi} = P_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\phi}$ – ელექტრომოხმარებელთა რეაქტიული დატვირთვა, მგვარ; ΔQ_b – ელექტრულ ქსელში ხაზების გრძივ ინდუქციურ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები, მგვარ; $\Delta Q_{\phi\tau}$, ΔQ_{ϕ} – რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები ტრანსფორმატორებსა და ავტოტრანსფორმატორებში, მგვარ.

დროის ყოველი მომენტისათვის სისტემაში უნდა დამყარდეს წონასწორობა - $Q_{\Sigma\phi} = Q_{\Sigma\phi}$. ამასთან ტოლობა მიზანშეწონილია სრულდებოდეს, როგორც სისტემაწარმოქმნელი ქსელისათვის ($U_{\phi} \geq 220$ კვ), ასევე მანაწილებელი ქსელისათვის ($U_{\phi} \leq 110$ კვ) ცალ-ცალკე. რამეთუ, რეაქტიული სიმძლავრის სურათი ამ ქსელებში სხვადასხვაა [5]. კერძოდ, სისტემაწარმოქმნელ ქსელში გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე ხოლო მანაწილებელ ქსელში დეფიციტი. უნდა აღინიშნოს, რომ რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტისას ძაბვის მუშა მნიშვნელობები კვანძებში დაბალია მის ნომინალურ მნიშვნელობებთან შედარებით, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბისას კი პირიქით ძაბვის მუშა მნიშვნელობები კვანძებში ამაღლებულია.

განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითი [13]: ნახ1.9-ზე ნაჩვენებია ასინქრონული ძრავის სტატიკური მახასიათებელი, სადაც აბსცისათა ღერძს შეესაბამება ძრავის სრიალის მნიშვნელობები, ხოლო ორდინატას მისი მაბრუნებელი მექანიკური მომენტი. ნომინალური ძაბვისას ასინქრონული ძრავის მაბრუნე მომენტის სრიალზე დამოკიდებულების წირია–2. წრფე – 1 კი აღწერს ძრავის მაბრუნებელ და დატვირთვის მექანიკურ მომენტებს შორის წონასწორობის დამოკიდებულებას. ქსელში ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობიდან გადახრისას ასინქრონული ძრავის მაბრუნე მომენტის სრიალზე დამოკიდებულების წირია –3.



ნახ.1.9. ასინქრონული ძრავის სტატიკური მახასიათებელი

ასინქრონული ძრავის მახრუნი მექანიკური მომენტი მის მომჭერებზე მოდებული ძაბვის კვადრატულპროპორციულია, კონკრეტულად ძრავის ლილვზე მოქმედი მახრუნებელი მექანიკური მომენტი არის [14, გვ.386]:

$$M_{მექ} = \frac{3}{\Omega_0} \cdot \frac{U_{ფ}^2 \cdot R'_{რ} \cdot s}{s^2 X^2 + R'_{რ}{}^2} \quad (1.5)$$

სადაც: $M_{მექ}$ - ძრავის მექანიკური მახრუნებელი მომენტი, ნ·მ; $U_{ფ}$ - ასინქრონული ძრავის სტატორის მომჭერებზე მოდებული ფაზური ძაბვის მნიშვნელობა, ვ; $R'_{რ}$ - ძრავის როტორის წრედის აქტიური წინაღობა დაყვანილი სტატორის წრედზე, ომი; X - ძრავის სტატორისა როტორის სრული გრძივი რეაქტიული წინაღობა, ომი; s - ძრავის სრიალი; Ω_0 - ძრავის სინქრონული ანუ სტატორის ველის ბრუნვის სიჩქარე, რად/წმ.

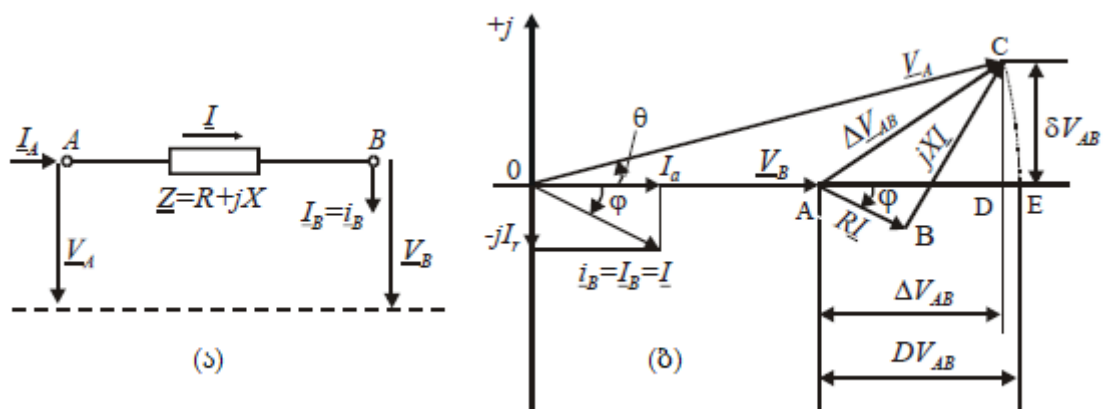
როგორც ნახ.1.9-დან ჩანს, როდესაც ქსელში ძაბვა ნომინალურია (წირი 2) ძრავის მახრუნებელი მომენტი აღემატება მის საწინააღმდეგო (დამამუხრუჭებელ) მომენტს და ძრავის ჩართვა მიმდინარეობს გამართულად. ძრავის ბრუნთა რიცხვის მნიშვნელობას შეესაბამება მისი მახასიათებელი 2 წირისა და 1 წრფეს შორის გადაკვეთის A წერტილი [13]. (1.5) გამოსახულების საფუძველზე ცხადია, რომ ქსელში ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის შემცირების დროს მცირდება ძრავის მახრუნებელი მექანიკური მომენტი, შესაბამისად [13]-ში წარმოდგენილი ნახ.1.9-ის მაგალითზე ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობის 67%-მდე შემცირებისას (წირი 3),

ჩანს, რომ გაჩერებული ძრავის ჩართვა (გაშვება) შეუძლებელია, რადგან ამ დროს ძრავას M მარბუნებელი მომენტი ვერ ძლევს მის დამამუხრუჭებელ მომენტს $-M_H$.

რაც შეეხება ქსელში ჩართულ ძრავებს, ისინი მუშაობენ არამდგრად რეჟიმში, ძრავზე დატვირთვის მცირეოდენი ზრდაც კი საკამრისია მათ დასამუხრუჭებლად და გასაჩერებლად. ძრავის გაჩერებას შეესაბამება მისი რეაქტიული წინაღობის შემცირება, ამ დროს ძრავის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარება მკვეთრად იზრდება, რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი კი უფრო მეტად ღრმავდება, ძაბვა ქსელში კიდევ უფრო დაბალ ნიშნულამდე ეცემა. რაც გამოიწვევს კიდევ სხვა მომხმარებელთა ქსელიდან ამორთვას და ა.შ. ამ დროს ადგილი აქვს საწარმო-ქარხანათა სამუშაო მწარმოებლური პროცესის გაუარესებას, რაც საბოლოოდ ქვეყნის ფინანსური, ეკონომიკური ზარალია [13].

1.3.2. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადგადადინების გავლენა ძაბვის დანაკარგებზე

განვიხილოთ უმარტივესი რადიალური მანაწილები ქსელი ნახ.1.10,ა, სადაც A არის კვების ცენტრი, ხოლო B არის სამომხმარებლო კვანძი i_B დატვირთვით. ეგბ-ს სრული, გრძივი კომპლექსური წინაღობაა $Z = R + jX$, ფაზური ძაბვის მნიშვნელობა A კვების ცენტრსა და B დატვირთვის კვანძებში შესაბამისად არის V_A და V_B [15].



ნახ.1.10. რადიალური ელექტრული ქსელი. (ა) ჩანაცვლების სქემა, (ბ) ვექტორული დიაგრამა

ნახ.1.10,ბ-ზე მოცემულია აღნიშნული ქსელის ვექტორული დიაგრამა, სადაც ბაზისურ ვექტორად არჩეულია \underline{V}_B , ცნობილია, რომ B კვანძში დატვირთვის დენი $\underline{i}_B = \underline{I}_B = \underline{I}$ ძაბვის \underline{V}_B ვექტორს ჩამორჩება $\varphi_B = \varphi$ კუთხით [15]. ქსელში დენის გავლისას ხაზის R წინაღობაში ძაბვის ფაზური აქტიური დანაკარგია $R\underline{I}$, რომელიც ფაზით თანხვდება $\underline{I}_B = \underline{I}$ ვექტორს, ხოლო ძაბვის ფაზური ინდუქციური დანაკარგია $jX\underline{I}$, რომელიც \underline{I} დენის ვექტორს წინ უსრებს 90° – ით [15].

$R\underline{I}$ და $jX\underline{I}$ ფაზური ძაბვის დანაკარგების ვექტორების ჯამი წარმოადგენს ძაბვის რეზულტატიურ ფაზურ დანაკარგს, რომელიც ვექტორულ დიაგრამაზე მოცემულია $\overline{AC} = \Delta\underline{V}_{AB}$ ვექტორით. ცხადია, რომ \overline{AC} ვექტორი არის [15]:

$$\Delta\underline{V}_{AB} = \underline{V}_A - \underline{V}_B = \underline{Z\underline{I}}$$

$\overline{AC} = \Delta\underline{V}_{AB}$ ფაზური ძაბვის რეზულტატიური დანაკარგის ვექტორის გეგმილები ნამდვილ და წარმოსახვით რიცხვთა ღერძზე არის $\overline{AD} = \Delta V_{AB}$ და $\overline{CD} = \delta V_{AB}$ ვექტორები. ΔV_{AB} –ს ძაბვის დანაკარგის გრძივ შემდგენს უწოდებენ, ხოლო δV_{AB} – ს ძაბვის დანაკარგის განივ შემდგენს.

ძაბვის ფაზური დანაკარგების გრძივი და განივი შემდგენები ნახ.1.10,ბ-ის მიხედვით არის [15]:

$$\Delta V_{AB} = R I \cos \varphi + X I \sin \varphi = R I_s + X I_r \quad (1.6)$$

$$\delta V_{AB} = X I \cos \varphi - R I \sin \varphi = X I_s - R I_r \quad (1.7)$$

სადაც: $I_s = I \cos \varphi$ – ხაზში გამავალი დენის აქტიური შემდგენი, $I_r = I \sin \varphi$ – ხაზში გამავალი დენის რეაქტიული შემდგენი.

ნახ.1.10,ბ-ზე განვიხილოთ წრიული სექტორი V_A რადიუსით, რომელიც ნამდვილ რიცხვთა ჰორიზონტალურ ღერძს კვეთს E წერტილში. AE არის V_A და V_B ძაბვების ალგებრული სხვაობა, რომელსაც ფაზურ ძაბვის ვარდნას უწოდებენ, მაშასადამე [15]:

$$DV_{AB} = V_A - V_B$$

როდესაც ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის θ კუთხე მცირეა, მაშინ ძაბვის დანაკარგის განივ შემდგენს უგულებელყოფენ და ძაბვის ვარდნა შეგვიძლია ჩავთვალოთ ძაბვის დანაკარგის გრძივ შემდგენად. მართლაც თუ დავაკვირდებით ნახ.1.10,ბ-ს შევამჩნევთ რომ [15]:

$$DV_{AB} \cong \Delta V_{AB}$$

თუ კი ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის θ კუთხე დიდი მნიშვნელობისაა, მაშინ ძაბვის ვარდნა გამოითვლება [15]:

$$DV_{AB} = V_A - V_B = \sqrt{(V_B + \Delta V_{AB})^2 + (\delta V_{AB})^2} - V_B \quad (1.8)$$

რადგან $\delta V_{AB} \ll V_B + \Delta V_{AB}$, მაშინ (1.8) გამოსახულება შეგვიძლია გავშალოთ ნიუტონის ბინომის წესით [15]:

$$DV_{AB} = \Delta V_{AB} + \frac{1}{2} \frac{(\delta V_{AB})^2}{V_B + \Delta V_{AB}} - \frac{1}{8} \frac{(\delta V_{AB})^4}{(V_B + \Delta V_{AB})^3} + \dots \quad (1.9)$$

საშუალო და დაბალი ძაბვის მანაწილებელ ქსელებისათვის საკმარისია (1.9) გამოსახულების მხოლოდ პირველი ორი წევრის გათვალისწინება, რაც გვამღევეს მიახლოებითი გამოთვლისათვის მისაღებ შედეგს. თუ კი გავითვალისწინებთ იმას, რომ $\Delta V_{AB} V_B$ -ის მხოლოდ რამდენიმე პროცენტია მაშინ მივიღებთ [15]:

$$DV_{AB} \cong \Delta V_{AB} + \frac{(\delta V_{AB})^2}{2 \cdot V_B}$$

თუ კი ნახ.1.10-ზე დატვირთვას გამოვსახავთ ერთფაზა აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეებით, მაშინ (1.6) და (1.7) გამოსახულებები მიიღებს სახეს [15]:

$$\Delta V_{AB} \cong \frac{P_0 R + Q_0 X}{V_B} \quad (1.10)$$

$$\delta V_{AB} \cong \frac{P_0 X - Q_0 R}{V_B} \quad (1.11)$$

სადაც: P_0 – ერთფაზა აქტიური დატვირთვა, კვტ; Q_0 – ერთფაზა რეაქტიული დატვირთვა, კვარ; V_B – ქსელის ნომინალური ფაზური ძაბვის მნიშვნელობა, კვ.

შევნიშნოთ, რომ ძაბვის ვარდნის ფაზურ DV_{AB} და ხაზურ DU_{AB} მნიშვნელობებს შორის დამოკიდებულება სამფაზა სისტემისათვის იქნება:

$$DU_{AB} = \sqrt{3} DV_{AB}$$

სადაც: $DU_{AB} = U_A - U_B$; U_A და U_B – ქსელის A და B კვანძების ხაზური ძაბვის მნიშვნელობებია.

მაშასადამე ძაბვის გრძივი და განივი დანაკარგების ხაზური მნიშვნელობები იქნება [15]:

$$\Delta U_{AB} = \sqrt{3} \cdot \Delta V_{AB}; \quad \delta U_{AB} = \sqrt{3} \cdot \delta V_{AB}; \quad (1.12)$$

თუ კი (1.10) და (1.11) გამოსახულებებში ერთფაზა სიმძლავრეების მაგივრად ჩავსვათ სამფაზა დატვირთვებს $S_B = 3 \cdot S_0$ და ნომინალური ფაზური ძაბვის

V_B –ის ნაცვლად ნომინალურ ხაზურ ძაბვებს $U_B = \sqrt{3} \cdot V_B$ და გავითვალისწინებთ (1.12)-ს გვეყენება:

$$\Delta U_{AB} = \sqrt{3} \cdot \left(R \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} + X \frac{Q_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \right) = \frac{P_B R + Q_B X}{U_B} \cong \frac{P_B R + Q_B X}{U_B} \quad (1.13)$$

$$\delta U_{AB} = \sqrt{3} \cdot \left(X \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} + R \frac{Q_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \right) = \frac{P_B X + Q_B R}{U_B} \cong \frac{P_B X - Q_B R}{U_B} \quad (1.14)$$

სადაც: $P_B ; Q_B$ – ელექტრულ ქსელში გადინებული სამფაზა აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეებია.

მოგეხსენებათ საშუალო და მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემ ხაზებისათვის $R \ll X$, ამიტომ (1.10) და (1.11) გამოსახულების მიხედვით ძაბვის ფაზური ვარდნის გრძივი და განივი შემდგენები ტოლია [16]:

$$\Delta V \approx \frac{X Q_0}{V_B} ; \quad \delta V \approx \frac{X P_0}{V_B} \quad (1.15)$$

მაშასადამე (1.15) გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ძაბვის გრძივი დანაკარგი ΔV ძირითადად გამოწვეულია ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის ტრანზიტით (გადაცემით), ანუ ეგხ-ს საწყის V_A და ბოლო V_B კვანძური ძაბვების სხვაობა ძირითადად განპირობებულია ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის დინებით. მეორე მხრივ ხაზში გადინებული აქტიური სიმძლავრე არსებითად მოქმედებს ძაბვათა ფაზური ძვრის კუთხეზე. იმისათვის, რომ ქსელში შევამციროთ ძაბვის დანაკარგები საჭიროა, რომ შევზღუდოთ (შევამციროთ) რეაქტიული სიმძლავრის დინება ხაზებში (კაბელებში), პრაქტიკაში ეს ყოველივე ხორციელდება რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის გზით [16].

თუ კი (1.15) გამოსახულებაში გავითვალისწინებთ, რომ რეგიონულ და ადგილობრივ მანაწილებელი ქსელისათვის V_1/V_2 ახლოსაა 1-თან, მაშინ გვეყენება [16]:

$$\frac{\Delta V}{V_B} \approx \frac{\Delta V}{V_A} \approx \frac{X Q_0}{V_A^2} \approx \frac{Q_0}{S_{02 \text{ მ.გ}}} \quad (1.16)$$

სადაც: $S_{02 \text{ მ.გ}} = V_A^2 / X$ – „B“ კვანძის მოკლედ შერთვის სიმძლავრე.

(1.16) –ის მიხედვით სისტემის $V - Q$ მახასიათებელი მოიცემა შემდეგი ფორმით [16]:

$$V_B \approx V_A \cdot \left(1 - \frac{Q_0}{S_{02 \text{ მ.გ}}} \right) \quad (1.17)$$

(1.16) და (1.17) გამოსახულებებიდან გამომდინარეობს, რომ ძაბვის სიდიდე „B“ კვანძში დამოკიდებულია Q_0 კვანძურ რეაქტიულ სიმძლავრეზე და ამ კვანძის სიმძლიერეზე ანუ მოკლედ შერთვის $S_{02 \text{ ა.ა}}$ სიმძლავრეზე [16].

ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დინების მინიმაზაცია აგრეთვე განპირობებულია აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებით, აღნიშნული დანაკარგები გამოითვლება ფორმულით [16]:

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \frac{S_B^2}{(\sqrt{3}U_B)^2} = \frac{P_B^2 + Q_B^2}{U_B^2} \cdot R$$

ელექტრული ქსელის ელემენტთა თერმული ზღვრის გამო რეაქტიული სიმძლავრის დინება იწვევს აქტიური სიმძლავრის გამტარუნარიანობის შემცირებასაც.

ზემოაღნიშნული მოსაზრებებიდან ნათლად ჩანს შემდეგი [16]:

- ელექტრული ქსელის კვანძებში ძაბვის სიდიდე არსებითად განისაზღვრება რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადგადადინებით;
- რეაქტიული სიმძლავრის დინება ქსელში ზრდის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს;
- რაც უფრო ძლიერია კვანძი ანუ დიდია კვანძის მოკლედ შერთვის სიმძლავრე, მით უფრო ნაკლებია ამ კვანძისაკენ მიმართული რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადი და შესაბამისად მით უფრო ნაკლებია ძაბვის გადახრა აღნიშნულ კვანძში.

1.3.3 . აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა უბალანსობის ურთიერთგავლენა

მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე იცვლება როგორც დროში, ასევე, რეჟიმის პარამეტრების, კერძოდ, ძაბვისა და სიხშირის ცვლილებისას. დამყარებული რეჟიმებში ძაბვისა და სიხშირის მდორედ ცვლილების გამო, ამ რეჟიმების გაანგარიშებისას, საკმარისია ვისარგებლოთ დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლებით. გარდამავალი პროცესების მიმდინარეობისას კი, რომლის დროსაც რეჟიმის პარამეტრები დიდ ფარგლებში და სწრაფად იცვლება, აუცილებელია ვისარგებლოთ დატვირთვის დინამიური მახასიათებლებით.

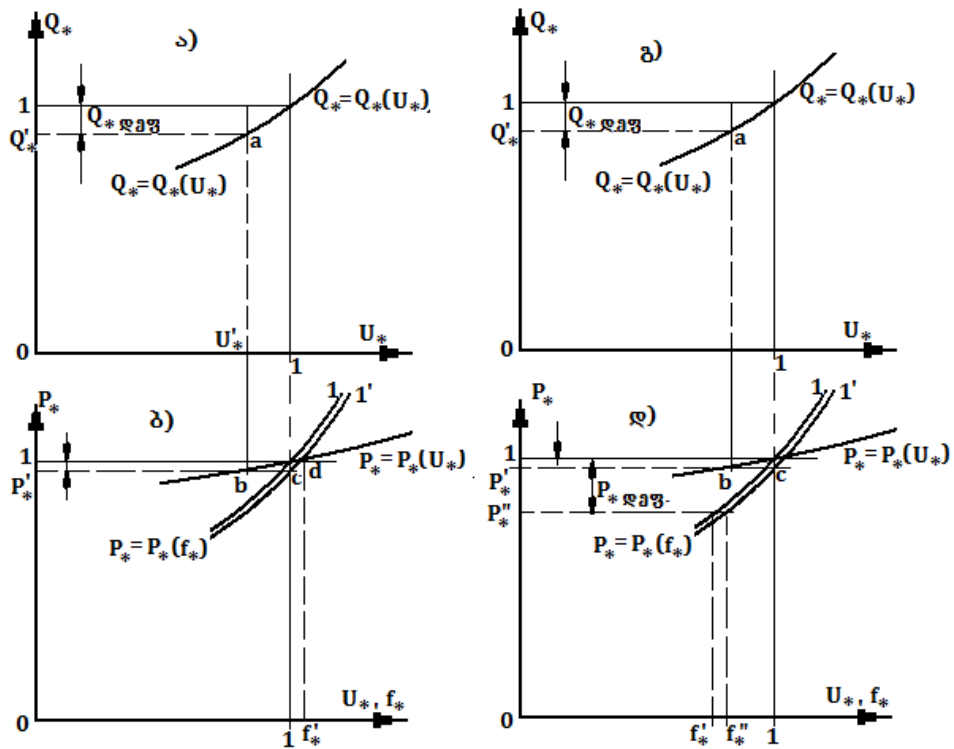
რეჟიმის პარამეტრების მცირე და მდორე ცვლილებისას დატვირთვის ცვლილება შეიძლება გამოვსახოთ გამოსახულებებით [3]:

$$\left. \begin{aligned} dP_* &= \frac{\partial P_*}{\partial u_*} \cdot du_* + \frac{\partial P_*}{\partial f_*} \cdot df_* \\ dQ_* &= \frac{\partial Q}{\partial u_*} \cdot du_* + \frac{\partial Q_*}{\partial f_*} \cdot df_* \end{aligned} \right\}$$

სიდიდეები: $\frac{\partial P_*}{\partial u_*}$; $\frac{\partial P_*}{\partial f_*}$; $\frac{\partial Q}{\partial u_*}$; $\frac{\partial Q_*}{\partial f_*}$ წარმოადგენენ აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის მარეგულირებელ ეფექტს. ამასთან, პირველი და მესამე აქტიურ და რეაქტიულ დატვირთვათა მარეგულირებელი ეფექტია ძაბვის მიხედვით, ხოლო მეორე და მეოთხე კი იგივე სიხშირის მიხედვით.

ელექტრულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევა იწვევს სიხშირის შეცვლას. შედეგად, სტატიკური მახასიათებლების მარეგულირებელი ეფექტის შესაბამისად, შეიცვლება მუშაობაში დარჩენილი მომხმარებლების როგორც აქტიური, ასევე რეაქტიული დატვირთვა. აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევას, პრაქტიკულად, ყოველთვის თან ახლავს რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დარღვევაც.

რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი, სტატიკური მახასიათებლების მარეგულირებელი ეფექტის $\frac{\partial Q_*}{\partial u_*} \neq 0$ შესაბამისად, იწვევს ძაბვის შემცირებას გარკვეული სიდიდით (U'_* მნიშვნელობამდე, წერტილი a ნახ.1.11,ა). რაც აქტიური დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლის მარეგულირებელი ეფექტის $\frac{\partial P_*}{\partial u_*} \neq 0$ შესაბამისად, გამოიწვევს მუშაობაში დარჩენილ მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილ აქტიურ სიმძლავრის შემცირებას P'_* მნიშვნელობამდე (წერტილი b ნახ.1.11,ბ). ეს კი ნიშნავს მას, რომ სიხშირის მიხედვით აქტიური დატვირთვის სტატიკური მახასიათებელი 1 მდებარეობიდან გადაადგილდა 1' მდებარეობაში (ნახ.1.11,ბ) და რადგანაც სისტემის აქტიური სიმძლავრის გენერაცია არ შემცირებულა, აქტიური სიმძლავრის ბალანსი სისტემაში დამყარდება d წერტილის შესაბამისად, ანუ სიხშირე ამაღლდება f'_* მნიშვნელობამდე (ნახ.1.11,ბ).



ნახ.1.11. სიხშირის ცვლილება სისტემაში:

ა,ბ – მხოლოდ რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დარღვევისას;
 გ,დ- აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის ერთდროული დარღვევისას.

თუ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტის წარმოქმნასთან ერთად ადგილი აქვს აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის წარმოქმნასაც, მაშინ სიხშირე სისტემაში დაეცემა f_*'' მნიშვნელობამდე (ნახ.1.11,დ).

ანალოგიურად, რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე რამდენადმე ამაღლებს ძაბვას სისტემაში და, შესაბამისად, გაიზრდება მუშაობაში დარჩენილი მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეც. მაშასადამე, ორივე შემთხვევაში აქტიური სიმძლავრის უბალანსობა, რამდენადმე კომპენსირდება იმავდროულად წარმოქმნილი რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობის შედეგად და ცხადია, რომ ეს ფაქტორი გათვალისწინებული უნდა იქნეს აქტიური სიმძლავრის უბალანსობის აღმოფხვრის ამოცანის გადაწყვეტისას.

1.4. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა

წინა პარაგრაფებში აღინიშნა, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობას თან სდევს მთელი რიგი ტექნიკურ-ეკონომიკური პრობლემები, როგორცაა: ძაბვის გადახრა საკონტროლო კვანძებში, აქტიური სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგების ზრდა, აქტიური სიმძლავრის უბალანსობა და ა.შ.

შესაბამისად აუცილებელია, რომ დროის ნებისმიერი მომენტისათვის ელექტროსისტემაში სრულდებოდეს რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი. ამასთან, რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დაცვა მიზანშეწონილია განხორციელდეს რეგიონალური ბალანსირების პრინციპით [3; 4; 5; 6].

ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების პროცესში ძირითადად მონაწილეობს ელექტროსადგურთა სინქრონული გენერატორები, მაღალი და ზემდაღალი ძაბვის ხაზები და საკონტროლო კვანძებში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები [3; 5]. ელექტრული ქსელის საკონტროლო კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევა კი წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანას.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულად მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს და კომპენსაციის შედეგად გამოწვეულ მთელ რიგ თანმდევ ეფექტს: ძაბვის რეგულირება; ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლება; ენერგოსისტემის მუშაობის საიმედოობის გაზრდა და სხვა [17]. მთლიანი ქსელის აუცილებელი გათვალისწინების თვალსაზრისით ამ პრობლემას ელექტროენერგეტიკაში ანალოგია თითქმის არ მოუპოვება. მაგ. 0,4 კვ. ძაბვის ხაზის ბოლოში მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება, აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით, მნიშვნელოვნად უფრო მეტ ეფექტს იძლევა მაღალი (35-110კვ) ძაბვის ქსელში, ვიდრე თვით 10/0,4 კვ ძაბვის ქსელში. სწორედ ამიტომაც რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემის გადაწყვეტისას ქსელის მარტივ ნაწილებად დაყოფის პრინციპის გამოყენების დროს

ამოხსნის შედეგები ყოველთვის ამა თუ იმ სიდიდის ცდომილებით ხასიათდება [17].

რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნას მიეძღვნა მრავალი მკვლევარის შრომები და მათ მიერ შემოთავაზებულია ამოცანის ამოხსნის სხვადასხვა მეთოდი. ამ მეთოდებს შორის ყველაზე უფრო ზუსტ მეთოდს წარმოადგენს სისტემური მიდგომის მეთოდი, რაც გულისხმობს ელექტროსისტემის ყველა ძაბვის საფეხურის ქსელის ყველა ელემენტისა და ყველა სამომხმარებლო კვანძის გათვალისწინებას. ეს მეთოდი, ფაქტიურად, უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს, მაგრამ ერთის მხრივ ხასიათდება დიდი განზომილებით (ელექტროსისტემის ელემენტებისა და სამომხმარებლო კვანძების დიდი რიცხვი) და მეორე მხრივ, საწყისი ინფორმაცია, შედარებით, დაბალი ხარისხისაა [18].

შეიძლება ითქვას, რომ აღნიშნულ სფეროში მრავალწლიანი გამოკვლევები მიმართული იყო დასმული ამოცანის განზომილების შემცირებისა და ცალკეული ქვესისტემების საინფორმაციო დაშორიშორების გადალახვაზე. სხვაგვარად, რომ ვთქვათ სისტემური მიდგომის პრინციპის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემაა ქსელის არსებული ინფორმაციის დიდი მოცულობა, ამიტომ აქტუალური ხდება გაერთიანებულ ენერგოსისტემათა სხვადასხვა საფეხურის ძაბვის ქსელთა ექვივალენტირების საშუალების მოძებნა [17; 18; 19; 20].

ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია პირობითად შეგვიძლია დავყოთ გლობალურ და ლოკალურ ამოცანებად. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის გლობალური ამოცანა გულისხმობს სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენებას [17; 18; 19; 20; 21]. მეორემხრივ, არის შემთხვევები, როდესაც ინფორმაციის უზუსტობისა და მრავალრიცხოვნობის გამო დღის წესრიგში დგება რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანა (სისტემური მიდგომის ამოცანა) დავიყვანოთ ცალკეული მანაწილებელი ქსელის ლოკალურ ამოცანებად [3; 22; 23; 24; 25; 26].

მოგეხსენებათ, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი უნდა სრულდებოდეს არამხოლოდ მთლიანი სისტემისათვის, არამედ ელექტრული ქსელის ცალკე კვანძებისთვისაც [1]. ამ ფაქტორიდან გამომდინარე, რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები განფენილია მთელს ელექტრულ

ქსელში. ამოცანის მასშტაბურობის თვალსაზრისით (გლობალური, ლოკალური ამოცანა) მნიშვნელოვანია ჩამოყალიბდეს ელექტრული ქსელის რომელი ძაბვის საფეხურზე განიხილება რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი.

ელექტროსისტემის ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურიდან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ რაც უფრო ვუახლოვდებით ელექტრომომხმარებელს რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მიისწრაფვის ლოკალურობისაკენ, ხოლო რაც უფრო ვშორდებით მას ამოცანა იძენს გლობალურ ხასიათს. თუმცა, როგორც უკვე ავღნიშნეთ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას ქსელში სისტემური ეფექტი გააჩნია და მის ეფექტს ვგრძნობთ მთლიან ელექტრულ ქსელში.

მოცემული სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევა სისტემაწარმომქნელ ($U_{\phi} \geq 220$ კვ) და მანაწილებელ ($U_{\phi} \leq 110$ კვ) ქსელებში, ძირითადად აქცენტი გადატანილია მაღალი და ზემოდალი ძაბვის სისტემაწარმომქნელ ქსელზე. ცხადია, რომ ჩვენი ამოცანის მიზანი გლობალური და მასშტაბურია, შესაბამისად ლოგიკურია, რომ ამოცანის გადაწყვეტისას გამოვიყენეთ სისტემური მიდგომის პრინციპი, რაც გულისხმობს ელექტროსისტემის ყველა ძაბვის საფეხურის ქსელის გათვალისწინებას [17; 18; 21].

1.4.1. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის კრიტერიუმები

სისტემური მიდგომის პრინციპს საკუთარი ღირსება და ნაკლი გააჩნია, ამ მეთოდისათვის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევა მრავალკრიტერიულობაა [18; 21].

კრიტერიუმი ეს არის მაჩვენებელი, რომლის საშუალებით შეიძლება დავადგინოთ რამდენად შეესაბამება მიღებული გადაწყვეტილება (გეგმა) წინასწარ დასახულ მიზანს, ანუ ამ მაჩვენებლით შეიძლება შევაფასოთ სხვადასხვა ალტერნატიული გეგმა რამდენად ახლოსაა ოპტიმალურთან.

ენერგოსისტემა, როგორც დიდი სისტემა, ხასიათდება მრავალკრიტერიულობით. ელექტროენერგეტიკაში მიღებული გადაწყვეტილების შეფასების მაჩვენებლად (კრიტერიუმებად) განიხილება ეკონომიკურობის, საიმედოობის, ენერჯის ხარისხისა და გარემოს დაცვის (ეკოლოგიური) კრიტერიუმები [18; 21].

ეკონომიკურობის კრიტერიუმის ძირითადი მოთხოვნაა: მოიძებნოს ქვეყნის მატერიალური და შრომითი რესურსების გამოყენების ისეთი გზა (გეგმა), რომელიც მოგვცემს მაქსიმალურ ეფექტს (შედეგს) ან წინასწარ დასახული მიზანი (შედეგი) მიღწეული იქნეს ქვეყნის მატერიალური და შრომითი რესურსების მინიმალური დანახარჯების პირობებში [21].

საიმედოობის კრიტერიუმი შეიცავს საერთო სასისტემო შემდეგ ძირითად თვისებებს [21]:

- უტყუარობა - უწყვეტად შეინარჩუნოს შრომისუნარიანობა საანგარიშო პერიოდში;
- მდგრადობისუნარიანობა - უწყვეტად შეინარჩუნოს მდგრადობა საანგარიშო პერიოდში;
- რეჟიმული მართვადობა - მართვის გზით შეინარჩუნოს მუშაობის ნორმალური რეჟიმი;
- სიცოცხლისუნარიანობა - არ დაუშვას შემფოთების კასკადური განვითარება;
- უსაფრთხოება - არ დაუშვას ადამიანებისთვის და გარემოსთვის საშიში სიტუაციები.

ელექტროენერჯის ხარისხის კრიტერიუმი - ელექტროენერჯის ხარისხი განისაზღვრება ორი ძირითადი პარამეტრით: ცვლადი დენის სიხშირე და ძაბვა. ამ პარამეტრების ნორმალური მნიშვნელობებიდან გადახრა აუარესებს ენერგოსისტემის ეკონომიკურობის მაჩვენებელსა და მუშაობის საიმედოობას. გარდა ამისა, ელექტროენერჯის ხარისხის შესაფასებლად სარგებლობენ ძაბვათა სამფაზა სისტემის არასიმეტრიულობისა და ცვლადი დენის არასინუსოიდურობის დონით [21].

გარემოს დაცვის კრიტერიუმი გულისხმობს ბუნებასა და ადამიანს შორის იმ კონფლიქტური სიტუაციების მოწესრიგებას, რაც მოსალოდნელია ადამიანის მიერ დაგეგმილი ტექნიკური ხასიათის გადაწყვეტილების განხორციელების შედეგად.

ოპტიმიზაციის ამოცანათა გადაწყვეტის პროცესში მრავალკრიტერიულობა საკმარისად მნიშვნელოვან პრობლემებს ქმნის, რომელთა დაძლევა შესაძლებელია

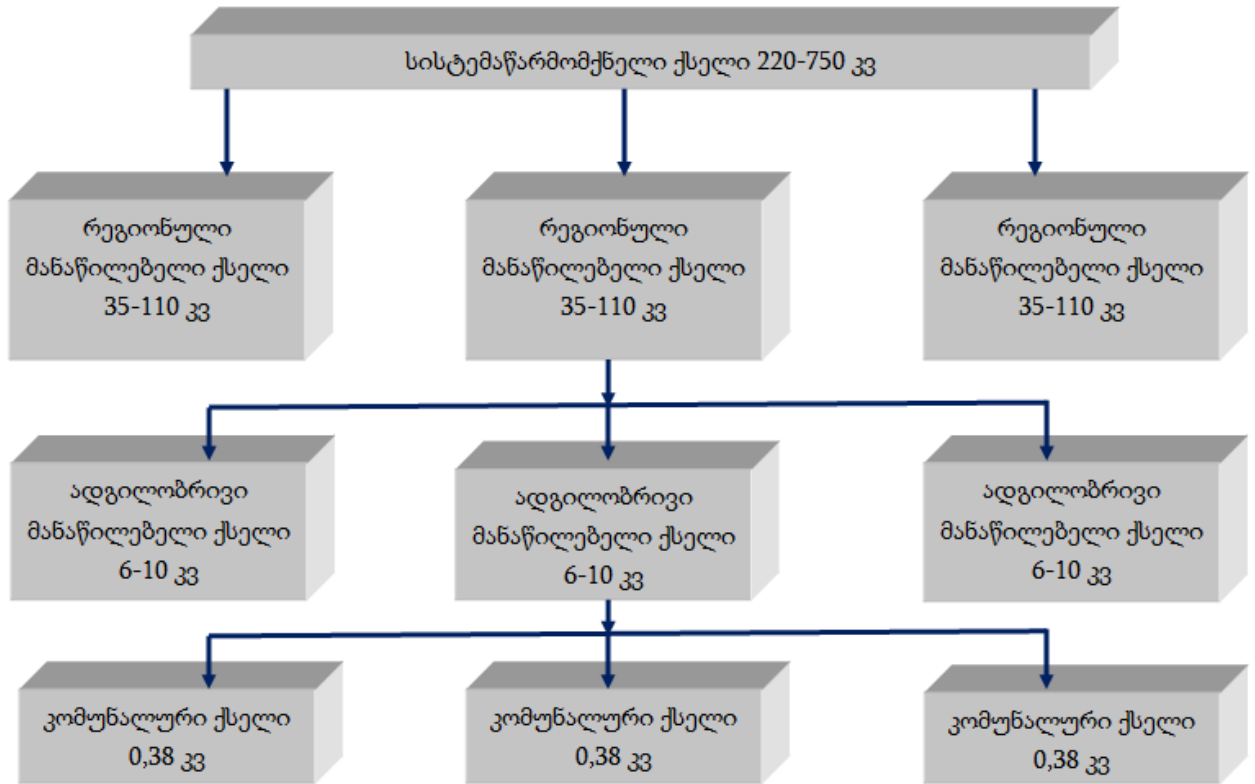
კრიტერიუმთა სკალარიზაციისა და შედარებითი უპირატესობის მეთოდების გამოყენებით [18].

კრიტერიუმთა სკალარიზაციის მეთოდი გულისხმობს მას, რომ დასმული ამოცანისთვის შედგენილი უნდა იქნეს ერთი ეკვივალენტური ფუნქციონალი, რომელიც გააერთიანებს ყველა კრიტერიუმის ფუნქციონალს შესაბამისი ხვედრითი წონით. ამ მეთოდის დიდი ნაკლია ის, რომ მეტისმეტად რთულია დადგენილი იქნას ცალკეულ კრიტერიუმთა წონითი კოეფიციენტების შედარებით ზუსტი მნიშვნელობები. აქედან გამომდინარე, ენერგეტიკულ ამოცანებში ფართოდ გამოიყენება კრიტერიუმთა უპირატესობის მეთოდი. ამ მეთოდის თანახმად განიხილება კრიტერიუმთა მწკრივი, სადაც ცალკეული კრიტერიუმის ადგილი განსაზღვრულია მისი შედარებითი უპირატესობით მომდევნოს მიმართ. მწკრივში პირველ ნომრად განიხილება იმ კრიტერიუმის ფუნქციონალი, რომლის წონა დანარჩენებთან შედარებით აშკარად გამოკვეთილად მაღალია. დანარჩენი კრიტერიუმები კი განიხილება შეზღუდვის განტოლებების ან უტოლობების სახით [21].

1.4.2. ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შერჩეული სტრატეგია

როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ, ნაშრომში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანის გადაწყვეტისას ვიყენებთ სისტემური მიდგომის პრინციპს, რომელიც გულისხმობს იმას, რომ ელექტროსისტემა წარმოდგეს ერთიან სტრუქტურად, ყველა საფეხურის ძაბვის ქსელის გათვალისწინებით [17; 18; 19; 21].

თანამედროვე ელექტრული სისტემების ელექტროგადაცემის ქსელის სტრუქტურა ზოგადად მოიცავს სხვადასხვა ნომინალური ძაბვისა და კონფიგურაციის ქსელებს. აღნიშნულ სტრუქტურაში, დანიშნულების მიხედვით, გამოყოფენ სისტემაწარმომქმნელ, რეგიონულ მანაწილებელ, ადგილობრივ მანაწილებელ და კომუნალურ ქსელებს (იხ.ნახ.1.12).



ნახ.1.12 ელექტრული ქსელის სტრუქტურა

სისტემაწარმოქმნელი ქსელი მოიცავს 220 კვ და უფრო მაღალი ძაბვის ხაზებსა და ტრანსფორმატორებს. ეს ქსელი რთულ შეკრულ ქსელს წარმოადგენს და მისი დანიშნულებაა მძლავრი ელექტროსადგურებიდან დიდი სიმძლავრის (რამდენიმე ასეული მგვტ და მეტი) ელექტროენერჯის გადაცემა მსხვილ საკვანძო ქვესადგურებამდე.

რეგიონული მანაწილებელი ქსელები შეიცავს 150, 110, 35 კვ ძაბვის ხაზებსა და ტრანსფორმატორებს. მათი დანიშნულებაა სისტემაწარმოქმნელი ქსელის საკვანძო ქვესადგურებიდან შედარებით უფრო დაბალი სიმძლავრის (100 მგვტ-მდე) ელექტროენერჯის გადაცემა 110, 35 კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელის ქვესადგურებამდე. აქედან გამომდინარე, ამ ქსელების საბალანსო კვანძს სისტემაწარმოქმნელი ქსელის შესაბამისი საკვანძო ქვესადგური წარმოადგენს. ეს ქსელები ზოგადად ღია ქსელებია, თუმცა მათი 110 კვ ძაბვის ნაწილი შეიძლება შეკრულ ქსელს წარმოადგენდეს. ცალკეულ რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებს

შორის კავშირი ურთიერთ მარეზერვირებელ კავშირს წარმოადგენს და სისტემის ნორმალურ რეჟიმებში გახსნილია [21].

ადგილობრივი მანაწილებელი ქსელები შეიცავს 10, 6 კვ ძაბვის ხაზებსა და სატრანსფორმატორო ჯიხურებს. მათი დანიშნულებაა ელექტროენერჯის განაწილება 10, 6 კვ ძაბვის სატრანსფორმატორო ჯიხურებს შორის. ეს ქსელები რადიალური, მაგისტრალური და მაგისტრალურ-განშტოებული ღია ქსელებია. ცალკეულ ადგილობრივ მანაწილებელ ქსელებს შორის კავშირი ურთიერთ მარეზერვირებელია და სისტემის ნორმალურ რეჟიმებში გახსნილია. ამ ქსელების საბალანსო კვანძს წარმოადგენს რეგიონული მანაწილებელი ქსელების შესაბამისი ქვესადგურები [21].

კომუნალური ქსელების დანიშნულებაა საზოგადოებრივი და საყოფაცხოვრებო კომუნალური მომხმარებლების ელექტრომომარაგება. ამ ქსელების კვების ცენტრებს წარმოადგენს ადგილობრივი მანაწილებელი ქსელების სატრანსფორმატორო ჯიხურები.

ადგილობრივ მანაწილებელ ქსელებში და, განსაკუთრებით, რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებში ხშირ შემთხვევაში ექსპლუატაციაშია შედარებით დაბალი სიმძლავრის (დაახლოებით 50-100 მგვტ-მდე) ელექტროსადგურები.

როგორც ელექტროსისტემის გადაცემის ქსელის სტრუქტურული სქემიდან ჩანს, ყოველი უფრო დაბალი დონის ქსელი უფრო მაღალი დონის ქსელთან დაკავშირებულია ერთი კვანძით და ეს კვანძი უფრო დაბალი დონის ქსელისთვის საბალანსო კვანძს ანუ კვების ცენტრს წარმოადგენს.

როგორც პრაქტიკა გვიჩვენებს, რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე ძირითადად შეიმჩნევა სისტემაწარმომქმნელ ქსელებში, განსაკუთრებით სისტემის მუშაობის მინიმალურ რეჟიმში, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი შეიმჩნევა მანაწილებელ ქსელებში, განსაკუთრებით, სისტემის მუშაობის მაქსიმალურ რეჟიმში [3; 5].

აქედან გამომდინარე, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის პრინციპი მდგომარეობს მასში, რომ

რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები, რომლებიც მუშაობენ ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების რეჟიმში, დაყენებული უნდა იქნეს სისტემაწარმომქმნელი ქსელის კვანძებში. ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროები, რომლებიც მუშაობენ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში დაყენებული უნდა იქნეს მანაწილებელი ქსელის კვანძებში [5; 21]. ამასთან, როგორც მრავალრიცხოვანმა მეცნიერულმა კვლევებმა აჩვენა, რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროების ტექნიკო-ეკონომიკური ეფექტი მნიშვნელოვნად მაღალია მაშინ, როდესაც აღნიშნულ წყაროს დავაყენებთ მანაწილებელი ქსელის იმ კვანძში, რომელიც მაბალანსებელი კვანძიდან ელექტრულად უფრო შორსაა, უშუალოდ ელექტრომომხმარებელთან და ხასიათდება დიდი რეაქტიული დატვირთვით [3; 4; 17; 19; 26; 27].

გამომდინარე ზემოთქმულიდან, წინამდებარე ნაშრომში ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის საკითხი განიხილება შემდეგი სტრატეგიის მიხედვით [21]:

- სისტემური მიდგომის პრინციპი გამოყენებული იქნება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მიმართ, ამ ქსელის კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის კრიტერიუმად განიხილება ძაბვის ხარისხი აღნიშნული ქსელის კვანძებში;
- თუ მივიღეთ, რომ ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით, ამ ქსელის რომელიმე კვანძში საჭიროა გარკვეული სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, მაშინ ეს სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მოცემულ კვანძში მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.

დასკვნა I თავის მიმართ

1. რეაქტიული სიმძლავრე ცვლადი დენის წრედში გარდამავალი პროცესების თანმდევი სიდიდეა. ის სრული სიმძლავრის პასიური შემდგენია, რომელიც სასარგებლო სამუშაოს შესრულების პროცესში არ მონაწილეობს და ცვლადი დენის პერიოდის განმავლობაში მუშაობას არ ასრულებს. ის განუწყვეტლივ ირხევა ელექტრული ქსელის ელემენტებს (კვების წყარო, ინდუქციური და ტევადური ელემენტი) შორის 2ω კუთხური სიხშირით, რაც იწვევს ქსელში აქტიური სიმძლავრის/ენერჯისა და ძაბვის დანაკარგებს და აუარესებს ქსელის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელს.
2. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დაცვის, ელექტრული ქსელის კვანძებში ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდის უზრუნველყოფის, ელექტრული სისტემის სტატიკური/დინამიკური მდგრადობის, რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვის უზრუნველყოფისა და სხვა მნიშვნელოვანი ტექნიკურ საკითხთა გადაჭრის მიზნით ელექტრულ ქსელში მოითხოვება რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების განთავსება. თავისმხრივ დიდია აღნიშნულ დანადგართა სახესვაობები პრაქტიკაში და ყოველ მათგანს საკუთარი ღირსება, ნაკლი და მოქმედების არეალი გააჩნია. არჩევანი კი გაკეთდება მთელი რიგ ტექნიკურ-ეკონომიკურ საკითხთა გაანალიზებისა და შეჯერების გზით.
3. ელექტრულ სისტემაში დროის ყოველი მომენტისათვის უნდა სრულდებოდეს სრული სიმძლავრის ბალანსი, როგორც აქტიური ასევე რეაქტიული სიმძლავრისათვის. ამასთან, რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დაცვა ეკონომიკურად მიზანშეწონილია მოხდეს რეგიონული ბალანსირების პრინციპით. ავლნიშნოთ, რომ რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დაცვაში დიდი დოზით მონაწილეობს ზემოაღნიშნული ძაბვის შიდასასისტემო და სისტემათაშორის ხაზები, მათი ავარიული ამორთვისას კი მოსალოდნელია დიდი შემფოთებები ელექტროსისტემაში, რასაც თითქმის ყოველთვის მივყავართ რეაქტიული და აქტიური სიმძლავრის უბალანსობასთან, ელექტროსისტემაში კასკადური სახის ამორთვებთან და უარეს შემთხვევებში მის სრულ ჩაქრობასთან.

4. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულად მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს და კომპენსაციის შედეგად გამოწვეულ მთელ რიგ თანმდევ ეფექტს: ძაბვის რეგულირება; ელექტროენერგიის ხარისხის ამაღლება; ენერგოსისტემის მუშაობის საიმედოობის გაზრდა და სხვა. მთლიანი ქსელის აუცილებელი გათვალისწინების თვალსაზრისით ამ პრობლემას ელექტროენერგეტიკაში ანალოგია თითქმის არ მოეპოვება.
5. ელექტროენერგეტიკულ სისტემას წაყენება მთელი რიგი მოთხოვნები, რომლებიც მიმართულია მისი ფუნქციონირების შესაძლო ოპტიმალური ვარიანტისაკენ. აღნიშნული მრავალკრიტერიანობა ქმნის გარკვეულ სიძნელეებს რომელთა დაძლევა შესაძლებელია კრიტერიუმთა სკალარიზაციისა და შედარებითი უპირატესობის მეთოდების გამოყენებით. ამ დროს განიხილება კრიტერიუმთა მწკრივი, სადაც კონკრეტული ამოცანის განხილვისას გამოიკვეთება ცალკეულ კრიტერიუმთა უპირატესობა, რომლის საშუალებით შეადგენენ მიზნის ფუნქციას, ხოლო დანარჩენი კრიტერიუმები კი განიხილება შეზღუდვის განტოლებების ან უტოლობების სახით.
6. აღნიშნულ ნაშრომში, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის საკითხი განიხილება შემდეგი სტრატეგიის მიხედვით:
 - სისტემური მიდგომის პრინციპი გამოყენებული იქნება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მიმართ, ამ ქსელის კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის კრიტერიუმად განიხილება ძაბვის ხარისხი აღნიშნული ქსელის კვანძებში;
 - თუ მივიღეთ, რომ ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით, ამ ქსელის რომელიმე კვანძში საჭიროა გარკვეული სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, მაშინ ეს სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის

მოცემულ კვანძში მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.

თავი 2. ელექტროსისტემის მართვის საშუალებები და ელექტრული ქსელის ენერგეტიკული მახასიათებლები

2.1. ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები

ელექტრული წრედის ნებისმიერ უბანზე გამავალი დენის სიდიდე შეიძლება დადგენილ იქნეს კირხჰოფის კანონების მიხედვით ჩაწერილ წრფივ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გზით. წრედის ნებისმიერი k კვანძის \underline{I}_k კვანძური დენის მიერ გამოწვეული ამავე წრედის ნებისმიერ i -ურ უბანში გამავალი \underline{I}_{ik} დენი \underline{I}_k დენის პროპორციულია.

$$\underline{I}_{ik} = \alpha_{ik} \cdot \underline{I}_k$$

აქ იგულისხმება, რომ ქსელის ყველა კვანძში კვანძური დენი მიმართულია კვანძისაკენ. შესაბამისად, გენერაციის კვანძის შემთხვევაში კვანძური დენის რიცხვითი მნიშვნელობა აიღება “პლუს” (“+”) ნიშნით, ხოლო დატვირთვის კვანძის შემთხვევაში “მინუს” (“-”) ნიშნით. ამ შეთანხმებიდან გამომდინარე ქსელის მახალანსებელ “0” კვანძსა და რომელიმე f კვანძს შორის ძაბვის ვარდნის დადებითი მნიშვნელობა არის [28]:

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{U}_f - U_0$$

პროპორციულობის კოეფიციენტი $\alpha_{ik} = \alpha'_{ik} + j\alpha''_{ik}$ გვიჩვენებს \underline{I}_k დენის რა ნაწილი გადის i -ურ უბანში. ის ქსელის მოცემული კონფიგურაციისა და მისი ელემენტების ცნობილი ელექტრული პარამეტრების პირობებში მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენს, მას განაწილების კოეფიციენტებს უწოდებენ.

მაშასადამე, წრედის ნებისმიერ i -ურ უბანში გამავალი დენის მნიშვნელობა ტოლია [28]:

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \cdot \underline{I}_k = \sum_{k=1}^n (\alpha'_{ik} + j\alpha''_{ik}) \cdot \underline{I}_k$$

ამავე უბანზე ძაბვის ვარდნის ფაზური მნიშვნელობა იქნება:

$$\Delta \underline{U}_i = \underline{I}_i \cdot \underline{Z}_i = \sum_{k=1}^n (\alpha'_{ik} + j\alpha''_{ik}) \cdot (R_i + jX_i) \cdot \underline{I}_k = \sum_{k=1}^n [((\alpha'_{ik}R_i - \alpha''_{ik}X_i) + j(\alpha'_{ik}X_i + \alpha''_{ik}R_i)) \cdot \underline{I}_k]$$

შევასრულებთ რა აჯამვას ნებისმიერი $0 - f$ გზით, მივიღებთ ძაბვის ვარდნას მახალანსებელი კვანძიდან f კვანძამდე:

$$\Delta \underline{U}_i = \sum_0^f \sum_{k=1}^n \left[((\alpha'_{ik} R_i - \alpha''_{ik} X_i) + j(\alpha'_{ik} X_i + \alpha''_{ik} R_i)) \cdot \underline{I}_k \right] = \sum_{k=1}^n \underline{I}_k \cdot \underline{Z}_{fk} \quad (2.1)$$

სადაც: $\underline{Z}_{fk} = R_{fk} + jX_{fk} = \sum_0^f [(\alpha'_{ik} R_i - \alpha''_{ik} X_i) + j(\alpha'_{ik} X_i + \alpha''_{ik} R_i)] \cdot \underline{I}_k$ გახლავთ f და k კვანძების ურთიერთ წინაღობა, როცა $k = f$ მაშინ გვაქვს f კვანძის საკუთარი წინაღობა \underline{Z}_{ff} . მარტივად შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ $\underline{Z}_{fk} = \underline{Z}_{kf}$, აქედან გამომდინარე ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობათა მატრიცა სიმეტრიულ მატრიცას წარმოადგენს.

კვანძის საკუთარი წინაღობა Z_{ii} (ომი) რიცხობრივად ტოლია ძაბვის იმ ცვლილებისა (ვოლტი), რომელსაც ადგილი ექნება ამ კვანძში, როცა კვანძის გენერაცია/დატვირთვის დენი ერთი ამპერით შეიცვლება. i და j კვანძების Z_{ij} (ომი) ურთიერთწინაღობა რიცხობრივად ტოლია ძაბვის იმ ცვლილებისა (ვოლტი), რომელსაც ადგილი ექნება j კვანძში, როცა i კვანძის გენერაცია/დატვირთვის დენი ერთი ამპერით შეიცვლება.

კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები ხასიათდებიან შემდეგი თვისებებით:

1. ურთიერთ წინაღობა არ აღემატება საკუთარ წინაღობას $Z_{ij} \leq Z_{ii}$. ეს ნიშნავს მას, რომ მოცემულ კვანძში გენერაცია/დატვირთვის შეცვლა უფრო დიდ გავლენას ახდენს ამ კვანძის მუშა ძაბვის სიდიდეზე, ხოლო ქსელის დანარჩენი კვანძების მუშა ძაბვაზე გავლენა Z_{ij} -ის პროპორციულია;
2. თუ $Z_{ij} \approx Z_{ii}$ და $Z_{ij} \approx Z_{jj}$, მაშინ ეს კვანძები ელექტრულად ერთმანეთთან ახლოს მდებარეობს და ამ კვანძებიდან რომელიმეში გენერაცია/დატვირთვის შეცვლა თანაზომად გავლენას მოახდენს ორივე კვანძის მუშა ძაბვაზე;
3. თუ $Z_{ij} \approx Z_{ii}$ და $Z_{ij} \ll Z_{jj}$, მაშინ ეს კვანძები მახალანსებელი კვანძიდან ერთი მაგისტრალური მიმართულებით მდებარეობს და, ამასთან, i კვანძი ელექტრულად უფრო ახლოსაა მახალანსებელ კვანძთან, ვიდრე j კვანძი. შესაბამისად, i კვანძში გენერაცია/დატვირთვის შეცვლა თანაზომად გავლენას მოახდენს ორივე კვანძის მუშა ძაბვაზე, ხოლო j კვანძში

გენერაცია/დატვირთვის შეცვლა Z_{jj} -ის პროპორციულ გავლენას მოახდენს j კვანძის მუშა ძაბვაზე;

4. თუ $Z_{ij} \ll Z_{ii}$ და $Z_{ij} \ll Z_{jj}$, მაშინ ეს კვანძები მახალანსებელი კვანძიდან სხვადასხვა მაგისტრალური მიმართულებით მდებარეობს და ამ კვანძებში გენერაცია/დატვირთვის შეცვლა მათ მუშა ძაბვებზე ურთიერთ უმნიშვნელო გავლენას იწვევს.

ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინააღმდეგობათა რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრა დაფუძნებულია ერთეულოვანი დენის მეთოდზე. კერძოდ: $\underline{Z}_{ff} = \underline{U}_f - U_0$ და $\underline{Z}_{fk} = \underline{U}_k - U_0$, როცა $\underline{I}_k = 1$ ა, $\underline{I}_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, n, k \neq f$.

გამოთვლების გამარტივების მიზნით იღებენ $U_0 = 0$ და გვაქვს: $\underline{Z}_{ff} = \underline{U}_f$ და $\underline{Z}_{fk} = \underline{U}_k$, როცა $\underline{I}_k = 1$ ა, $\underline{I}_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, n, k \neq f$.

ამ პირობებში კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინააღმდეგობათა რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრა შესაძლებელია ქვემოთ ნაჩვენებ სახეში ჩაწერლ კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გზით (განტოლებათა სისტემა შედგენილია f კვანძის მიმართ) [28].

$$\underline{U}_1 \underline{Y}_{1-1} - \underline{U}_2 \underline{Y}_{1-2} \dots - \underline{U}_f \underline{Y}_{1-f} \dots - \underline{U}_n \underline{Y}_{1-n} = 0$$

$$-\underline{U}_1 \underline{Y}_{f-1} - \underline{U}_2 \underline{Y}_{f-2} \dots + \underline{U}_f \underline{Y}_{f-f} \dots - \underline{U}_n \underline{Y}_{f-n} = 1$$

- - - - -

$$-\underline{U}_1 \underline{Y}_{n-1} - \underline{U}_2 \underline{Y}_{n-2} \dots - \underline{U}_f \underline{Y}_{n-f} \dots + \underline{U}_n \underline{Y}_{n-n} = 0$$

სადაც: $\underline{Y}_{i-i} = \sum_{j=0}^n \underline{Y}_{i-j}$, $j \neq i$ და $\underline{Y}_{i-j} = \frac{1}{Z_{i-j}}$, წარმოადგენს კვანძების საკუთარ და ურთიერთ გამტარობებს. თავის მხრივ \underline{Z}_{i-j} არის $i-j$ უბნის კომპლექსური წინააღმდეგობა, ომი.

ასეთი სახის განტოლებათა სისტემა უნდა დაიწეროს ყველა $f = 1, 2, \dots, n$ კვანძის მიმართ ცალ-ცალკე. ამოხსნის შედეგები (კვანძური ძაბვების მნიშვნელობები)

რიცხობრივად კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობათა ტოლია, კერძოდ [28]:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{f1}, \underline{U}_2 = \underline{Z}_{f2}, \underline{U}_f = \underline{Z}_{ff}, \dots, \underline{U}_n = \underline{Z}_{fn}$$

ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობათა მატრიცის მიღება შესაძლებელია, ასევე ამავე კვანძების საკუთარ და ურთიერთ გამტარობათა მატრიცის შებრუნების გზით [15].

2.2. ელექტრულ ქსელში რეჟიმის პარამეტრთა განაგარიშება

2.2.1. სიმძლავრის დანაკარგების გამოვთლა კვანძური დატვირთვების მიხედვით

ელექტრულ ქსელში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები წარმოადგენს მის ცალკეულ i ელემენტის გრძივ და განივ ელექტრულ პარამეტრებში დანაკარგების ჯამს [28]:

$$\Delta P = \sum_i \Delta P_i = \sum_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i + U_i^2 G_i \right); \quad \Delta Q = \sum_i \Delta Q_i = \sum_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} X_i + U_i^2 B_i \right)$$

ამ გამოსახულებაში: P_i, Q_i - ქსელის i ელემენტის გრძივ წინაღობაში გამავალი სიმძლავრე, მგვტ, მგვარ; R_i, G_i - ამავე ელემენტის აქტიური წინაღობა და აქტიური გამტარობა, ომი, სიმენსი; X_i, B_i - ამავე ელემენტის რეაქტიული წინაღობა და ტევადური გამტარობა, ომი, სიმენსი; U_i - ამავე ელემენტის ძაბვა, კვ (ტრანსფორმატორების შემთხვევაში იგულისხმება მაღალი მუშა ძაბვა).

ქსელის რეჟიმების ოპტიმიზაციის ამოცანათა განხილვისას საჭირო ხდება ქსელის ცალკეული კვანძისათვის დავადგინოთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი ანუ, როგორც იტყვიან, დავადგინოთ ნებისმიერი f კვანძის დატვირთვის ცვლილების გავლენა ქსელში დანაკარგების სიდიდეზე. ამ მიზნით საჭიროა დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება

განსაზღვრულ იქნეს არა შტოებში გამავალი დენების (სიმძლავრეების), არამედ კვანძების დატვირთვების საშუალებით.

სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება ჩავწეროთ ქსელში სიმძლავრის სრული ბალანსის სახით [28]:

$$\Delta \underline{S} = \sum_{f=0}^n \underline{S}_f \quad (2.2)$$

სადაც: \underline{S}_f - გენერატორის და მომხმარებლის კვანძების სიმძლავრე, რომელიც აიღება „+“ ნიშნით, როცა f წარმოადგენს გენერაციის კვანძს და „-“ ნიშნით, როცა f სამომხმარებლო კვანძია.

ვიცით, რომ $\underline{S}_f = \sqrt{3} \underline{U}_f \underline{I}_f^*$, მაშინ მივიღებთ:

$$\Delta \underline{S} = \sum_{f=0}^n \sqrt{3} \underline{U}_f \underline{I}_f^*$$

თავის მხრივ ვიცით, რომ $\underline{U}_f = U_0 + \sqrt{3} \Delta \underline{U}_f$, სადაც $\Delta \underline{U}_f$ მახალანსებელი კვანძიდან f კვანძამდე ძაბვის ვარდნის ფაზური მნიშვნელობა. აღნიშნული მსჯელობიდან გამომდინარე ვწერთ [28]:

$$\Delta \underline{S} = \sum_{f=0}^n \sqrt{3} (U_0 + \sqrt{3} \Delta \underline{U}_f) \cdot \underline{I}_f^* = \sqrt{3} U_0 \sum_{f=0}^n \underline{I}_f^* + 3 \sum_{f=0}^n \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}_f^*$$

მიღებული გამოსახულების პირველ წევრში თანამამრავლის სახით შედის ქსელის ყველა კვანძის (მახალანსებელი კვანძის ჩათვლით) დენების ალგებრული ჯამი, რაც კირხჰოფის პირველი კანონის თანახმად ნულის ტოლია. ამრიგად, მივიღებთ $\Delta \underline{S} = 3 \sum_{f=0}^n \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}_f^*$, რადგანაც $\Delta \underline{U}_{f=0} = 0$, ვღებულობთ:

$$\Delta \underline{S} = 3 \sum_{f=1}^n \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}_f^*$$

შევნიშნოთ, რომ (2.1) –ის გათვალისწინებით ქსელში სიმძლავრის დანაკარგებისთვის მივიღებთ:

$$\underline{\Delta S} = 3 \cdot \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \underline{I}_k (R_{f,k} + jX_{f,k}) \underline{I}_f^* \quad (2.3)$$

ელექტრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშების დროს უფრო მოსახერხებელია კვანძების დენური დატვირთვები გამოვსახოთ შესაბამისი კვანძური სიმძლავრეებით:

$$\underline{I}_k = \frac{S_k^*}{\sqrt{3} \underline{U}_k^*} \quad \text{და} \quad \underline{I}_f = \frac{S_f^*}{\sqrt{3} \underline{U}_f^*}$$

მაშინ (2.3) გამოსახულება მიიღებს სახეს [28]:

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{S_k^* \cdot S_f^*}{\underline{U}_k^* \cdot \underline{U}_f^*} \cdot \underline{Z}_{f,k} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k - jQ_k}{U_k} \cdot \frac{P_f - jQ_f}{U_f} \cdot \underline{Z}_{f,k} \cdot e^{j\varphi_{U,k-f}} \quad (2.4)$$

სადაც: $\varphi_{U_{kf}} = \varphi_{U_k} - \varphi_{U_f}$ არის k და f კვანძების ძაბვათა ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე. ცხადია, რომ $\varphi_{U_{k-f}} = -\varphi_{U_{f-k}}$.

(2.4) გამოსახულების გარკვეულ მათემატიკურ გარდაქმნათა და შესაბამის დაშვებათა შედეგად ელექტრულ ქსელში სიმძლავრის დანაკარგებისთვის მივიღებთ [28]:

$$\Delta P_P = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f R_{fk}; \quad \Delta P_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f R_{fk}; \quad (2.5)$$

$$\Delta Q_P = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f X_{fk}; \quad \Delta Q_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f X_{fk};$$

სადაც: ΔP_P გახლავთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვით, ხოლო ΔP_Q – აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით. მეორე მხრივ, ΔQ_P გახლავთ რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვებით, ხოლო ΔQ_Q – რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით.

ხშირად ამოცანათა ანგარიშის დროს საჭიროა დავადგინოთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის მნიშვნელობა, ამისათვის საჭიროა გამოვთვალოთ (2.5) განტოლებებიდან პირველი ორის კერძო წარმოებულები კვანძური დატვირთვებით.

დანაკარგების ფარდობით ნაზრდებს აღნიშნავენ σ_P და σ_Q სიმბოლოებით, მაშასადამე გვაქვს [28]:

$$\sigma_P = \frac{\partial \Delta P_P}{\partial P_f} = \frac{2}{U_b^2} \sum_{k=1}^n P_k R_{fk} \quad (2.6)$$

$$\sigma_Q = \frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_f} = \frac{2}{U_b^2} \sum_{k=1}^n Q_k R_{fk}$$

პირველს უწოდებენ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობით ნაზრდს, გამოწვეულს მოცემული კვანძის აქტიური დატვირთვის ცვლილებისას, ხოლო მეორეს უწოდებენ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობით ნაზრდს, გამოწვეულს კვანძის რეაქტიული დატვირთვის ცვლილებისას.

2.2.2. ქსელის კვანძში ძაბვის გადახრის შეფასება კვანძური დატვირთვების

მიხედვით

ძაბვის მუშა სიდიდე ქსელის ამა თუ იმ კვანძში დამოკიდებულია რამოდენიმე ფაქტორზე:

- ბაზისური ძაბვის (მაბალანსებელი კვანძის ძაბვის) სიდიდეზე - U_0 ;
- ელექტრული ქსელის კონფიგურაციასა და მისი ელემენტების ელექტრულ პარამეტრებზე - R, X ;
- მომხმარებელთა დატვირთვის სიდიდეზე მოცემულ რეჟიმში, კვანძურ დატვირთვაზე - P, Q .

კავშირი i კვანძის მუშა ძაბვასა და ბაზისურ ძაბვას შორის ჩაიწერება შემდეგ სახეში:

$$U_i = U_0 + \Delta U_i$$

ძაბვის დანაკარგი გადაცემის ქსელში – ΔU_i შეიძლება გამოთვლილ იქნეს ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობების გამოყენებით:

$$\Delta U_i = \frac{1}{U_0} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \quad (2.7)$$

სადაც: P_j, Q_j – j კვანძის აქტიური და რეაქტიული გენერაცია/დატვირთვა (გამოთვლების დროს გენერაცია აღემა „+“ ნიშნით, ხოლო დატვირთვა „–“ ნიშნით); R_{ij}, X_{ij} – ქსელის კვანძების აქტიური და რეაქტიული საკუთარი (როცა $j = i$) და ურთიერთ (როცა $j \neq i$) წინაღობები.

დაბალი 0,4 კვ ძაბვის კომუნალურ ქსელში ელექტროენერჯის მიმღებთან ძაბვის სიდიდის დასაშვები გადახრა არის $\pm 5\%$. მანაწილებელ და მკვებავ ქსელში ელექტრული იზოლაციის მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე, ქსელის კვანძებში ძაბვის მნიშვნელობის გაზრდა (ნომინალური სიდიდის მიმართ) იზღუდება შემდეგ ფარგლებში [29]:

- 20 კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ქსელებში - არაუმეტეს 20%-ისა;
- 35-220 კვ ძაბვის ქსელებში - არაუმეტეს 15%-ისა;
- 330 კვ ძაბვის ქსელებში - არაუმეტეს 10%-ისა;
- 500 კვ და მეტი ძაბვის ქსელებში - არაუმეტეს 5%-ისა;

როგორც ვხედავთ, ზემოაღნიშნული ძაბვის ქსელში სახაზო იზოლაციის უსაფრთხო მუშაობის თვალსაზრისით დასაშვებია ძაბვის გადახრა $+5\%$ -მდე. მიღებულია, რომ ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $\pm(2 \div 3)\%$ -ზე მეტად ანუ:

$$(0,97 \div 0,98)U_0 \leq U_i \leq (1,02 \div 1,03)U_0$$

ზემოაღნიშნული ძაბვის ქსელებში აღნიშნული პირობის შესასრულებლად, საჭირო ხდება ქსელის კვანძებში დავაყენოთ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები რეაქტიული სიმძლავრის მიზნობრივი გენერაციის ან მოხმარების კუთხით.

2.3. ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკური მართვის პრობლემური საკითხები

2.3.1. ძაბვის რეგულირება ელექტროსისტემაში

ელექტრულ ქსელში ძაბვის რეგულირება ენერგოსისტემის მართვის მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს. სიხშირისაგან განსხვავებით ძაბვის რეგულირების ამოცანა რთულდება ელექტრული ქსელის სტრუქტურისა და კონფიგურაციის გართულებასთან ერთად. ძაბვის რეგულირების რაციონალური დაგეგმვის მიზნით ქსელის საკონტროლო კვანძებისთვის წინასწარ დადგენილი უნდა იქნეს ძაბვის ქვედა და ზედა ზღვრული მნიშვნელობები.

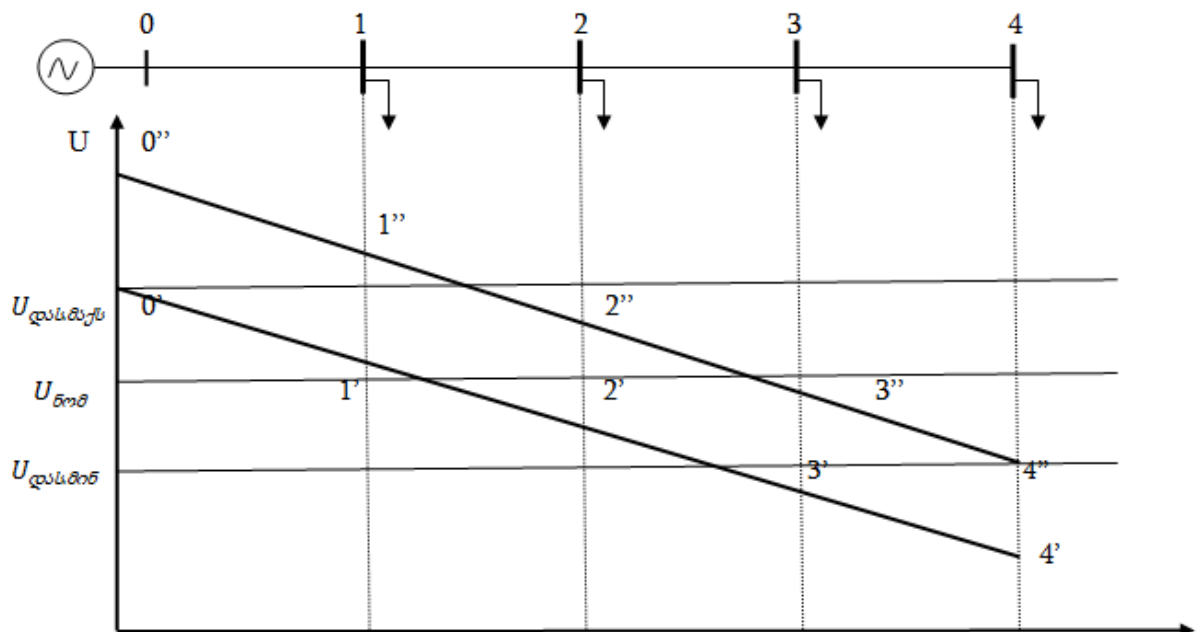
ელექტრომიმდებთა მუშაობა უარესდება თუ მომჭერებზე ძაბვის სიდიდე გადახრილია ნომინალური მნიშვნელობიდან, ეკონომიკური მაჩვენებელი მით უფრო მცირდება, რაც მეტია გადახრა დასაშვები ფარგლებიდან. ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობიდან გადახრის ერთ-ერთი მიზეზია მომხმარებელთა დატვირთვის ცვლადი რეჟიმი. ელექტროენერჯის ცვლადი მოხმარების რეჟიმს შეესაბამება სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილებისა და ძაბვის დანაკარგის ცვლილება. ზამთრის პერიოდში ქალაქის განათება იცვლება 100%-დან (საღამოს საათები) 10-15%-მდე (ღამის საათები). კომუნალურ მომხმარებელთან 0-დან 100%-მდე დღე-ღამის განმავლობაში (როგორც წესი, კომუნალურ მოხმარებელთა დატვირთვის პიკებია დილისა და საღამოს საათები). მკვებავ რაიონულ ქსელებში ღამის საათებში ხაზები დატვირთულია მაქსიმალური დატვირთვის 40-50%-ით [13].

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმისას ძაბვის დანაკარგი მნიშვნელოვნად მეტია ვიდრე მინიმალურის დროს, ეს განსხვავება მით მეტია, რაც მეტია დატვირთვის სიმძლავრე და მოხმარებლის ელექტრული დაშორება კვების ცენტრიდან. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ქსელის დატვირთვის ერთი რეჟიმიდან მეორეში გადასვლისას შორეულ მომხმარებელთან მუშა ძაბვა შეიძლება იცვლებოდეს საკმარისად დიდ ფარგლებში, რაც ქსელისადმი წაყენებული მოთხოვნის შესაბამისად არ არის მიზანშეწონილი [4].

ამის თავიდან აცილების მიზნით მიზანშეწონილია მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში კვების ცენტრში დავიჭიროთ უფრო მაღალი სიდიდის ძაბვა ვიდრე მინიმალური დატვირთვისას. ამ პრინციპს ძაბვის შემხვედრი რეგულირება

ჰქვია და ის კვების მოცემული ცენტრისათვის ძაბვის ცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპს წარმოადგენს [3].

მთელ რიგ შემთხვევებში ცენტრალიზებული (შემხვედრი) რეგულირება ვერ უზრუნველყოფს მომხმარებელთან ძაბვის დასაშვებ ფარგლებში შენარჩუნებას. მაქსიმალური დატვირთვისას ძაბვა მოხმარებელთან შეიძლება დაბალი აღმოჩნდეს (წირი 0'1'2'3'4', ნახ.2.1.). თუ ცენტრალური რეგულირების პრინციპით ძაბვას ავამაღლებთ კვების წენტრში, მაქსიმალური დატვირთვისას, ისე რომ უშორეს მომხმარებელთან ძაბვა აკმაყოფილებდეს მისდამი წაყენებულ მოთხოვნებს, მაშინ არაა გამორიცხული, რომ კვების ცენტრთან ახლოს მყოფ მოხმარებელთან ძაბვა აღმოჩნდეს დასაშვებ მნიშვნელობაზე მეტი (წირი 0''1''2''3''4'', ნახ.2.1.) [3].



ნახ. 2.1. ძაბვის ცენტრალური რეგულირება ელექტროსისტემაში

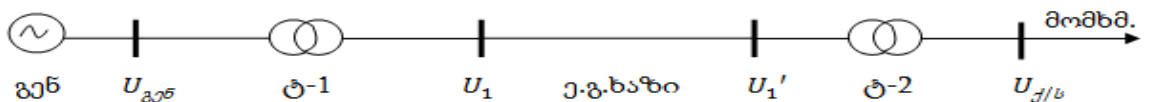
ეს შემთხვევა მიუთითებს იმაზე, რომ დიდ ელექტრულ სისტემებში ძაბვის ცენტრალიზებული რეგულირება პრაქტიკულად შეუძლებელია, ამიტომ ასეთ დროს აუცილებელია გამოვიყენოთ ძაბვის დეცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპი. რაც მდგომარეობს იმაში, რომ უშუალოდ ელექტრული ენერჯის მიმღები ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეზე (რომლებიც თავის მხრივ წარმოადგენს მანაწილებელი ქსელის კვების ცენტრს) ერთმანეთისგან

დამოუკიდებლად განხორციელდეს ძაბვის რეგულირება შესაბამისი საშუალებით (მეთოდით) [3; 4].

უმარტივესი ელექტრული ქსელის შესაბამისად (იხ.ნახ.2.2) ენერჯის მიმღები ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეზე ძაბვის მუშა მნიშვნელობა შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით [3]:

$$U_{ქ/ს} = \left(\frac{U_{გენ}}{k_{ტ1}} - \Delta U_{ხაზ} - \Delta U_{ტრ} \right) \cdot k_{ტ2} \quad (2.8)$$

სადაც: $\Delta U_{ხაზ}$ – ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი ეგზ-ში; $\Delta U_{ტრ}$ – ძაბვის გრძივი დანაკარგები ტრანსფორმატორში; $U_{გენ}$ – ელექტროსადგურის საგენერატორო ძაბვის მუშა მნიშვნელობა სალტეზე; $k_{ტ1}$ და $k_{ტ2}$ – ელექტრულ ქსელში სამაღლებელი და სადაბლებელი ტრანსფორმატორების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები, შევნიშნოთ რომ $k_{ტ} = \frac{U_{დაბ}}{U_{მაღ}}$.



ნახ. 2.2. მარტივი ელექტრული ქსელი

(2.8) გამოსახულებიდან ჩანს თუ რა ბერკეტები არსებობს ელექტრულ სისტემაში ძაბვის რეგულირებისათვის, ქვემოთ ჩამოთვლილია რამოდენიმე ხერხი:

- ძაბვის რეგულირება გენერატორის აგზნების დენის ცვლილებით, $U_{გენ}$ – ის ცვლილება;
- ძაბვის რეგულირება ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის ($k_{ტ1}$, $k_{ტ2}$) ცვლილებით;
- ძაბვის რეგულირება ელექტროგადამცემი ხაზის რეაქტიული წინააღობისა (X) და მომხმარებლის რეაქტიული დატვირთვის (Q) კომპენსაციით. $\Delta U_{ხაზ}$ და $\Delta U_{ტრ}$ სიდიდეთა ცვლილება;
- ძაბვის რეგულირება ხაზის აქტიური (R) წინააღობის ცვლილებით, სადენის განიკეთვის F [მმ²] ცვლილება.

2.3.2. სიმძლავრის დანაკარგების მართვა

ელექტრულ სისტემაში სიმძლავრისა და ელექტრული ენერჯის დანაკარგები აღწევს მნიშვნელოვან სიდიდეს. სიმძლავრისა და ელექტრული ენერჯის დანაკარგთა გადანაწილება ელექტროსისტემის ელემენტებს შორის ნაჩვენებია ცხრ.2.1-ში. საიდანაც ჩანს, რომ ჯამური დანაკარგების დაახლოებით 65% მოდის ადგილობრივ მანაწილებელ ქსელებზე 0,1-10 კვ. აღსანიშნავია აგრეთვე ის, რომ ფერადი ლითონის ხარჯი ამ ძაბვის ქსელებში დაახლოებით 4-ჯერ მეტია ვიდრე რეგიონულ მანაწილებელ და რაიონულ ქსელებში (35-110 კვ) [13].

„ ცხრილი 2.1.“ ელექტრული სისტემის ელემენტებში სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგები, %

ელექტრული ქსელის ძაბვა, კვ	ენერჯის დანაკარგი, კვტ-სთ			სიმძლავრის დანაკარგი, კვტ		
	ხაზები	ტრანსფორმატორები	სულ	ხაზები	ტრანსფორმატორები	სულ
$U_{\delta} \geq 110$	13,3	12,4	25,7	14,7	9,8	24,5
$10 < U_{\delta} \leq 35$	6,9	3,0	9,9	8,0	2,0	10,0
$U_{\delta} \leq 10$	47,8	16,6	64,4	51,7	13,8	65,5
ჯამი	68	32	100	74,4	25,6	100

ელექტრულ ქსელში ენერჯის დანაკარგები იყოფა ორ მდგენელად, ელექტრული ენერჯის დანაკარგი განივ გამტარობაში და გრძივ წინაღობაში. განივ გამტარობაში დანაკარგები დამოკიდებულია მხოლოდ ელემენტზე მოდებული მუშა ძაბვის მნიშვნელობაზე, რომლის გასაშუალებელი მნიშვნელობა დროის განსახილველ პერიოდში შეიძლება ჩაითვალოს ნომინალურის ტოლად. ამ შემთხვევაში ენერჯის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულებას აქვს სახე [3]:

$$\Delta \mathcal{E}_G = \Delta P_G \cdot T_0$$

სადაც: ΔP_G - სიმძლავრის დანაკარგი ელემენტის G გამარობაში ნომინალური ძაბვის დროს; T_0 - ამ ელემენტის ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლივობა.

თუ ქსელის ელემენტი დროის განსახილველ t ინტერვალში მუშაობს მუდმივი $S(t) = const$ დატვირთვის რეჟიმში, მაშინ სიმძლავრის დანაკარგები მუდმივია $\Delta P_R = const$ ელექტრული ენერგიის დანაკარგი გრძივ წინალობაში იანგარიშება ფორმულით [3]:

$$\Delta \mathcal{E}_R = \Delta P_R \cdot t$$

როგორც წესი სიმძლავრის დანაკარგი არ არის მუდმივი, რადგან მომხმარებელთა დატვირთვის რეჟიმი ცვლადია. ამ დროს ელექტრული ენერგიის დანაკარგი გრძივ წინალობაში საანგარიშო T_0 დროის შუალედში იანგარიშება ფორმულით [3]:

$$\Delta \mathcal{E}_R = \frac{R}{U_b^2} \cdot \int_0^{T_0} (S(t)^2) dt$$

ამრიგად, ქსელის ნებისმიერ ელემენტში ენერგიის ჯამური წლიური დანაკარგია:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_G + \Delta \mathcal{E}_R = \Delta P_G \cdot T_0 + \Delta P_{R,მაქს} \cdot \tau \quad (2.9)$$

სადაც: $\Delta P_{R,მაქს}$ - ქსელის ელემენტის R წინალობაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები დროის იმ მომენტში, რომელსაც შეესაბამება აღნიშნული ელემენტის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი; τ - მაქსიმალური დანაკარგების დრო.

ქსელის ელემენტში ენერგიის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება (2.9) დანაკარგების შეფასების მიზნით, შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგ სახეში [3]:

$$\Delta \mathcal{E} = \sum \left(U^2 G T_0 + \frac{P_{მაქს}^2 + Q_{მაქს}^2}{U^2} \cdot \frac{\rho l}{F} \cdot \tau \right)$$

ქსელში ენერგიის დანაკარგების აბსოლუტური მნიშვნელობა ჯერ კიდევ არ განსაზღვრავს ქსელის მუშაობის ეფექტურობის დონეს. ამიტომ უფრო მიზანშეწონილია განვიხილოთ ენერგიის დანაკარგების ფარდობითი მნიშვნელობა [3]:

$$\begin{aligned} \Delta\mathfrak{E}^* &= \frac{\Delta\mathfrak{E}}{\mathfrak{E}_{\text{მოხმ}}} = \frac{1}{P_{\text{მაკს}} \cdot T_{\text{მაკს}}} \sum \left[U^2 GT_0 + \frac{P_{\text{მაკს}}^2 + Q_{\text{მაკს}}^2}{U^2} \cdot \frac{\rho l}{F} \cdot \tau \right] \Rightarrow \Delta\mathfrak{E}^* \\ &= \sum \left(\frac{U^2 GT_0}{P_{\text{მაკს}} \cdot T_{\text{მაკს}}} + \frac{P_{\text{მაკს}}}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{მაკს}}} \cdot \frac{\rho l}{F} \cdot \frac{\tau}{T_{\text{მაკს}}} \right) \quad (2.10) \end{aligned}$$

მიღებული (2.10) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ქსელის ელემენტების აქტიურ გამტარობაში ენერჯის დანაკარგების ხვედრითი წილი მით უფრო მცირეა, რაც უფრო დიდია ელექტროდანადგართა დადგმული სიმძლავრის გამოყენების ხანგრძლივობა ($T_{\text{მაკს}}$). (2.10) გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს თუ რომელ ფიზიკურ სიდიდეებზეა დამოკიდებული ელექტრული ენერჯის დანაკარგები და რა ბერკეტები არსებობს მის შესამცირებლად. სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებებად შეიძლება განვიხილოთ [3]:

- მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი ქსელის ცალკეული ელემენტის დაუტვირთავ რეჟიმში (უქმი სვლა) მუშაობა (T_0 -ის შემცირება) – ორგანიზაციული ღონისძიება;
- უზრუნველყოთ ქსელის კვანძებში U მუშა ძაბვის ოპტიმალური მნიშვნელობა - (ორგანიზაციული და ტექნიკური ღონისძიება);
- რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია, დატვირთვის კოეფიციენტის ამაღლება – $\cos \varphi \Rightarrow \max$ (ტექნიკური ღონისძიება);
- მომხმარებელთან ელექტროენერჯის გადაცემა განხორციელდეს უმოკლესი გზით. l –ის ოპტიმალური შერჩევა (ტექნიკური და ორგანიზაციული ღონისძიება);
- სადენის მუშა F განიკვეთის ოპტიმალური შერჩევა - (ტექნიკური ღონისძიება);
- ელექტროგადამცემ ხაზებზე გვირგვინის მოვლენის არ წარმოქმნის უზრუნველყოფა, გვირგვინზე ენერჯის დანაკარგების შემცირება – $\Delta E_{\text{გვ}} = U^2 Gt \Rightarrow \min$ (ტექნიკური ღონისძიება);
- ელექტროსადგურებს შორის აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა (P, Q) ოპტიმალური განაწილება – (ორგანიზაციული ღონისძიება).

2.4. მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალასნების გზები

ზოგადად ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში უმეტეს შემთხვევებში, სხვადასხვა ძაბვის ქსელებში მიმდინარე პროცესები ერთმანეთზე მჭიდრო ურთიერთგავლენას ახდენს. ტექნიკო-ეკონომიკური თვალსაზრისით ზემოაღნიშნული ძაბვის ქსელიდან მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დინება არამიზანშეწონილია. კერძოდ ის იწვევს: აქტიური სიმძლავრის დიდ დანაკარგს, საკონტროლო კვანძებში ძაბვის მუშა მნიშვნელობათა გადახრას ნომინალური სიდიდისგან, აუარესებს ქსელის მუშაობის პირობებს [5].

სისტემაწარმოქმნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანისას თუ რომელიმე კვანძში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით მოითხოვება რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია, მაშინ ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით მიზანშეწონილია ეს სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდეს სისტემაწარმოქმნელი ქსელის მოცემულ კვანძში მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით, ეს კი უკვე წარმოადგენს მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანას [21].

ცნობილია, რომ რეაქტიული სიმძლავრის ძირითადი მომხმარებლები მიერთებულია 10-6 და 0,38 კვ ძაბვის კვანძებში და მეორეხრივ მანაწილებელ ქსელში გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი. შესაბამისად, ადგილობრივი და რეგიონული მანაწილებელი ქსელის ($U_6 \leq 110$ კვ) კვანძებში დადგმული უნდა იქნას რეაქტიული სიმძლავრის დანადგარები, რომლებიც მუშაობენ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში.

როგორც ზემოთ (1.13) და (1.14)-ში ვაჩვენეთ რეაქტიული სიმძლავრის გადადინება ქსელში იწვევს ძაბვის ვარდნას მის ცალკეულ ელემენტში. (1.9) გამოსახულებიდან (და ასევე ძაბვების დიაგრამიდან, ნახ.1.10.) ჩანს, რომ მიმდების სალტებზე, ძაბვის სიდიდეზე(მოდულზე) ძირითადად მოქმედებს ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი - ΔU , რომელიც (1.13)-ის საფუძველზე შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგ ფორმაში [30]:

$$\Delta U = \frac{1}{U_b} \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i R_i + \sum_{i=1}^n Q_i X_i \right) = \Delta U_R + \Delta U_X \quad (2.11)$$

სადაც: $i = 1, 2, \dots, n$ ქსელის ელემენტთა რაოდენობა; ΔU_R – ძაბვის დანაკარგის გრძივი შემდგენის წევრი, გამოწვეული ქსელის ელემენტის აქტიურ წინაღობაში გადინებული აქტიური სიმძლავრით; ΔU_X – ძაბვის დანაკარგის გრძივი შემდგენის წევრი, გამოწვეული ქსელის ელემენტის რეაქტიულ წინაღობაში გადინებული რეაქტიულ სიმძლავრით;

35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის რეგიონალურ და ადგილობრივ მანაწილებელ ქსელებში, როგორც წესი, გამოიყენება შედარებით მცირე განიკვეთის სადენები, რომლებისთვისაც სამართლიანია უტოლობა: $r_0 > x_0$ და შესაბამისად (2.11) გამოსახულების მიხედვით $\Delta U_R > \Delta U_X$ [30]. აქედან გამომდინარე, ამ ძაბვის ქსელებში ($U_b \leq 35$ კვ) ძაბვის დანაკარგის მნიშვნელობაზე არსებით გავლენას ახდენს ΔU_R და ამიტომ ამ შემთხვევაში მუშაობენ PR შესაკრების შემცირებაზე, კონკრეტულად კი R აქტიურ წინაღობაზე.

110 კვ და უფრო მაღალი ძაბვის ქსელებში სადენტა განიკვეთის შერჩევით ძაბვის დანაკარგის ცვლილება უმნიშვნელოა. იმიტომ, რომ ჯერ-ერთი ამ ქსელთან მომხმარებლები მიერთებულნი არიან ძაბვის რეგულირების საშუალების მქონე მადაბლებელი ტრანსფორმატორების გავლით, და მერე მეორე ამ ძაბვის ქსელებში გამოყენებული სადენებისთვის სრულდება შემდეგი უტოლობა: $r_0 \ll x_0$ და (2.11) გამოსახულების შესაბამისად $\Delta U_X > \Delta U_R$ [30]. აქედან გამომდინარე, ამ ძაბვის ქსელებში ($U_b \geq 110$ კვ) ძაბვის დანაკარგის მნიშვნელობაზე არსებით გავლენას ახდენს ΔU_X და ამიტომ მუშაობენ QX შესაკრების შემცირებაზე. აქ ეფექტურ ღონისძიებად ითვლება, როგორც ხაზის X რეაქტიული წინაღობის ცვლილება (გრძივი კომპენსაცია) ასევე Q რეაქტიულ სიმძლავრის ნაკადგადადინების რეგულირება (განივი კომპენსაცია).

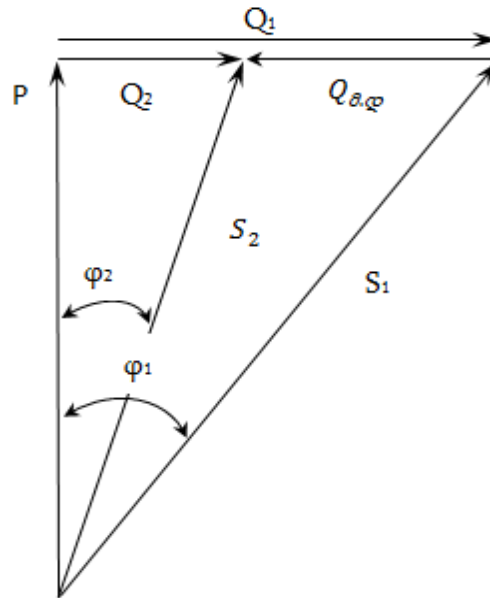
ამრიგად, რეგიონალურ და ადგილობრივ მანაწილებელ ქსელში დიდი სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის გადადინება ძაბვის ხარისხზე უარყოფითად მოქმედებს. ასევე, ეს გადადინება უარყოფითად მოქმედებს ქსელის მუშაობის ეკონომიკურობის მაჩვენებელზე, რადგანაც იზრდება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები. აქედან გამომდინარე, მიზანშეწონილია და ეკონომიკურადაც

გამართლებულია ელექტროსისტემაში ხორციელდებოდეს რეაქტიული სიმძლავრის რეგიონული ბალანსირების პრინციპი ანუ გონივრულ მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი რეაქტიული სიმძლავრის გადადინებები სისტემის ერთი რეგიონიდან მეორეში. რისთვისაც ქსელში გამოიყენება სხვადასხვა დანიშნულების რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები.

მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის გვარობის მიხედვით განარჩევენ ინდივიდუალურ და ცენტრალიზებულ (ჯგუფური) კომპენსაციას [3]. ინდივიდუალური კომპენსაცია ხორციელდება უშუალოდ მომხმარებელთან (0,38 კვ ძაბვის კომუნალური ქსელი), ხოლო ცენტრალიზებული (ჯგუფური) კომპენსაცია მანაწილებელი ქსელის ქვესადგურის მაღალი ძაბვის შემკრებ სალტეზე (როგორც წესი, 6 – 10 კვ ძაბვის შემკრებ სალტეზე). ინდივიდუალური კომპენსაცია გამოიყენება, როდესაც ელექტრომიმღებთან დატვირთვის კოეფიციენტი ($\cos\varphi$) მკვეთრად გადახრილია დასაშვები ზღვრიდან [26]. ეს ძირითადად გამოწვეულია დიდი სიმძლავრის ასინქრონული ძრავებისა და რეაქტიული სიმძლავრის მასიური მოხმარების დანადგარებით. როგორც წესი, ასეთ ობიექტებს წარმოადგენენ: ქარხანა-ფაბრიკები, მეტალურგიული ქარხნები, წყლის სატუმბი სადგურები და ა.შ.

ნახ.2.3-ზე ნაჩვენებია რეაქტიული სიმძლავრე კორექციამდე $Q_1 = P \cdot tg\varphi_1$ და კორექციის შემდეგ $Q_2 = P \cdot tg\varphi_2$ [26].

სადაც: P - მომხმარებლის აქტიური დატვირთვა, φ_2 – სასურველი $\cos\varphi_2$ -ის შესაბამისი ფაზური ძვრის კუთხეა კომპენსაციის შემდეგ, ხოლო $\cos\varphi_1$ – დატვირთვის კოეფიციენტი კომპენსაციამდე.



ნახ.2.3. სიმძლავრეთა სამკუთხედი რეაქტიული სიმძლავრის ინდივიდუალური კომპენსაციისას

ინდივიდუალური კომპენსაციისას მაკომპენსირებელი დანადგარის საჭირო სიმძლავრე შემდეგი ფორმულით გამოითვლება [26]:

$$Q_{a.დ} = P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$$

ცენტრალიზებული (ჯგუფური) კომპენსაციისას, როდესაც მაკომპენსირებელი დანადგარი განთავსებულია მანაწილებელი ქვესადგურის მაღალი ძაბვის შემკრებ სალტეზე, მისი სიმძლავრის დადგენისათვის საჭიროა შესაბამისი ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნა [3; 17; 19; 20; 21; 22; 23].

დასკვნა II თავის მიმართ

1. ელექტრული ქსელის რეჟიმების ოპტიმიზაციის ამოცანათა განხილვისას საჭირო ხდება დავადგინოთ ნებისმიერი f კვანძის დატვირთვის ცვლილების გავლენა ქსელში დანაკარგების სიდიდეზე. ამ მიზნით საჭიროა დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება განსაზღვრულ იქნეს არა შტოებში გამავალი დენების (სიმძლავრეების) მიხედვით, არამედ კვანძური დატვირთვებით. აღსანიშნავია, რომ ამ ტიპის გამოთვლებში გვესაჭიროება კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ და რეაქტიულ წინააღმდეგობათა მნიშვნელობების ცოდნა.
2. მიღებულია ქსელის კვანძებში ძაბვის გადახრის საანგარიშო გამოსახულება, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ქსელში სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების გაანგარიშების გარეშე კვანძების რეზულტატიური გენერაცია/დატვირთვებისა და საკუთარ და ურთიერთ წინააღმდეგობათა საშუალებით დავადგინოთ ძაბვის მუშა მნიშვნელობა კვანძებში.
3. ელექტროენერგეტიკაში იკვეთება ელექტრული სისტემის მართვის არაერთი მნიშვნელოვანი, თუმცა ამავე დროს საკმაოდ კომპლექსური და პრობლემური საკითხები როგორცაა: ძაბვისა და სიხშირის რეგულირება, აქტიურ/რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილების მართვა და სხვა. ელექტროსისტემაში გაგვაჩნია საკმარისი ბერკეტი/საშუალება აღნიშნულ რეჟიმის პარამეტრებზე მანიპულირების/ზომოქმედების, რომლებიც გამოიყენება და მომავალშიც დაინერგება ელექტრული ქსელის მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლის, მდგრადობის, საიმედოობისა და ელექტრული ენერჯის მაღალი ხარისხის უზრუნველსაყოფად.

თავი 3. ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის მათემატიკური მოდელი

3.1. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის არსებული მეთოდების მიმოხილვა

ელექტროენერჯის წარმოება, გადაცემა-განაწილება და მოხმარება, იშვიათ გამონაკლისთა გარდა, ხორციელდება ცვლადი დენის მეშვეობით. ცვლადი დენის სისტემებს გააჩნია რამოდენიმე მკვეთრად უარყოფითი ნაკლი, ერთ-ერთი მათგანია რეაქტიული სიმძლავრის არსებობა, ის აქტიურ სიმძლავრესთან ერთად მიეწოდება ცვლადი დენის ელექტროსისტემას. რეაქტიული სიმძლავრე გახლავთ სრული სიმძლავრის თანდაყოლილი შემდგენი და აქტიური სიმძლავრისაგან განსხვავებით არ მონაწილეს ენერჯის მოხმარების შეუქცევად პროცესში [27].

რეაქტიული სიმძლავრე მოიხმარება ან გენერირდება ელექტრული სისტემის თითქმის ყველა ელემენტის მიერ, იქნება ეს გენერაციის, გადაცემა-განაწილებისა თუ დატვირთვის (მოხმარების) კომპონენტები. ცვლადი დენის სისტემებში ელექტრული წრედის შტო შეიცავს აქტიურ და რეაქტიულ გრძივ წინაღობებს. რეაქტიული წინაღობა შესაძლებელია იყოს ინდუქციური ან ტევადური ბუნების, სწორედ ეს ფაქტორი განსაზღვრავს რეაქტიული სიმძლავრის კონტრიბუციას აღნიშნულ წრედში. დატვირთვათა უმეტესობა ინდუქციური ხასიათისაა და ის ქსელიდან მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს. ტექნიკურ-ეკონომიკურ მიზეზთა გამო მიზანშეწონილია, რომ რეაქტიული სიმძლავრის დატვირთვის კომპენსაცია განხორციელდეს მანაწილებელ ქსელში, დატვირთვის კვანძებთან ახლოებელ არეში [27].

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა უაღრესად რთული და კომპლექსური სახის ამოცანაა, რომელსაც მთელი მსოფლიოს მასშტაბით მრავალრიცხოვანი გამოკვლევები მიეძღვნა.

როგორც §1.4-ში ავღნიშნეთ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია სისტემური ამოცანაა, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ ელექტრული ქსელის ნებისმიერ წერტილში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის განთავსება

გავლენას ახდენს მთელი ქსელის მუშაობის რეჟიმზე. მოცემული ამოცანისას მთლიანი ელექტრული ქსელის გათვალისწინების აუცილებლობა მისი თავისებურებაა, რომელსაც ელექტროენერგეტიკაში ანალოგი თითქმის არ მოეძებნება.

შესაბამისად, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანისას რეკომენდირებულია სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენება. ამ პრინციპის თანახმად ქსელი განიხილება ერთიან, მთლიან სტრუქტურად ყველა საფეხურის ძაბვის ქსელის გათვალისწინებით. სისტემური მიდგომის პრინციპის შესახებ საფუძვლიანი წარმოდგენა შესაძლოა შეგვექმნას [4; 17; 18; 19; 20] ლიტერატურების განხილვით.

[2; 5]-ში ხაზი გაესვა მკვებავ და მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული სიმძლავრის განაწილების ურთიერთ ასიმეტრიულობას. კერძოდ, აღინიშნა, რომ ზემადალი ძაბვის ქსელი არის რეაქტიული სიმძლავრის არარაციონალური წყარო, შესაბამისად აქ არსებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მანაწილებელ ქსელში გადინება ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით არამიზანშეწონილია და იგი მამუშნტებელი რეაქტორების საშუალებით ადგილზევე უნდა გაკომპენსირდეს.

[2; 5] - ში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას განიხილავენ, როგორც სისტემურ პრობლემას. ისინი აღნიშნავენ, რომ ზემადალი ძაბვის სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საკითხი უმთავრესად დაკავშირებულია ძაბვის რეგულირების ამოცანასთან. მეორეხრივ, ისინი განმარტავენ, რომ მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსება და მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევა უნდა განხორციელდეს ეკონომიკურობის კრიტერიუმით. შესაბამისად, მათ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსებისა და ძაბვის რეგულირების საკითხი პირობითად გაყვეს ურთიერთდაკავშირებულ ორ ქვე-ამოცანად.

[2; 5] - ში მიღებულია ზემადალი ძაბვის ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომელიც ეფუძნება ქსელის საკუთარ და ურთიერთ რეაქტიულ წინაღობებსა და ძაბვის

მოთხოვნილ სიდიდეს კვანძში. უნდა აღინიშნოს, რომ მოცემულ სადისერტაციო ნაშრომში სისტემაწარმომქნელი ქსელისათვის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი სწორედ ამ პრინციპით იქნა მიღებული.

[4] - ში მოცემული ამოცანის გადაწყვეტისათვის ერთ-ერთ შესაძლო გზად გვთავაზობენ შემდეგს: ელექტრული ქსელის საკონტროლო კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები უნდა შეირჩეს მოცემულ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან გამომდინარე. აღნიშნული კი უნდა დასაბუთდეს შესაბამისი ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის საფუძველზე.

[4; 31] - ში ელექტროსისტემაში ძაბვის რეგულირებისა და რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საკითხი განხილულია, როგორც ელექტრული სისტემის რეჟიმების ოპტიმიზაციის ამოცანა. მოცემული კომპლექსური ოპტიმიზაციის ამოცანის მიზნის ფუნქცია არის ელექტროსისტემაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაცია და ის გადაწყვეტილია გრადიენტის მეთოდით.

ამ ამოცანის საწყის პარამეტრს წარმოადგენს ელექტროსადგურთა აქტიური სიმძლავრის მნიშვნელობები (მაბალანსებელი კვანძის გარდა), ხოლო შეზღუდვის უტოლობებია: ა) ძაბვათა დასაშვები მნიშვნელობები კვანძებში; ბ) კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის წყაროთა დასაშვები დიაპაზონი; გ) ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის შესაძლო ინტერვალი [4; 24].

[32] - ში აღნიშნავენ, რომ მანაწილებელ და ზემალაღი ძაბვის ქსელებისათვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზანი და მისი პრაქტიკული განხორციელება აბსოლუტურად სხვადასხვა საკითხებია. აქ გამოკვლეულია ზემალაღი ძაბვის შორეული ელექტროგადამცემი ხაზების გასწვრივ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი. შესაბამისად, დადგენილია ზემალაღი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზის გასწვრივ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისას რეჟიმის პარამეტრთა (დენი, ძაბვა) განაწილება.

[32]-ში განიხილება ერთობ მნიშვნელოვანი და საინტერესო საკითხი, კერძოდ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას რა გავლენა აქვს ელექტრული სისტემის მდგრადობაზე. ნაჩვენებია, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის შესაბამისი კომპენსაცია დადებითად მოქმედებს ელექტრული სისტემის სტატიკურ და დინამიკურ მდგრადობაზე.

[26]-ში ძირითადად განიხილავენ რეაქტიული სიმძლავრის ინდივიდუალური კომპენსაციის საკითხებს. ავტორები აქტიურად ემხრობიან სხვადასხვა ტიპის ერთფაზა და სამფაზა ელექტრომომხმარებელთა დატვირთვის კოეფიციენტის კორექციისათვის კონდესატორთა ბატარეის გამოყენებას. მათ გაანალიზებული აქვთ ინდივიდუალური კომპენსაციისას თანმდევი მთელი რიგი პრობლემატური საკითხები, როგორცაა: კონდესატორთა ნარჩენი ელექტრული ველის განმუხტვა, შესაძლო რეზონანსის პირობები, კონდესატორთა დაცვა მ.შ. დენებისა და გადამაბევისაგან, მაღალი სიხშირის ჰარმონიკებით მდიდარი არაწრფივ დატვირთვათა ინდივიდუალური კომპენსაციის თავისებურებები და სხვ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების კუთხით ახალი თაობის მაკომპენსირებელი დანადგარების (FACTS Devices) გამოყენება ყველაზე პროგრესული ნაბიჯია [9; 10; 11; 32].

მოგეხსენებათ, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა დაკავშირებულია დამატებით ხარჯებთან: დანადგარის შექმნა, მონტაჟი, მომსახურება, ხარჯები დამხმარე მოწყობილობებზე და სხვა. ეს ხარჯები მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრესთან წრფივ დამოკიდებულებაშია [19]:

$$3_k \approx 3_k \cdot Q_{d,d}$$

სადაც: 3_k – ფარდობითი ხარჯი მაკომპენსირებელ დანადგარზე, ლარი (ევრო)/მგვარ წელიწადში;

ელექტრულ ქსელში მაკომპენსირებელ დანადგართა დადგმის შედეგად მცირდება სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგები, ხარჯები დანაკარგების გათვალისწინებით [19; 33]:

$$3_{\Pi} = c_0 \cdot \Delta P = c_0 \cdot (\Delta P_P + \Delta P_Q) = 3_{\Pi,P} + 3_{\Pi,Q}$$

სადაც: c_0 - აქტიური სიმძლავრის დანაკარგის ფარდობითი ღირებულება ლარი/კვტ, წელიწადში; $3_{\Pi,P}, 3_{\Pi,Q}$ - ხარჯები დანაკარგებზე, გამოწვეული ქსელში აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა დინებით, ლარი/წელიწადში.

რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის წლიური დაყვანილი ხარჯები გამოითვლება ფორმულით [19]:

$$3_k = (p_f + p_0 + p_s)(K_k + K_B) + C_k \quad (3.1)$$

სადაც: p_f - კაპიტალდაბანდების ნორმატიული კოეფიციენტი (შეგვიძლია მივიღოთ, რომ $p_f = 0,12$), რომელიც გვიჩვენებს კაპიტალდაბანდების ეკონომიკურ ხელსაყრელობას, რომლის ყოველწლიური ეფექტი არანაკლებ 12%-ია (გამოსყიდვის ვადა $t_{გაშ} = 100/12 \approx 8$ წელი და ქვემოთ); p_0 - ნორმატიული გამოქვითები, რემონტსა და მომსახურებაზე; p_s - ხარჯები ამორტიზაციაზე; K_k და K_B - მაკომპენსირებელი დანადგარის (K_k) და დამხმარე მოწყობილობების (K_B) ღირებულება ლარი/კვარ; C_k - აქტიური სიმძლავრის დანაკარგის ღირებულება მაკომპენსირებელ დანადგარში ლარი/კვარ წელიწადში.

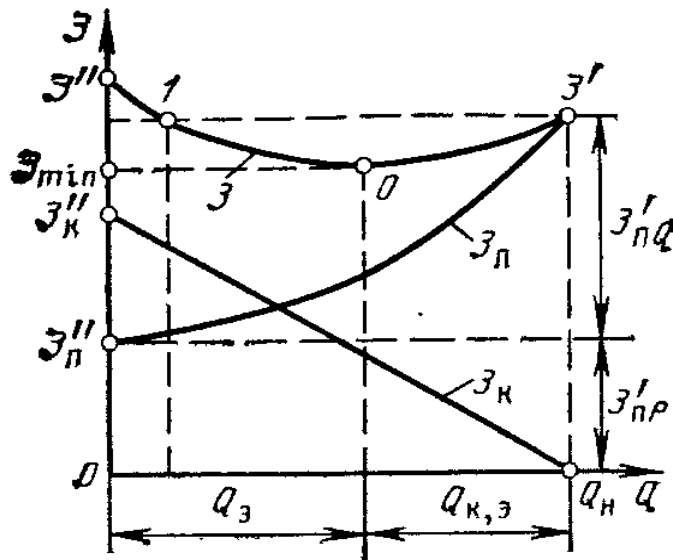
არსებული ნორმატივებით, შეგვიძლია მივიღოთ $p_0 + p_s = 0,1$ და (3.1) მიიღებს სახეს[19]:

$$3_k = 0,22(K_k + K_B) + C_k = 3_{k,k} + 3_B + C_k \quad (3.2)$$

სადაც: $3_{k,k}$ - საერთო ხარჯის შემდგენი, რომელიც მოდის მაკომპენსირებელ დანადგარზე; 3_B - საერთო ხარჯის შემდგენი, რომელიც განისაზღვრება სამონტაჟო სამუშაოთა და დამატებითი მოწყობილობათა ღირებულებით.

შევნიშნოთ, რომ რაც უფრო დიდია მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე მით მეტია დაყვანილი კაპიტალური ხარჯები მის დაყენებაზე და მით უფრო მცირეა დანაკარგები ქსელში. ოპტიმიზაციის ამოცანის მიზანს წარმოადგენს მოიძებნოს მაკომპენსირებელი დანადგარის ისეთი $Q_{შ,ღ}$ სიმძლავრის მნიშვნელობა, როდესაც ჯამური ხარჯი $3 = 3_k + 3_{\Pi}$ მიიღებს შესაძლო მინიმალურ მნიშვნელობას [19; 33].

ნახ.3.1-ზე ნაჩვენებია $3, 3_k$ და 3_{Π} სიდიდეთა ქსელში გამავალ Q რეაქტიულ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება. ნახაზის მიხედვით, როდესაც $Q = Q_H$ და ქსელში გაედინება მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი Q_H რეაქტიული სიმძლავრე ამ დროს რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია არ მოითხოვება და ხარჯები მაკომპენსირებელ დანადგარის დადგამზე $3_k = 0$. მეორე მხრივ, ამ დროს ხარჯები ქსელში სიმძლავრის დანაკარგებზე აღწევს $3' = 3'_{\Pi, P} + 3'_{\Pi, Q}$ მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რადგან ამ დროს ქსელში კვების ცენტრიდან მომხმარებელამდე გადინებული რეაქტიული სიმძლავრე აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, მან სრულად უნდა დააკმაყოფილოს მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე [19].



ნახ.3.1. მიზნის ფუნქციისა და მის შემდგენთა ქსელში გადინებულ რეაქტიულ სიმძლავრეზე დამოკიდებულების გრაფიკი

Q -ს შემცირებით ხარჯები მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგამაზე იზრდება, რადგან ამ დროს ქსელი სრულად ვეღარ უზრუნველყოფს მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული დატვირთვის მიწოდებას ($Q < Q_H$) და საჭირო ხდება ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარის განთავსება, თუმცა ხარჯები რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემაზე მცირდება კვადრატული

დამოკიდებულებით, ხოლო ხარჯები აქტიური სიმძლავრის გადაცემაზე $3_{II,P}$ უცვლელია.

რეაქტიული დატვირთვის სრული კომპენსაციისას ($Q = 0$), ქსელში აღარ გაედინება რეაქტიული სიმძლავრე, რამეთუ მომხარებელთა მიერ მოთხოვნილ რეაქტიული სიმძლავრეს სრულად უზრუნველყოფს ქსელში განთავსებული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი. ცხადია ამ დროს ხარჯები მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმაზე $3''_k$ მაქსიმალურია, ხოლო ხარჯები დანაკარგებზე $3''_{II} = 3'_{II,P}$ მინიმალურია და ის მხოლოდ ქსელში გადინებულ აქტიური სიმძლავრითაა განპირობებული [19].

მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური მნიშვნელობა გახლავთ – $Q_{k,3}$, რომლისთვისაც ჯამური დაყვანილი ხარჯები (მიზნის ფუნქცია) აღწევს მინიმუმს – $3 = 3_{min}$, მას შეესაბამება 0 წერტილი (იხ.ნახ.3.1). ოპტიმალური რეჟიმისას სასურველია $Q_3 = Q_H - Q_{k,3}$ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრე გადავცეთ კვების ცენტრიდან მოხმარების კვანძამდე. ოპტიმალური ამონახსნის მოძიება აიხსნება იმით, რომ 0 წერტილში $\frac{\partial 3}{\partial Q} = 0$ (წირის ($3(Q)$ მრუდის) მხებს აქვს ჰორიზონტალური მდგომარეობა). ამიტომ იმისათვის, რომ მივიღოთ ოპტიმალური გადაწყვეტა, აუცილებელია შევადგინოთ ანალიტიკური გამოსახულება 3 მიზნის ფუნქციის სახით და ავიღოთ მისი კერძო წარმოებული რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით და მიღებული გავუტოლოთ ნულს, რაც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ საძიებელი სიდიდის (ჩვენს შემთხვევაში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე) ოპტიმალური მნიშვნელობა [19].

რთულ შეკრულ ქსელში მიზნის ფუნქცია დამოკიდებულია რამოდენიმე კვანძურ დატვირთვაზე, ამიტომ ამ დროს აიღება მიზნის ფუნქციის კერძო წარმოებულები ყველა კვანძური დატვირთვის მიმართ ცალ-ცალკე და გაუტოლდება ნულს, მივიღებთ განტოლებათა სისტემას, რომელშიც განტოლებათა რაოდენობა ამ ქსელში შემავალ კვანძთა რაოდენობის ტოლია. აღნიშნულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით ყველა კვანძისათვის მივიღებთ

მაკომპენსირებელი დანადგარის $Q_{k,3}$ ოპტიმალური სიმძლავრის მნიშვნელობას [19].

მაქსიმალური ეკონომიკური ეფექტი, რომელიც შეიძლება მივიღოთ ელექტრულ ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმისას, რომელსაც ნახ.3.1-ის შესაბამისად შეესაბამება 0 წერტილი, გახლავთ [19]:

$$\exists = 3' - 3_{min}$$

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის კვლევის ყველა ამჟამად არსებული რეზულტატები პირობითად შეიძლება დავეყნოთ ორ ჯგუფად. პირველს, საკმარისად ფართო ჯგუფს, მიეკუთვნება ცალკეული ქვესისტემების ეკვივალენტირების მეთოდები [17; 19; 20], ხოლო მეორე ჯგუფს მიაკუთვნებენ პარციალური გაანგარიშების მეთოდს [17; 22], რომელიც პრინციპულად განსხვავებული მიდგომაა.

[20]-ის მიხედვით წარმოდგენილია მიდგომა დიდ ელექტრულ სისტემებში მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევასთან დაკავშირებით. თანამედროვე ელექტრომომარეგების სისტემები (აქ იგულისხმება ქსელის ყველა ელექტრული კავშირი) მიეკუთვნება დიდ ხელოვნურ სისტემათა ჯგუფს არასრულფასოვანი ინფორმაციებით. ყველა საფეხურის ძაბვის ქსელში კვანძთა დიდი რაოდენობის დროს გართულებულია ელექტრული ანგარიშების ჩატარება, ხშირად ვერ ხერხდება მათი კლასიკური და ნაცნობი ხერხით წარმოდგენა (ჩანაცვლების სქემის, დატვირთვათა მნიშვნელობების მოცემა და ა.შ), ამიტომ საჭირო ხდება მოდელირების სხვადასხვა გზის გამოძებნა და ეკვივალენტირება. ამ შემთხვევაში ქსელის მოდელი შედგება შეზღუდული, მაგრამ ზოგადი სახის ინფორმაციებით, რომლებიც როგორც წესი ცნობილია.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანის გადაჭრა აღწერილ პირობებში შესაძლებელია დიდ სისტემათა ოპტიმიზაციის მეთოდის გამოყენებით. გამოთვლებს, რომლის დროსაც ერთდროულად გათვალისწინებულია მთლიანი ელექტროსისტემის მომარაგების ყველა ძაბვის ქსელი, სისტემური გამოთვლები ეწოდება. ასეთ გამოთვლებში ოპტიმიზაციის მეთოდში გათვალისწინებული უნდა

იქნას ყველა ტექნიკურ-ეკონომიკური ფაქტორი, რომელიც არსებითია მოცემული ძაბვის ქსელებისათვის.

ელექტრული ანაგარიშების ინფორმაციული დონის უზრუნველყოფისა და მახასიათებელი თვისებების შესაბამისად მთლიანი ქსელის რეჟიმების მუშაობა შეიძლება დავყოთ ხუთ ჯგუფად [20]:

- ზემადალი ძაბვის ($U_{\text{ფ}} \geq 330$) ხაზები, სადაც რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა განისაზღვრება მისი ტექნიკური პარამეტრებით და არა მიმღები და გამცემი ენერგოსისტემათა მოთხოვნით;
- შიდასასისტემო და სისტემათაშორისი კავშირები 220-110 კვ და უფრო მაღალი ძაბვის ქსელებისათვის, სადაც რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადგადადინების ცვლილება შესაძლებელია ფართო დიაპაზონში ელექტრული ენერჯის მიმღებ და გამცემ ენერგოსისტემათა მოთხოვნის შესაბამისად;
- 110 კვ და მეტი ძაბვის შეკრული ქსელი, რომელიც არ შედის ზემო ჯგუფებში;
- 35-110 კვ ძაბვის ღია ქსელი;
- 6-20 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ქსელი;

ძირითად ქვესისტემას წარმოადგენს 110 კვ და მეტი ძაბვის ქსელი, რომლებიც სისტემური ანგარიშისას წარმოადგება ჩვეულებრივი საანგარიშო სქემის სახით. სხვა დანარჩენი ქსელის ჯგუფები იცვლება განხილული მოდელით, პარამეტრებით, რომლებიც წარმოადგენენ აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადს მიმართულს სასაზღვრო კვანძიდან ძირითად ქვესისტემისაკენ. პირველი ჯგუფის ქსელის მუშაობის რეჟიმები განისაზღვრება მხოლოდ საკუთარი პარამეტრებით, აქ გამოთვლები მიმდინარეობს სხვა ქსელების დამოუკიდებლად. სისტემური ანგარიშისას კი გამოიყენება პირველადი გამოთვლებიდან მიღებულ ხაზთა ძირითად ქვესისტემასთან მიერთების სასაზღვრო კვანძური $P(t) + Q(t)$ გრაფიკები, რომელიც მაკომპენისრებელი დანადგარის შერჩევისას ითვლება უცვლელად [20].

მეორე ჯგუფის ხაზებში სიმძლავრის გადაცემისას ოპტიმალური გრაფიკების განსაზღვრა წარმოებს ერთიანი ენერგოსისტემის სქემის განხილვით. ასეთი გრაფიკების მიღებისათვის აუცილებელია ყოველი დაკავშირებული ენერგოსისტემა შევცვალოთ ექვივალენტური/შესაბამისი n კვანძით, რომელიც ელექტრულად დაკავშირებული კვანძების რაოდენობის ტოლია. ასეთი სისტემის მოდელი სასაზღვრო კვანძების შესაბამისად შეიძლება წარმოვადგინოთ კვადრატული პოლინომის სახით [20]:

$$3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^n b_i Q_i \quad (3.3)$$

სადაც: a_{ij}, b_i აპროქსიმაციის კოეფიციენტებია, რომლებიც მიიღებიან ექსპერიმენტის დაგეგმვის უმცირესი კვადრატების მეთოდით, კვანძებში რეაქტიულ დატვირთვათა ცვლილების გზით.

ღია 35-110 კვ ძაბვის ქსელებისათვის (მეოთხე ჯგუფი) შეიძლება მოვიქცეთ ანალოგიური გზით. ოღონდ აქ ყოველ ასეთ ქსელს ძირითად ქვესისტემასთან აქვს მხოლოდ ერთი სასაზღვრო კავშირი. ამიტომ მოდელი მიიღებს (3.3)-ის სახეს ოღონდ უნდა გავითვალისწინოთ, რომ აქ $n = 1$, შესაბამისად ვწერთ [20]:

$$3 = aQ_{p,n}^2 + bQ_{p,n} \quad (3.4)$$

სადაც: $Q_{p,n}$ - რეაქტიული სიმძლავრე, რომელიც გადაიცემა ძირითად ქვესისტემიდან მანაწილებელ ქსელს.

6-20 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ქსელებში ინფორმაციები არასაიმედო და არასრულყოფილია, მისი დაზუსტება რთულდება ამ ქსელთა კუთვნილების დადგენით. როგორც კვლევები გვიჩვენებს, ამ შემთხვევაში ყველაზე რაციონალური გზა გახლავთ ქსელის წარმოდგენა(შეცვლა) ექვივალენტური აქტიური წინაღობით, რომლის მნიშვნელობა გამოითვლება [4; 17; 20]:

$$R_{gd} = \frac{\Delta P_{\%} U^2}{P(1 + tg^2 \alpha) \cdot 100} = \frac{\Delta P_{P,\%} U^2}{P \cdot 100}$$

აქ ერთადერთი საძიებელი სიდიდეა აქტიური სიმძლავრის დანაკრგი პროცენტში, მისი არ ცოდნის/პოვნის შემთხვევაში შესაძლებელია ვისარგებლოთ შემდეგი მახასიათებელი მნიშვნელობებით: $\Delta P_p = 3,8\%$ სამრეწველო ქსელისთვის და $\Delta P_p = 7,6\%$ სასოფლო-სამეურნეო ქსელში [20].

[34]-ის ავტორთა აზრით 6-35კვ ძაბვის ქსელებში შესაძლებელია უფრო მარტივი ეკვივალენტირება. კერძოდ, ის შეიძლება მიღებული იქნეს სქემის ხის შტოების წინააღმდეგობით-პარალელური შეერთების გზით.

[24] და [25] შრომებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანისას სისტემური მიდგომის პრინციპი ჩანაცვლებულია ლოკალური ამოცანით. კერძოდ, რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანა (სისტემური მიდგომის ამოცანა) დაყვანილ იქნა ცალკეული მანაწილებელი ქსელის ლოკალურ ამოცანებად. აქ ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნისას გათვალისწინებულ იქნა მკვებავ და მანაწილებელ ქსელთა ინტერესები.

[3]-ში განხილულია ასეთი შემთხვევა: დავუშვათ, რომ ქსელში ჩართულია $j = 0, 1, 2, \dots, m$ ელექტროსადგური და $j = m + 1, m + 2, \dots, n$ მოხმარების კვანძები.

მოხმარების კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა განიხილება ორი მიდგომით [3]:

1. მოცემულია (ცნობილია) ელექტროსადგურების რეაქტიული დატვირთვები და საჭიროა მოხმარების კვანძებში განისაზღვროს რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრე;
2. მოხმარების კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრის განსაზღვრასთან ერთად განისაზღვროს ელექტროსადგურების ოპტიმალური რეაქტიული დატვირთვები.

ორივე ამ შემთხვევაში ამოცანის კრიტერიუმს წარმოადგენს მეურნეობის დაყვანილი ხარჯები, რომელიც შეიცავს მოხმარების კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების ხარჯებს მასთან დაკავშირებულ საექსპლუატაციო

ხარჯებთან ერთად და ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებით გამოწვეულ ხარჯებს (ელექტროსადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის გამომუშავებასთან დაკავშირებით დამატებითი ხარჯები საჭირო არ არის). შესაბამისად მიზნის ფუნქციას ექნება სახე [3]:

$$3 = (E_{\bar{b}} + \alpha_j) \sum_{j=m+1}^n K_{0,j} Q_{j,j} + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} \cdot T_0 C_0 \cdot \sum_{j=m+1}^n Q_{j,j} + \Delta P_Q \cdot \tau \cdot C_0 \Rightarrow \min$$

ამ გამოსახულებაში: $Q_{j,j}$ – მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე (სამიებელი ცვლადი); $K_{0,j}$ – ამ დანადგარის ხვედრითი ღირებულება ლარი/მგვარ; $E_{\bar{b}}$ – კაპიტალური ხარჯების გამოსყიდვის ნორმატიული კოეფიციენტი; α_j – მაკომპენსირებელი დანადგარის საექსპლუატაციო ხარჯების ფარდობითი მნიშვნელობა; $\Delta P_j \%$ – ამ დანადგარში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, მგვტ; T_0 – დანადგარის ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლივობა, სთ; C_0 – ელექტროენერჯის ტარიფი, ლარი/მგვტსთ; ΔP_Q – ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით, მგვტ; τ – მაქსიმალური დანაკარგების დრო, სთ.

კავშირის განტოლებას წარმოადგენს გამოსახულება, რომელიც კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების მოსალოდნელი დაყენების გათვალისწინებით ჩაიწერება შემდეგ სახეში [3]:

$$\Delta P_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (Q_j + Q_{j,j})(Q_k + Q_{k,j}) \cdot R_{jk} \quad (3.5)$$

შეზღუდვის განტოლების სახით გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის განტოლება [3]:

$$W = \left(\sum_{j=0}^m Q_{j,სადგ} + \sum_{j=m+1}^n Q_{j,j} + \sum \Delta Q_C \right) - \left(\sum Q_{მობძ} + \sum \Delta Q_X + \sum \Delta Q_{ფლ} \right) = 0$$

ხოლო შეზღუდვის უტოლობათა სახით კი გვაქვს: $Q_{j,სად.მინ} \leq Q_{j,სადგ} \leq Q_{j,სადგ.მაქს}$ სადაც $j = 0, 1, 2, \dots, m$; $Q_{j,j} > 0$ სადაც $j = m + 1, m + 2, \dots, n$;

შევადგინოთ ლაგრანჟის ფუნქცია [3]:

$$L = (E_b + \alpha_j) \sum_{j=m+1}^n K_{0,j} Q_{j,j} + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} \cdot T_0 C_0 \cdot \sum_{j=m+1}^n Q_{j,j} + \Delta P_Q \cdot \tau \cdot C_0 + \lambda \cdot [(\sum_{j=0}^m Q_{j,სადგ} + \sum_{j=m+1}^n Q_{j,j} + \sum \Delta Q_C) - (\sum Q_{\text{მობ}} + \sum \Delta Q_X + \sum \Delta Q_{\text{ფლ}})] \Rightarrow \min$$

გავაწარმოოთ L ფუნქცია საძიებელი $(Q_{j,სადგ}, Q_{j,j})$ ცვლადების მიხედვით და გავუტოლოთ ნულს. გენერაციის კვანძებისათვის $j = 0, 1, 2, \dots, m$ უნდა შევადგინოთ შემდეგი განტოლებათა სისტემა $\frac{\partial L}{\partial Q_{j,სადგ}} = 0$, შესაბამისად გვაქვს:

$$\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_{0,სადგ}} \tau \cdot C_0 + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_{j,სადგ}} \tau \cdot C_0 + \lambda = 0 \quad j = 0, 1, 2 \dots m$$

რადგანაც მახალანსებელი სადგურისთვის $\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_{0,სადგ}} = 0$, პირველი გამოსახულებიდან ვიღებთ, რომ $\lambda = 0$ და შესაბამისად გვაქვს: $\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_{j,სადგ}} = 0$.

დატვირთვის კვანძებისათვის $j = m + 1, m + 2, \dots, n$ უნდა შევადგინოთ შემდეგი განტოლებათა სისტემა $\frac{\partial L}{\partial Q_{j,j}} = 0$, შესაბამისად გვაქვს [3]:

$$\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_{j,j}} = - \frac{(E_b + \alpha_j) K_{0,j} + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} \cdot T_0 C_0}{\tau \cdot C_0}$$

(3.5) გამოსახულების გათვალისწინებით:

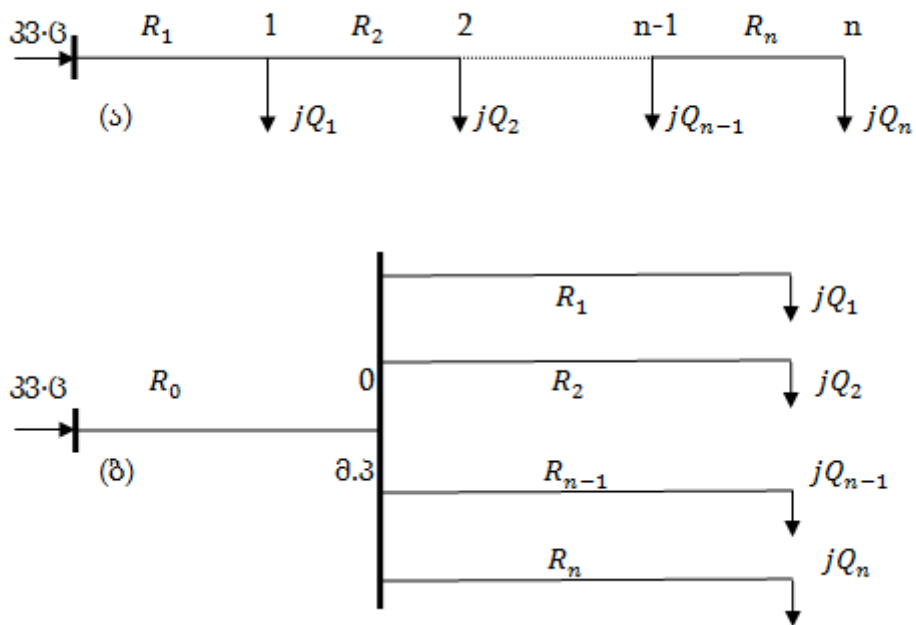
$$\frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_j} = \frac{2}{U_b^2} \sum_{k=1}^n (Q_k + Q_{k,j}) R_{jk}$$

საბოლოოდ გვაქვს [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n (Q_k + Q_{k,j}) R_{jk} = 0 \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \\ \sum_{k=1}^n (Q_k + Q_{k,j}) R_{jk} = \frac{A \cdot U_{\delta}^2}{2} \quad j = m + 1, m + 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (3.6)$$

$$\text{სადაც } A = -\frac{(E_{\delta} + \alpha_j) K_{0,j} + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} \cdot T_0 C_0}{\tau \cdot C_0}$$

(3.6) წარმოადგენს განტოლებათა სისტემას, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ როგორც ელექტროსადგურების ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) ოპტიმალური რეაქტიული გენერაციები, აგრეთვე მოხმარების კვანძებში ($j = m + 1, m + 2, \dots, n$) რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა ოპტიმალური მნიშვნელობები.



ნახ.3.2 მაგისტრალური (ა) და რადიალური (ბ) ქსელების შეერთების სქემები: კვ.ც- კვების ცენტრი; მ.პ - მანაწილებელი პუნქტი ინდექსით „0“

საშუალო ძაბვის (6÷35 კვ) ელექტრულ ქსელებში ფართოდ გავრცელებულია მაგისტრალური (ნახ.3.2,ა) და რადიალური (ნახ.3.2,ბ) შეერთების სქემები.

მაგისტრალურ ქსელში რაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის შედეგად ვღებულობთ, რომ მაგისტრალის i -ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად მიზანშეწონილია თუ ამ კვანძის მიმართ სრულდება პირობა [3; 23]:

$$\sum_{j=1}^i R'_j Q_j + \frac{AU_6^2}{2} > 0 \quad (3.7)$$

სადაც: $R'_j = \sum_{k=1}^j R_k$ - უბნების წინალობათა ჯამი კვების ცენტრიდან j -ურ კვანძამდე; R_k - k -ური უბნის აქტიური წინალობა.

(3.7) პირობის შესრულების შემთხვევაში $j > i$ კვანძებისთვის $Q_{j, \text{ობტ}} = Q_d$ და $j < i$ კვანძებისთვის $Q_{j, \text{ობტ}} = 0$, ხოლო თვითონ i კვანძისთვის გვაქვს [3; 30]:

$$Q_{j, \text{ობტ}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^i R_k} \cdot \left(\sum_{j=1}^i Q_j R'_j + \frac{AU_6^2}{2} \right)$$

რადიალურ ქსელში (ნახ.3.2,ბ) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი ზოგადი სახე [3; 23]:

$$R_0 \sum_{i=1}^n Q_{ji} + Q_{ji} R_i = R_0 \sum_{i=1}^n Q_{ji} + Q_i R_i + \frac{AU_6^2}{2}, \quad i = 1, 2 \dots n$$

კერძო შემთხვევაში, როცა $R_0 = 0$, ვღებულობთ [3; 23]:

$$Q_{ji} = Q_i + \frac{AU_6^2}{2R_i}$$

თუ ამ ფორმულით მიღებული სიდიდე უარყოფითია, ეს ნიშნავს რომ განსახილველ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია არაეფექტურია.

3.2. სისტემაწარმომქმნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს

შერჩევის კრიტერიუმი და მათემატიკური მოდელი

სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მაღალი და ზემალალი ძაბვის ხაზების მიერ გენერირდება დიდი სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრე. ამ ხაზების ინდუქციურ წინააღობებში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები დიდია სისტემის მუშაობის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში, ხოლო შედარებით მცირეა მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში. ამიტომ სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი ხასიათდება რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელოვანი სიჭარბით [5].

ელექტრომომხმარებლები, რომლებიც მიერთებულია მანაწილებელი ქსელების კვანძებში, ქსელიდან აქტიურ სიმძლავრესთან ერთად მოითხოვენ შესაბამისი სიდიდის რეაქტიულ სიმძლავრესაც. მეორეხრივ, რეაქტიული სიმძლავრის ტრანსპორტირება სისტემაწარმომქმნელი ქსელიდან მანაწილებელი ქსელების მომხმარებლებამდე იწვევს როგორც ძაბვის, ასევე აქტიური სიმძლავრის/ენერჯის დანაკარგებს, რაც ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით არამიზანშეწონილია [5; 35].

ელექტრული ქსელის ნებისმიერ i -ურ კვანძში მუშა ძაბვის გადახრის სიდიდე განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\Delta U_i = \frac{1}{U_0} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})$$

შესაბამისად, ძაბვის მუშა მნიშვნელობა i კვანძში [35]:

$$U_i = U_0 + \frac{1}{U_0} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \quad (3.8)$$

სადაც: U_0 – მბალანსებული კვანძის ძაბვა (ბაზისური ძაბვა), კვ; P_j, Q_j – კვანძური სიმძლავრე, მგვტ, მგვარ; R_{ij}, X_{ij} – კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინააღობები, ომი.

წარმოდგენილ გამოსახულებაში P_j, Q_j გენერაციის შემთხვევაში აიღება „+“ ნიშნით, ხოლო დატვირთვის შემთხვევაში კი „-“ ნიშნით.

რადგანაც სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ელემენტებისთვის დამახასიათებელია თანაფარდობა $X \gg R$, ქსელში ძაბვის გადახრის სიდიდეზე

(3.8) უფრო მეტ გავლენას ახდენს $Q_j X_{ij}$ შემდგენი. ამიტომ, ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვის რეგულირებისა და ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების მიზნით განიხილება Q_j კვანძური სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შესაბამისი შერჩევის გზით [35], [36].

გამომდინარე აქედან, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის პრინციპი მდგომარეობს მასში, რომ მაშუნტებელი რეაქტორები (რეაქტიული სიმძლავრის მიმღები) დაყენებული უნდა იქნეს სისტემაწარმომქმნელი ქსელის კვანძებში ამ ქსელში არსებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზნით, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროები კი დაყენებული უნდა იქნეს მანაწილებელი ქსელის კვანძებში, რათა ქსელში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების მიზნით მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის მიწოდება განხორციელდეს შედარებით უფრო ახლო მდებარე კვანძიდან.

რაიმე დამატებითი ღონისძიებების გატარებამდე ქსელის კვანძებში ძაბვები განისაზღვრება (3.8) გამოსახულებით, ხოლო კვანძებში ძაბვის საჭირო (მოთხოვნილი) ღონის უზრუნველყოფის მიზნით რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების შემდეგ [35]:

$$U_0 + \frac{1}{U_{\delta}} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + (Q_j + Q_{\delta j}) X_{ij}) = U_{i, მოთ.} \quad (3.9)$$

სადაც: $Q_{\delta j}$ – ქსელის j კვანძში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე, მგვარ; $U_{i, მოთ.}$ – სისტემაწარმომქმნელი ქსელის i კვანძში ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე.

მიღებულია, რომ ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ($U_{\delta} \geq 500$ კვ) კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $\pm(2 \div 3)\%$ -ზე მეტად. ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე კი ძაბვის დასაშვები გადახრის ზღვრულ მნიშვნელობებს წარმოადგენს, იმის მიხედვით თუ რომელ მხრიდან დაირღვა უტოლობა მარჯვნიდან თუ მარცნიდან, შესაბამისად:

$$(0,97 \div 0,98)U_{\delta} = U_{i, მოთ.} \quad \text{ან} \quad (1,02 \div 1,03)U_{\delta} = U_{i, მოთ.}$$

თუ კი (3.9)-ს გამოვაკლებთ (3.8), მივიღებთ [35]:

$$\sum_{j=1}^n Q_{kj} X_{ij} = U_{\text{წ}} \cdot (U_{i,\text{მოთხ}} - U_i) \quad (3.10)$$

(3.10) გამოსახულება წარმოადგენს სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრის შერჩევის მათემატიკურ მოდელს, რომლის კრიტერიუმია ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე ამ კვანძში.

რადგანაც ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობებისთვის დამახასიათებელია თანაფარდობა $X_{ii} \geq X_{ij}$, ამიტომ i -ური კვანძის Q_i რეაქტიული სიმძლავრით გამოწვეული ძაბვის გადახრა j - ურ კვანძში არ აღემატება ძაბვის გადახრას თვით i - ურ კვანძში შესაბამისად ვწერთ:

$$\frac{Q_i X_{ij}}{U_{\text{წ}}} \leq \frac{Q_i X_{ii}}{U_{\text{წ}}} \quad (3.11)$$

ქსელის ამა თუ იმ რეჟიმში ყოველთვის არის, ერთი მხრივ უდიდესი მუშა ძაბვის მქონე i კვანძი და, მეორე მხრივ უმცირესი ძაბვის მქონე j კვანძი. თუ ეს ძაბვები თავისი სიდიდით გამოსულია შესაბამის დასაშვებ ზღვრულ მნიშვნელობებს გარეთ:

$$U_{i,\text{უდიდ}} > U_{i,\text{დას.მაქს}} \text{ და } U_{j,\text{უმც}} < U_{j,\text{დას.მინ}} \quad (3.12)$$

მაშინ დაისმება ქსელში ძაბვის რეგულირების ამოცანა, რაც უნდა განხორციელდეს შესაბამის კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების გზით, ეს ყოველივე ჩაიწერება შემდეგ სახეში [35]:

$$Q_{ji} X_{ii} + Q_{kj} X_{ij} = (U_{\text{დას.მაქს}} - U_i) \cdot U_{\text{წ}} \quad (3.13)$$

$$Q_{ji} X_{ji} + Q_{kj} X_{jj} = (U_{\text{დას.მინ}} - U_j) \cdot U_{\text{წ}}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით მხოლოდ i და j კვანძებში დავადგენთ მაკომპენსირებელი დანადგარების Q_{ji} და Q_{kj} სიმძლავრეს. ამასთან Q_{ji} იქნება უარყოფითი ნიშნით, რაც ნიშნავს იმას, რომ i კვანძში უნდა დავაყენოთ მაშუნტებელი რეაქტორი (რადგანაც აქ ძაბვა უდიდეს დასაშვებზე მეტია, რაც გამოწვეულია ამ კვანძის ჭარბი გენერაციით), ხოლო Q_{kj} იქნება დადებითი ნიშნით, რაც ნიშნავს იმას, რომ j კვანძში უნდა დავაყენოთ რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო (რადგანაც აქ ძაბვა უმცირეს დასაშვებზე ნაკლებია, რაც გამოწვეულია ამ კვანძის დიდი რეაქტიული დატვირთვით).

ამ ღონისძიების გატარების შემდეგ i და j კვანძებში ძაბვები მკაცრად შესაბამისი დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობების ტოლი იქნება. (3.11) უტოლობის თანახმად, ქსელის სხვა კვანძებში ძაბვები უფრო ნაკლები სიდიდით შეიცვლება და არ არის გამორიცხული, რომ ამ ღონისძიების გატარების შემდეგ შეიძლება აღმოჩნდეს რომელიმე k და/ან m კვანძი, სადაც ძაბვა დასაშვებ ზღვარს გარეთ იწებება. ამ შემთხვევაში სისტემაწარმომქმნელ ქსელში ძაბვის რეგულირების მათემატიკური მოდელი უნდა ჩავწეროთ ყველა ამ კვანძისთვის (თავდაპირველად შერჩეული i, j კვანძი და შემდგომ გამოვლენილი k და/ან m კვანძი) [35]:

$$Q_{ji}X_{ii} + Q_{jj}X_{ij} + Q_{jk}X_{ik} + Q_{jm}X_{im} = (U_{\text{დას.მაქს}} - U_i) \cdot U_{\text{ფ}}$$

$$Q_{ji}X_{ji} + Q_{jj}X_{jj} + Q_{jk}X_{jk} + Q_{jm}X_{jm} = (U_{\text{დას.მინ}} - U_j) \cdot U_{\text{ფ}}$$

$$Q_{ji}X_{ki} + Q_{jj}X_{kj} + Q_{jk}X_{kk} + Q_{jm}X_{km} = (U_{\text{დას.მაქს}} - U_k) \cdot U_{\text{ფ}}$$

$$Q_{ji}X_{mi} + Q_{jj}X_{mj} + Q_{jk}X_{mk} + Q_{jm}X_{mm} = (U_{\text{დას.მინ}} - U_m) \cdot U_{\text{ფ}}$$

მოსალოდნელია, რომ ამ ეტაპზე მთელ ქსელში ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით დასმული მიზანი მიღწეული იქნება.

ამრიგად, გვაქვს სისტემაწარმომქმნელი ქსელის კვანძებში ძაბვის მართვის მათემატიკური მოდელი, რომლის გამოყენების მეთოდოლოგია შემდეგია [35]:

1. ქსელის რეჟიმის გაანგარიშება და კვანძების მუშა ძაბვების ანალიზი;
2. იმ კვანძების გამოვლენა, სადაც მუშა ძაბვები სიდიდით გამოსულია შესაბამის დასაშვებ ზღვრულ მნიშვნელობას გარეთ (ადგილი აქვს (3.12) სახის უტოლობას) და:

- 2.1. თუ აღმოჩნდა, რომ (3.12) სახის უტოლობა სრულდება მხოლოდ ერთ მხარეს რამდენიმე კვანძისთვის, მაშინ (3.13) სახის განტოლებას ჩავწერთ იმ ერთი კვანძისთვის, სადაც მუშა ძაბვა ყველაზე დაბალია/მაღალია. იმ შემთხვევაში, თუ რომელიმე ორ კვანძში ძაბვა ერთნაირი სიდიდით დაბალია/მაღალია, მაშინ (3.13) სახის განტოლებას ჩავწერთ იმ ერთი კვანძისთვის, რომლის საკუთარი რეაქტიული წინაღობა უფრო დიდია. ამოვხსნით ამ განტოლებას და გადავამოწმებთ მუშა ძაბვებს კვანძებში: თუ ყველა კვანძის ძაბვა ნორმის ფარგლებშია, მაშინ ამოცანის ამოხსნა დამთავრებულია. იმ შემთხვევაში, თუ მივიღეთ რომ ქსელის სხვა რომელიმე კვანძში ძაბვა გაცდა თავის დასაშვებ ზღვარს, მაშინ (3.13) სახის

განოტლებათა სისტემას ჩავწერთ თავიდან მონიშნული და ახლად გამოვლენილი კვანძებისთვის და ამოვხსნით. გადავამოწმებთ მუშა ძაბვებს და საჭიროების შემთხვევაში გავაგრძელებთ ამოცანის გადაწყვეტის პროცედურას მიზნის მიღწევამდე.

2.2. თუ აღმოჩნდა, რომ (3.12) სახის უტოლობა სრულდება რამდენიმე კვანძისთვის და, ამასთან, სხვადასხვა მხარეს, მაშინ (3.13) სახის განოტლებათა სისტემას ჩავწერთ იმ ორი კვანძისთვის, სადაც სხვადასხვა მხარესაა გადახრები უდიდესი. ამასთან ორი ერთნაირი ერთ მხარეს უდიდესი გადახრის მუშა ძაბვის მქონე კვანძიდან ვირჩევთ მას, რომლის საკუთარი რეაქტიული წინაღობა უფრო დიდია. ამოხსნის შემდეგ გადავამოწმებთ ძაბვებს კვანძებში და თუ ყველა კვანძის ძაბვა ნორმის ფარგლებშია, მაშინ ამოცანის ამოხსნა დამთავრებულია. იმ შემთხვევაში თუ სხვა რომელიმე კვანძში (ან კვანძებში) ძაბვა მაინც ზღვარს გარეთაა ერთ ან სხვადასხვა მხარეს, მაშინ განოტლებათა სისტემას ჩავწერთ შესაბამისი სამი ან ოთხი (ორი თავდაპირველად მონიშნული და ერთი/ორი ახლად გამოვლენილი) კვანძისთვის და ამოვხსნით. მუშა ძაბვებს გადავამოწმებთ და საჭიროების შემთხვევაში გავაგრძელებთ ამოცანის ამოხსნის პროცედურას მიზნის მიღწევამდე.

როგორც ავღნიშნეთ, j კვანძში, სადაც $U_{j,უმც} < U_{j,დას.მინ} Q_{kj}$ დადებითი ნიშნისაა. ამ შემთხვევაში, ქსელში ძაბვის ამალღებასთან ერთად მივალწევთ ენერჯის დანაკარგების შემცირებას, თუ Q_{kj} ჯამური სიმძლავრის დამატებით წყაროებს დავაყენებთ მოცემული ქსელის j კვანძში მიერთებული უფრო დაბალი დონის ქსელის კვანძებში ანუ დაისმება ამოცანა, მოცემული Q_{kj} ჯამური რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დაბალი დონის ქსელის კვანძებს შორის ოპტიმალური გადანაწილების შესახებ. ამ ამოცანის მიზნის ფუნქცია იქნება მეურნეობის დაყვანილი ხარჯები, ანუ ამ ამოცანის ამოხსნისას გამოყენებული იქნება ეკონომიკურობის კრიტერიუმი [37].

ამრიგად, ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და განთავსების ადგილის ოპტიმალური შერჩევის თვალსაზრისით აქ წარმოდგენილ მათემატიკურ მოდელს ((3.10) სახის

განტოლებათა სისტემა) საფუძვლად უდევს სისტემური მიდგომის პრინციპი და ურთიერთ შეთანხმებულ კონტექსტში შეუძლია ერთდროულად ამოხსნას ორი ამოცანა სხვადასხვა კრიტერიუმის მიხედვით. კერძოდ, ერთისთვის განიხილება ელექტროენერჯის ხარისხის კრიტერიუმი, ხოლო მეორესთვის ეკონომიკურობის კრიტერიუმი [35], [37].

[36] სტატიაში განხილული და დამტკიცებულია ფაქტი, რომ სისტემაწარმოქმნელ ქსელში მიღებული (3.13) მათემატიკური მოდელის მიხედვით შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი ქსელში ტექნიკური სარგებლის (მაბვის რეგულირება კვანძებში) გარდა გვაძლევს ეკონომიკურ შედეგს, კერძოდ ამცირებს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს.

მიღებული (3.13) მათემატიკური მოდელის საილუსტრაციოდ განხილულია ვირტუალური ელექტრული ქსელი (ჩვენს მიერ შედგენილი), სადაც ჩანს თუ როგორ მუშაობს აღნიშნული მოდელი. ეს ამოცანა მოცემულია დანართ 1-ში (იხ.დ.1, ამოცანა №1).

3.3. სისტემაწარმოქმნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური გადანაწილება მანაწილებელ ქსელში

ელექტროსისტემის მაქსიმალურ და მასთან მიახლოებულ რეჟიმებში სისტემაწარმოქმნელი ქსელის ზოგიერთ კვანძში, სადაც მიერთებულია შედარებით დიდი ჯამური დატვირთვის მქონე მანაწილებელი ქსელი, მუშა ძაბვა მნიშვნელოვნად დაბალია და, შესაბამისად, დაბალია ძაბვები აქ მიერთებული დაბალი დონის მანაწილებელი ქსელის კვანძებშიც.

სისტემაწარმოქმნელი გადაცემის ქსელის აღნიშნულ კვანძში მუშა ძაბვის ამაღლების მიზნით რეკომენდირებულია ამ კვანძში დაიდგას რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, რომლის Q_r სიმძლავრე განისაზღვრა ამ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით [35].

მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების მიზნით უფრო ეფექტურია რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ჯამური Q_r

სიმძლავრე გადანაწილებული იქნეს უფრო დაბალი დონის მანაწილებელი ქსელის დატვირთვის კვანძებში. ეს გადანაწილება მიზანშეწონილია განხორციელდეს ისე, რომ მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების ეფექტი იყოს მაქსიმალური [37].

ამრიგად, გვაქვს ამოცანა: „მკვებავი ქსელის მოცემული კვანძის Q_p რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური გადანაწილება მასთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის დატვირთვის კვანძებს შორის“.

ამ ამოცანის საწყის მონაცემებს წარმოადგენს [37]:

- ✓ Q_p გადასანაწილებელი რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ;
- ✓ მანაწილებელი ქსელის კვანძური სიმძლავრეები Q_i ,მგვარ, აქ $i = 1, 2, \dots, n$ სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძთან მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებია;
- ✓ მანაწილებელი ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ აქტიური წინაღობები R_{ij} ;

ამ ამოცანის ოპტიმიზაციის განტოლებებია [37]:

- ❖ *მიზნის ფუნქცია* - განსახილველ მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაცია:

$$\Delta P_Q \Rightarrow \min;$$

- ❖ *შეზღუდვის განტოლება*:

$$W = (Q_{p1} + Q_{p2} + \dots + Q_{pi} + \dots + Q_{pn}) - Q_p = 0 ;$$

- ❖ *შეზღუდვის უტოლობა* დატვირთვის კვანძების მიმართ:

$$0 \leq Q_{pi} \leq -Q_i \quad (3.14)$$

ქსელში რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოითვლება გამოსახულებით (იხ.გ 2.2.1) [3]:

$$\Delta P_Q = \frac{1}{U_b^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_i Q_j R_{ij}$$

კვანძებში Q_p სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დაყენების შემთხვევაში დასმული ამოცანის მიზნის ფუნქცია ჩაიწერება შემდეგ სახეში [3]:

$$\Delta P'_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Q_i + Q_{ji}) (Q_j + Q_{ji}) R_{ij}$$

❖ შევადგინოთ ლაგრანჟის ფუნქცია (ოპტიმიზაციის განტოლება) [38]:

$$L = \Delta P'_Q + \lambda W \Rightarrow \min$$

სადაც: λ - ლაგრანჟის განუსაზღვრელი მამრავლი.

დატვირთვის კვანძებში საძიებელი Q_{ji} სიმძლავრეები განისაზღვრება შემდეგი პირობიდან [38]:

$$\frac{\partial}{\partial Q_{ji}} \Delta P'_Q + \lambda \frac{\partial}{\partial Q_{ji}} W = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ანუ

$$\frac{2}{U_b^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{ji}) R_{ij} + \lambda = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

მივიღეთ n რაოდენობის განტოლება n საძიებელი Q_{ji} ცვლადებით და ერთი λ განუსაზღვრელი მამრავლით. განტოლებათა ამ სისტემასთან ერთად განვიხილავთ კავშირის განტოლებას და გვაქვს $n + 1$ განტოლებიანი სისტემა $n + 1$ საძიებელი სიდიდით [37]:

$$\begin{cases} \frac{2}{U_b^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{ji}) R_{ij} + \lambda = 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ (Q_{j1} + Q_{j2} + \dots + Q_{ji} + \dots + Q_{jn}) - Q_j = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

ზემოთ მიღებულ (3.15) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლება შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად [37]:

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} Q_{ji} + \lambda \cdot \frac{U_b^2}{2} = - \sum_{j=1}^n R_{ij} Q_j, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ეს გამოსახულება შესაძლებელია ჩავწეროთ მატრიცულ ფორმაში შემდეგნაირად [37]:

$$|R| \cdot |Q_{ji}| + \frac{U_b^2}{2} |\lambda| = -|R| \cdot |Q_j|, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

სადაც: $|R| = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}$ - კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ

წინააღმდეგობათა მატრიცა;

$$|Q_{j}| = \begin{vmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ \vdots \\ Q_{jn} \end{vmatrix} - \text{საძიებელ ცვლადთა სვეტ-მატრიცა}; \quad |\lambda| = \begin{vmatrix} \lambda \\ \lambda \\ \vdots \\ \lambda \end{vmatrix} - n \times 1\text{-ზე}$$

ლაგრანჟის განუსაზღვრელ მამრავლთა სვეტ-მატრიცა;

$$|Q_j| = \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{vmatrix} - \text{მანაწილებელი ქსელის კვანძთა რეაქტიული კვანძური}$$

სიმბლავრების სვეტ-მატრიცა;

ამრიგად მიღებული მათემატიკური მოდელი (3.15) მატრიცულ ფორმაში გახლავთ [37]:

$$\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & \frac{U_b^2}{2} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & \frac{U_b^2}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & \frac{U_b^2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ \vdots \\ Q_{jn} \\ \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ \vdots \\ -Q_n \\ Q_j \end{vmatrix} \quad (3.16)$$

გავითვალისწინოთ, რომ როცა მანაწილებელ ქსელში გვაქვს გენერაციის m კვანძი Q_m გენერაციით, მაშინ განტოლებათა განსახილველ სისტემაში მივიღოთ საძიებელი ცვლადი $Q_{jm} = 0$ და (3.15) განტოლებათა სისტემიდან ამოვიღოთ m ნომრის შესაბამისი სტრიქონი და სვეტი. განტოლებათა ამ სისტემის ეტაპობრივი ამოხსნა უნდა გაგრძელდეს მანამ, სანამ დატვირთვის კვანძების მიმართ ყველა ცვლადი არ დააკმაყოფილებს შეზღუდვის (3.14) უტოლობებს [37].

მიღებული (3.16) მათემატიკური მოდელის საილუსტრაციოდ განხილულია ვირტუალური ელექტრული ქსელი (ჩვენს მიერ შედგენილი), სადაც ჩანს თუ როგორ მუშაობს აღნიშნული მათემატიკური მოდელი. ეს ამოცანა მოცემულია დანართ 1-ში (იხ.დ.1 ამოცანა №2).

დასკვნა III თავის მიმართ

1. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მეთოდებს შორის ყველაზე უფრო ზუსტ მეთოდს წარმოადგენს სისტემური მიდგომის მეთოდი, რაც გულისხმობს ელექტროსისტემის ყველა ძაბვის საფეხურის ქსელის ყველა ელემენტისა და ყველა სამომხმარებლო კვანძის გათვალისწინებას. ეს მეთოდი, ფაქტიურად, უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს, მაგრამ ერთი მხრივ ხასიათდება დიდი განზომილებით (ელექტროსისტემის ელემენტებისა და სამომხმარებლო კვანძების დიდი რიცხვი) და მეორე მხრივ, საწყისი ინფორმაცია, შედარებით, დაბალი ხარისხისაა.
2. მიღებულია სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომელიც შედგენილია ქსელის კვანძების რეზულტატიური გენერაცია/დატვირთვებისა და ამ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ წინააღმდეგობათა გამოყენებით. ამ მოდელის საფუძველს წარმოადგენს რეალურ სახასიათო რეჟიმში მუშა ძაბვის გადახრის სიდიდე მოცემულ კვანძში, ხოლო კრიტერიუმს კი ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე განსახილველ კვანძში.
3. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევისათვის მიღებული მათემატიკური მოდელი მეტად მოსახერხებელი და ეფექტურია. ის საშუალებას გვაძლევს მუშა ძაბვების ანალიზის შემდგომ შევირჩიოთ ყველაზე კრიტიკული კვანძები (კვანძი) და მათ მიმართ შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა და მივიღოთ აღნიშნულ კვანძებში საჭირო მაკომპენსირებელ დანადგართა მნიშვნელობები. მოდელი ითვალისწინებს სისტემაწარმომქნელი ქსელის თითოეულ კვანძთა ურთიერთგავლენას და წარმატებით შეუძლია მოხსნას ძაბვათა პრობლემები უკლებლივ ყველა კვანძში.
4. ელექტროსისტემის მაქსიმალურ და მასთან მიახლოებულ რეჟიმებში სისტემაწარმომქნელი ქსელის ზოგიერთ კვანძში, სადაც მიერთებულია შედარებით დიდი ჯამური დატვირთვის მქონე მანაწილებელი ქსელი შესაძლოა მოითხოვებოდეს რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის მქონე

მაკომპენსირებელი დანადგარის განთავსება, რომლის კრიტერიუმად მიღებულია ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე ამ კვანძში. ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით, კერძოდ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაციის კუთხით, მიზანშეწონილია, რომ აღნიშნული სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდეს აღნიშნულ კვანძთან მიერთებულ უფრო დაბალი დონის ძაბვის მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.

5. მიღებულია სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძისათვის ძაბვის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული Q_p რეაქტიული სიმძლავრის მასთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ოპტიმალურად გადანაწილების (ეკონომიკურობის კრიტერიუმის მიხედვით) მათემატიკური მოდელი.

თავი 4. საქართველოს ელექტროსისტემა

4.1. საქართველოს ელექტროსისტემის არსებული მდგომარეობა

საქართველოს გადაცემის ქსელს ძირითადად აქვს გრძივი განლაგება დასავლეთიდან აღმოსავლეთის მიმართულებით. ქსელის 500 კვ საკვანძო ქვესადგურებია: „ენგური“, „ჯვარი“, „ზესტაფონი“, „ახლაციხე“, „ქსანი“, „გარდაბანი“ და „მარნეული“. საქართველოს გადაცემის ქსელი პირობითად შეიძლება დაყოფილ იქნას დასავლეთ და აღმოსავლეთ რეგიონებად, რომელთა გამყოფ კვანძად პირობითად შეგვიძლია მივიჩნიოთ ქ/ს „ზესტაფონი“.

მონაცემები გენერაციის შესახებ - საქართველოს ენერგოსისტემა ხასიათდება ელექტრული ენერჯის მოხმარებისა და გენერაციის სეზონური ასიმეტრიულობით, რაც გულისხმობს მოხმარების შედარებით დაბალ და გენერაციის მაღალ მაჩვენებელს ზაფხულში და მოხმარების მაღალ და გენერაციის დაბალ მაჩვენებელს ზამთარში. აღნიშნული საშუალებას აძლევს ქვეყანას, განახორციელოს ელექტროენერჯის ექსპორტი ზაფხულში. ზამთრის პერიოდში წყლის სიმცირის გამო, საქართველოს ენერგომომარაგებაში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია თბოგენერაციას, რომელიც მთლიანი ელექტროენერჯის წარმოების 28%-ს შეადგენს ზამთარში, თუმცა ეს მაჩვენებელი 1%-ზე ნაკლებია ზაფხულში [39].

ქვეყანაში წარმოებული ელექტროენერჯის მთლიანი მოცულობის ერთ მესამედს გამოიმუშავებს უმსხვილესი ჰიდროელექტროსადგური „ენგური“ („ენგურჰესი“), რომლის დადგმული სიმძლავრე შეადგენს 1300 მგვტ-ს. სიდიდით მეორე ჰესია „ვარდნილის კასკადი“. „ენგურჰესი“ და „ვარდნილის კასკადი“, სხვა შედარებით მცირე ჰესებთან ერთად წარმოადგენენ მარეგულირებელ ჰესებს და უზრუნველყოფენ დაახლოებით 1990 მგვტ სიმძლავრეს. 2018 წლის მონაცემებით დადგმული სიმძლავრის ჯამური მოცულობა ტოლია 4166 მგვტ-ის, რომელიც მოიცავს ჰესების დადგმულ სიმძლავრეს 3220 მგვტ-ს და თბოელექტროსადგურების მიერ დადგმულ სიმძლავრეს 925 მგვტ. ნავარაუდებია, რომ 2019-2029 წლებში არსებულ დადგმულ სიმძლავრეს დაემატება ახალი ჰესების დამატებითი სიმძლავრე, რაც უზრუნველყოფს ჯამური დადგმული სიმძლავრის

ზრდას 2021 წლისათვის არსებული 4166 მგვტ-დან 4898 მგვტ-მდე, 2023 წლისათვის 6162 მგვტ-მდე და 2029 წლისათვის 8767 მგვტ-მდე [39].

მეზობელ ქვეყნებთან ელექტროენერჯის მიმოცვლის შესაძლებლობები - დღეისთვის, ქვეყნის ენერგოსისტემას სისტემათაშორისი ელექტრული კავშირები აქვს: რუსეთთან 500 კვ ძაბვის ხაზით „კავკასიონი“ და 220 კვ ძაბვის ხაზით „სალხინო“; აზერბაიჯანთან 500 კვ ძაბვის ხაზით „მუხრანის ველი“ და 330 კვ ძაბვის ხაზით „გარდაბანი“; თურქეთთან 400 კვ ძაბვის ხაზით „მესხეთი“ და 220 კვ ძაბვის ხაზით „აჭარა“; სომხეთთან 220 კვ ძაბვის ხაზით „ალავერდი“. დამთავრების ფაზაშია რუსეთთან დამაკავშირებელი კიდევ ერთი 500 კვ ძაბვის ხაზი „ქსანი-ყაზბეგი-ვლადიკავკაზი“, რომლის საშუალებით საქართველო-სომხეთის გავლით განხორციელდება დიდი მოცულობის ელექტროენერჯის ტრანზიტი რუსეთიდან ირანში და პირიქით. ამ ამოცანის წარმატებით შესრულების მიზნით დაგეგმილია აიგოს საქართველოსა და სომხეთის ელექტროსისტემების დამაკავშირებელი ზემდაღნიშნული ძაბვის ხაზი „მარნეული-აირუმი“. ელექტროენერჯის მიმოცვლა ხორციელდება: საქართველოდან რუსეთში, თურქეთში, აზერბაიჯანში, სომხეთში და პირიქით; ასევე რუსეთიდან თურქეთში, აზერბაიჯანიდან თურქეთში; ამ ამოცანათა შესრულებას ემსახურება საქართველოს გადამცემი ქსელის სატრანზიტო ხაზები, თუმცა მათი გამტარუნარიანობა შეზღუდულია, როგორც ქვეყნის ენერგოსისტემის მუშაობის დასაშვები რეჟიმული პარამეტრებით, ასევე აღნიშნული ხაზების გამტარუნარიანობით (იხ.ცხრ 4.1) [39].

სადაც: S - სინქრონული მუშაობისას; I - კუნძულოვან რეჟიმში მუშაობისას; B - მუდმივი დენის ჩანართით მუშაობისას; R - რეზერვში.

„ცხრილი 4.1.“ მეზობელ ენერგოსისტემებთან სიმძლავრის მიმოცვლის შესაძლებლობა

ქვეყანა	კავშირის ეგზ, მარკა	ნომ ძაბვა (კვ)	მიმოცვლა	ზაფხული (მგვტ)	ზამთარი (მგვტ)	რეჟიმი
	„კავკასიონი“	500	ექსპორტი	570	650	S
	AC-3x300		იმპორტი	570	650	S

რუსეთი	„სტეფანწინდა“ AC-3x300 ²⁰²³	500	ექსპორტი	1000	1000	S
			იმპორტი	1000	1000	S
	„სალხინო“ AC-400	220	ექსპორტი	50	50	I
			იმპორტი	150	150	I
აზერბაიჯანი	“მუხრანისველი“ AC-3x300	500	ექსპორტი	630	710	S
			იმპორტი	630	710	S
	„გარდაბანი“ AC-480	330	ექსპორტი	210	240	S
			იმპორტი	210	240	S
სომხეთი	“ალავერდი“ AC-300	220	ექსპორტი	150/100	150/100	S/I
			იმპორტი	150/100	150/100	S/I
	„მარნეული“ AC-3x300 ²⁰²⁵	400	ექსპორტი	700	700	B
			იმპორტი	700	700	B
თურქეთი	„მესხთი“ AC-3x500	400	ექსპორტი	700	700	B
			იმპორტი	700	700	B
	„ტაო“ AC-3x500 ²⁰²²	400	ექსპორტი	1050	1050	B
			იმპორტი	1050	1050	B
	ბათუმი - მურატლი ²⁰²⁵	154	ექსპორტი	350	350	B
			იმპორტი	350	350	B
	„აჭარა“ AC - 400	220	ექსპორტი	150/150	150/150	I/R
			იმპორტი	150/150	150/150	I/R

ექსტრემალური გადაღინებები და სუსტი წერტილები - როგორც აღნიშნულ იყო საქართველოს ძირითადი გენერაციის წყაროები თავმოყრილია ენგურის აუზში, ენგურჰესის და ვარდნილჰესის სახით. ზაფხულის წყალუბვობის პერიოდში (მაისი-ივლისი) ამ სადგურების ჯამური გენერაციაა დაახლოებით 1250 მგვტ. ენგურჰესი-ვარდნილჰესის სიმძლავრის ნაწილი (250) მგვტ მიდის აფხაზეთისკენ 220 კვ ეგზ კოლხიდა 3-ით (ვარდნილი-ტყვარჩელი), ნაწილი (122 მგვტ) ხმარდება ზუგდიდის, მენჯისა და ხორგას კვებას. თითქმის 865 მგვტ კი 500 კვ ეგზ „იმერეთით“ და 132 მგვტ ეგზ იმერეთის პარალელური 220 კვ მაგისტრალით მიდის აღმოსავლეთით და ნაწილდება ახალციხიდან თურქეთში ექსპორტზე (600 მგვტ) და თბილისი-რუსთავის კვანძების კვებაზე. რაც შეეხება წყალტუბო-ქუთაისის (100 მგვტ) და ზესტაფონის (250 მგვტ) მძლავრ მოხმარების ცენტრებს,

ისინი ერთგვარად დაბალანსებულია აქ არსებული გენერაციით (ქუთაისი-წყალტუბო 320 მგვტ და ზესტაფონი 30 მგვტ). ამრიგად, დაახლოებით 865 მგვტ სიმძლავრე შეიძლება გადმოდინებულ იქნას ეგზ „იმერეთზე“ აღმოსავლეთით. ამ გადმოდინებიდან დაახლოებით 407 მგვტ სჭირდება თბილისი-რუსთავისა და ხაშური-გორი მოხმარების კვანძების კვებას. დანარჩენი 590 მგვტ სიმძლავრე შესაძლებელია გადადინებულ იქნას თურქეთში. ამ პერიოდში ეგზ „იმერეთზე“ 865 მგვტ-ზე მეტის გატარება ხანგრძლივად მიზანშეუწონელია (მისი შეზღუდული გამტარუნარიანობის გამო და მდგრადობის პრობლემების აცილებისთვის). აღსანიშნავია, რომ ეგზ „იმერეთის“ ასეთი დატვირთულობისას მისი გამორთვა გამოიწვევს ენგური-ზესტაფონის დამაკავშირებელი 220 კვ მაგისტრალის გადატვირთვას და ჩაქრობას. აღნიშნულის თავიდან აცილება ხდება ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის (ასა) საშუალებით, რომელიც თიშავს გენერაციას ენგურზე და დატვირთვას/ექსპორტს თბილისი-რუსთავში/ახალციხეში ისე, რომ ამ მაგისტრალზე, „იმერეთის“ გამორთვის შემდეგ გადმოდინება დარჩეს დასაშვებ ზღვრებში. ამრიგად, საჭიროა აღმოსავლეთისკენ გამტარუნარიანობის გაზრდა, 500 კვ ეგზ „იმერეთის“ პარალელური 500 კვ შტოს აშენებით. რაც უზრუნველყოფს ავტომატიკის მიერ გენერაციის და დატვირთვის გამორთვის საჭიროების აცილებას, ანუ აუცილებელია ქსელის იმდაგვარად განვითარება, რომ შესრულებული იქნას ნებისმიერ რეჟიმში N-1 კრიტერიუმი [39].

საქართველოს ელექტროენერგეტიკული სისტემის ძირითადი სუსტი და პრობლემატური ელემენტებია: 500 კვ ეგზ „იმერეთი“; 500 კვ ეგზ „ზეკარი“; 500 კვ ეგზ „კავკასიონი“; 400 კვ ეგზ „მესხეთი“; 220 კვ ეგზ „ალავერდი“; აჭარა-აფხაზეთი რეგიონის კვების საიმედოობა; კახეთის რეგიონის კვების საიმედოობა; შიდა ქართლის ქსელის საიმედოობა; 220 კვ ეგზ „კოლხიდა-3“; ენგურ-ჰესის აგრეგატები, ბლოკი №9.

500 კვ ეგზ „იმერეთი“ ენგურჰესს აერთებს ზესტაფონის კვანძთან, სისტემის დასავლეთ რეგიონში ამ ხაზის პარალელური 500 კვ ეგზ არ არსებობს და მისი ავარიული ამორთვისას ადგილი აქვს ამ რეგიონის 220 კვ მაგისტრალის „ვარდნილი-ზუგდიდი-მენჯი-ქუთაისი-ზესტაფონი“ გადატვირთვას, აღნიშნული

მაგისტრალი სრულად ვერ არეზერვებს ეგზ „იმერეთს“. მაშასადამე, 500 კვ ეგზ „იმერეთის“ პარალელური 500 კვ ეგზ-ს არარსებობა წარმოადგენს დასავლეთ და მთლიანად საქართველოს ელექტროსისტემის ყველაზე სუსტ ადგილს. გარდა ამისა, 500 კვ ეგზ „ზეკარის“ (ზესტაფონი-ახალციხე) ავარიული ამორთვისას, ზაფხულში წყალუხვობის რეჟიმში არ იქნება შესაძლებელი რუსეთიდან თურქეთში სიმძლავრის ტრანზიტი. მართალია 500 კვ ეგზ „ზეკარი“ დარეზერვებულია ეგზ-ებით: „ქართლი2 -ვარძია“, მაგრამ ამ ორი ხაზის ჯამი 325 კმ-მდეა, რის შედეგადაც ამ ხაზზე დიდი სიმძლავრის გადადინებისას „ზეკარის“ გამორთვის შემთხვევაში ვერ ხდება მისი დარეზერვება. პროექტი „ჯვარი-წყალტუბო-ახალციხე“ გადაჭრის ამ პრობლემებს და სრულად დაარეზერვებს 500 კვ ეგზ „იმერეთსა“ და „ზეკარს“ და მათი გამორთვის შემდეგ აღარ იქნება საჭირო ასა-ს მოქმედება. აღნიშნული პროექტს აქვს სტრატეგიული მნიშვნელობა, ის მიმდინარეა და დასრულდება 2023 წელს [39].

ქ/ს „ბათუმის“ კვება ხორციელდება დიდი სიგრძის, შესაბამისად 97 და 94 კმ, 220 კვ ეგზ-ებით „პალიასტომი-1“ (მენჯი-ბათუმი) და „პალიასტომი-2“ (ხორგა-ბათუმი). ეს ხაზები წარმოადგენენ 220 კვ მაგისტრალის „ვარდნილი-ზუგდიდი-მენჯი“ პარალელურ შტოს. მათი დიდი სიგრძის გამო ადგილი აქვს ძაბვის პრობლემებს 220 კვ ქ/ს „ბათუმში“. ეს პრობლემა განსაკუთრებით იჩენს თავს, როდესაც ხორციელდება სიმძლავრის ექსპორტი ბათუმიდან ხოფასკენ (თურქეთი). ამასთან „პალიასტომი-1“-ის ან „პალიასტომი-2“-ის გამორთვისას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს 220 კვ ეგზ-ების „კოლხიდა-2ა“ და „კოლხიდა-2“ გადატვირთვას. (აღნიშნულ პრობლემას გადაჭრის პროექტ „ახალციხე-ბათუმის“ დასრულება) [39].

220 კვ ეგზ „კოლხიდა-3“, რომლითაც ძირითადად ხორციელდება სიმძლავრის ტრანზიტი ვარდნილჰესიდან აფხაზეთის მიმართულებით (250 მგვტ), წარმოადგენს საქართველოს დასავლეთ ნაწილის ერთ-ერთ პრობლემატურ ელემენტს, მისი პარალელური ხაზების არ არსებობის გამო.

500 კვ ეგზ „კავკასიონი“, რომელიც წარმოადგენს საქართველოსა და რუსეთის დამაკავშირებელ ძირითად ელემენტს, ასევე არის სისტემის სუსტი რგოლი. მისი მაღალი ნომინალური ძაბვის, დიდი სიგრძისა (405,5 კმ - ქ/ს „ჯვარში“ შეჭრამდე)

და ტრასის რთული რელიეფის (გადის კავკასიონის მთავარ ქედზე) გამო. მისი გამორთვის გამო რთულდება სისტემის მდგრადობა და ელექტროენერჯის ხარისხი (სიხშირე რეგულირდება ძირითადად რუსეთის სისტემის მიერ). ამ პრობლემას გადაჭრის პროექტი „ქსანი-სტეფანწმინდა-მოზდოკი“, რომელიც წარმოადგენს 500 კვ ეგხ „კავკასიონის“ დამარეზერვებელს და აამაღლებს საქართველოს ელექტროსისტემის მდგრადობას. ეს პროექტი ასევე გარკვეულწილად მოახდენს 500 კვ ეგხ „იმერეთის“ დარეზერვებას ჩრდილოეთ კავკასიის ქსელით, აღნიშნული პროექტი მიმდინარეა და დასრულდება 2023 წელს [39].

400 კვ ეგხ „მესხეთი“ - კავშირის ხაზი საქართველოსა და თურქეთს შორის. მართალია ამ ხაზის სიგრძე არ არის კრიტიკულად დიდი (150 კმ), მაგრამ იმის გათვალისწინებით, რომ მას მოუწევს 700 მგვტ სიმძლავრის გატარება, მისი ავარიული გამორთვა გამოიწვევს დიდი ნაჭარბის წარმოქმნას საქართველოს ენერგოსისტემაში. პროექტი 400 კვ ეგხ „ახალციხე-თორთუმი“ სრულად არეზერვებს 400 კვ ეგხ „მესხეთს“ (ახალციხე-ბორჩხა) და მისი გამორთვის შემთხვევაში აღარ წარმოიქმნება სიმძლავრის უბალანსობა საქართველოს გადამცემ ქსელში.

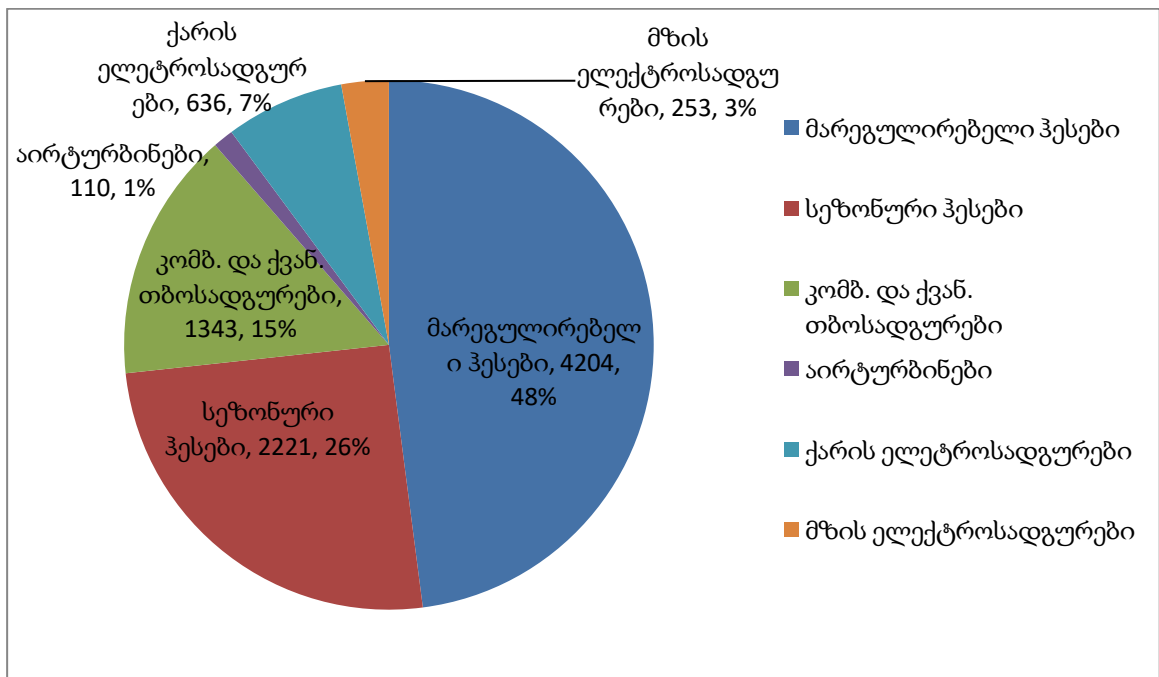
საქართველოს ელექტროსისტემის არსებული სისტემაწარმომქნელი ქსელი ($U_5 \geq 220$ კვ) ნაჩვენებია დანართ 2-ში.

4.2. საქართველოს ელექტროენერგეტიკული რესურსები და ქვეყნის ელექტრული სისტემის განვითარების პერსპექტივა

საქართველო მდიდარია განახლებადი ენერგეტიკული რესურსების თვალსაზრისით, მათ შორის ძირითადი ადგილი უკავია წყლის ენერგეტიკულ რესურსს. ამჟამად ენერგოსისტემის დადგმული სიმძლავრე 4166 მგვტ-ია, აქედან მარეგულირებელი ჰესების სიმძლავრეა 2381 მგვტ, მოდინებაზე მომუშავე ჰესების სიმძლავრე 839 მგვტ, 110 მგვტ აირტურბინების, 21 მგვტ ქარის სადგურების, ხოლო

კომბინირებული და ქვანახშირის თბოელექტროსადგურებისა - 925 მგვტ. ჯამური დადგმული სიმძლავრის დაახლოებით 77% მოდის ჰესებზე. მარეგულირებელი ჰესების წილი შეადგენს დადგმული სიმძლავრის დაახლოებით 57%-ს [39].

2030 წლისთვის საქართველოს ჯამური სიმძლავრე გაიზრდება 8767 მგვტ-მდე (იხ.ნახ.4.1). აქედან 4204 მგვტ იქნება მარეგულირებელი ჰესების სიმძლავრე, 2221 მგვტ მოდინებაზე მომუშავე ჰესების, 636 მგვტ ქარის სადგურების, 253 მგვტ მზის სადგურების, 110 მგვტ აირტურბინების, ხოლო 1343 მგვტ მაღალი ეფექტურობის მქონე კომბინირებული თბოელექტროსადგურების და ახალი ქვანახშირის თბოსადგურის სიმძლავრე [39].



ნახ.4.1. ელექტროსადგურთა მოსალოდნელი სიმძლავრეები 2030 წლისთვის

როგორც ვხედავთ წყლის რესურსზე მომუშავე ჰიდროელექტროსადგურების წილი მომავლაშიც სოლიდურია. მაღალი ეფექტურობის მქონე კომბინირებული თბოელექტროსადგურები და ახალი ქვანახშირის თბოსადგური ჩაანაცვლებენ მოძველებულ გარდაბნის №3, 4, და 9 ბლოკებს. აღსანიშნავია რომ ქარისა და მზის ელექტროსადგურების წილი 2030 წლისთვის იქნება 10%, ხოლო შემდგომ წლებში ეს მაჩვენებელი გაიზრდება.

სისტემათაშორისი კავშირების განვითარება - 2023-2029 წლებისთვის, საქართველო, თავისი გეოგრაფიული მდებარეობიდან გამომდინარე, მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს კავკასიის (შავი ზღვის აუზის ქვეყნების) რეგიონში დაგეგმილი ენერგეტიკულ ამოცანათა გადაჭრაში. რაც გულისხმობს ამ ქვეყნებს შორის ელექტროენერჯის მიმოცვლას და საქართველოს ჰიდროენერჯორესურსების ათვისებასა და გამოყენებას. ამ პერიოდში მნიშვნელოვანად გაძლიერდება საქართველოს ენერგოსისტემის კავშირის ხაზები მეზობელ ენერგოსისტემებთან; თურქეთთან სიმძლავრის მიმოცვლის შესაძლებლობა გაიზრდება 1400 მგვტ-მდე, რუსეთთან 1600 მგვტ-მდე, სომხეთთან 700 მგვტ-მდე. აზერბაიჯანთან უკვე არის 700-1000 მგვტ-ის მიმოცვლის შესაძლებლობა (იხ.ცხრ.4.1). უშუალოდ გადამცემი ხაზებიდან „ტაო“ და „მესხეთი“ თითოეულს შეუძლია 1500 მგვტ სიმძლავრის გატარება, მაგრამ მათი ჯამური გამტარუნარიანობა შეზღუდულია ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართების ბლოკების ჯამური გამტარუნარიანობით, რომელიც 2025 წლის შემდეგ 1050 მგვტ-ის ტოლი იქნება [39].

განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრირების შესაძლებლობა საქართველოს ელექტროსისტემაში - ბოლო წლებში განსაკუთრებულად გაიზარდა საქართველოში ქარისა და მზის ელექტროსადგურების მშენებლობისადმი ინტერესი. საქართველოს გადამცემი სისტემის ოპერატორმა სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა“ ევროპელი კონსულტანტების DigSILENT, DMCC, R2B კონსორციუმის დახმარებით შეისწავლა ცვალებადი განახლებადი ენერჯის წყაროების საქართველოს ენერგოსისტემაში ინტეგრირების შესაძლებლობები. კვლევის შედეგები ასეთია [39]:

- ✓ 2020-2021 წლამდე (საბალანსო მექანიზმების ამუშავების შემდეგ) საქართველოს ენერგოსისტემაში შესაძლებელია 333 მგვტ ქარის და 130 მგვტ მზის სადგურების ინტეგრირება (პოტენციალის 25%);
- ✓ 2025 წლისთვის საპროგნოზოდ, გარკვეული დაშვებების, შეზღუდვების და მოთხოვნების გათვალისწინებით, შესაძლებელი იქნება 665 მგვტ ქარის და 260 მგვტ მზის სადგურების ინტეგრირება (პოტენციალის 50%);

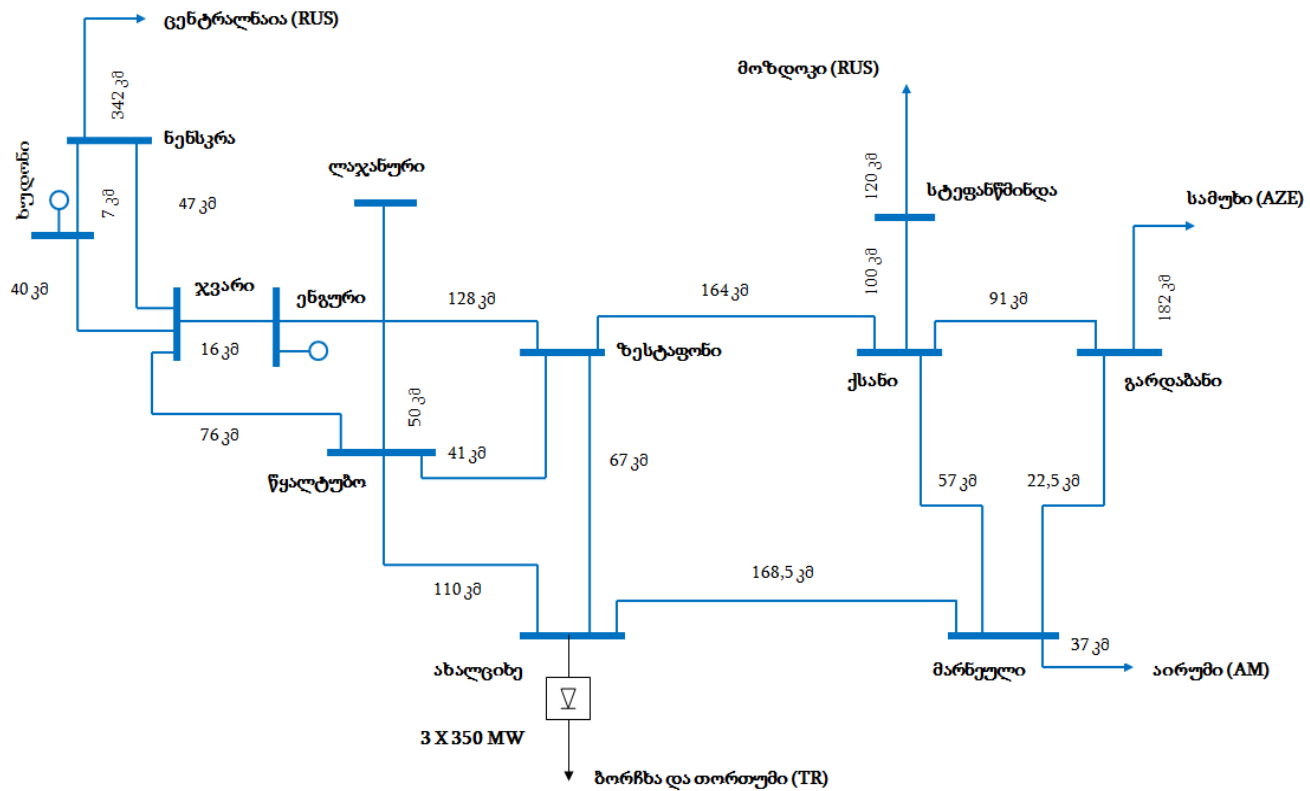
- ✓ 2030 წელს საპროგნოზოდ 1332 მგვტ ქარისა და 520 მგვტ მზის სადგურების ინტეგრირება (პოტენციალის 100%).

ელექტროენერჯის მოხმარება - ბოლო წლების განმავლობაში მკვეთრად მოიმატა როგორც ქვეყნის მოხმარებამ, ასევე ზაფხულის პიკურმა დატვირთვამ. ამ პერიოდში განსაკუთრებით კრიტიკული სიტუაცია იქმნება აღმოსავლეთ საქართველოში, სადაც ელექტროენერჯის ტრანსპორტირება ხდება დასავლეთ საქართველოდან. ძაბვების შემცირების მხრივ, დაგეგმილია როგორც რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება, ასევე ქვესადგურების (ავტო)ტრანსფორმატორების სიმძლავრის გაზრდა. ელექტროენერჯის მოხმარება მზარდი ტენდენციით გამოირჩევა, ცნობები მოხმარების პროგნოზის შესახებ მიღებულ იქნა განაწილების ლიცენზიანტების განვითარების გეგმების საფუძველზე (იხ.ცხრ.4.2). ელექტროენერჯის მოხმარების ზრდის პროგნოზი განხილულია შემდეგი სამი სცენარით: პესიმისტური - 3%; ზომიერი - 5%; ოპტიმისტური - 7% [39].

„ცხრილი 4.2.“ მოხმარების პროგნოზი, მლრდ.კვტ.სთ (მთლიანი ქვეყნის შიდა მოხმარება)

სცენარი	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
პესიმისტური	14.33	14.76	15.2	15.66	16.13	16.61	17.1
ზომიერი	15.8	16.6	17.43	18.3	19.22	20.18	21.2
ოპტიმისტური	17.3	18.51	19.81	21.2	22.68	24.27	26

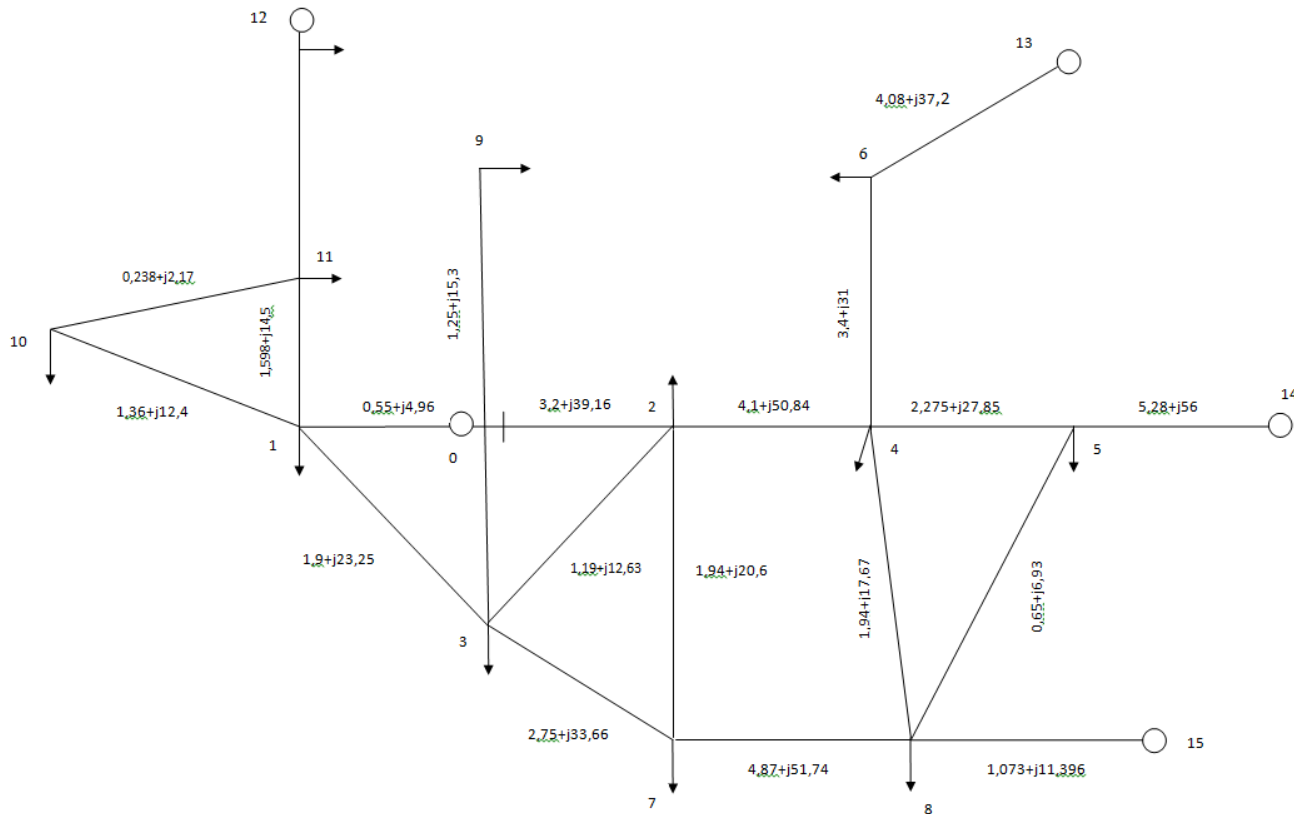
როგორც ვხედავთ, საქართველოს ელექტროსისტემა დიდი გამოწვევების წინაშე დგას, აღნიშნულ და სხვა მნიშვნელოვან პროექტთა განხორციელებით გაიზრდება ქვეყნის ელექტროსისტემის მდგრადობა, კვების საიმედოობა და ის მზად შეხვდება მომავალ გამოწვევებს. საქართველოს ელექტროსისტემაში დაგეგმილი მნიშვნელოვანი პროექტების გათვალისწინებით საქართველოს სისტემაწარმოქმნელი ქსელის პერსპექტიულ სქემას აქვს შემდეგი სახე (იხ.ნახ.4.2) [39]:



ნახ.4.2 საქართველოს 500 კვ ძაბვის გადამცემი ქსელი 2029 წლისათვის

4.3. საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები

განვიხილოთ საქართველოს არსებული 500 კვ ძაბვის ქსელი დაგეგმილი, პერსპექტიული პროექტების გათვალისწინებით (საქართველოს 500 კვ გადამცემი პერსპექტიული სქემის მიხედვით იხ.ნახ.4.2). მოცემული პერსპექტიული ქსელის ჩანაცვლების სქემა მოცემულია ნახ.4.3-ზე.



ნახ.4.3 საქართველოს ელექტროსისტემის პერსპექტიული სისტემაწარმომქნელი ქსელის ჩანაცვლების სქემა

აღნიშნულ ნახაზზე: 0- ენგურ-ჰესი (მაბალანსებელი და ბაზისური კვანძი); 1- ჯვარი; 2- ზესტაფონი; 3 - წყალტუბო; 4 - ქსანი; 5 - გარდაბანი; 6 - სტეფანწმინდა; 7 - ახალციხე; 8 - მარნეული; 9 - ლაჯანური; 10 - ხუდონი; 11 - ნენსკრა; 12 - ცენტრალნაია (რუსეთი); 13 - მოზდოკი (რუსეთი); 14 - სამუხი (აზერბაიჯანი); 15 - აირუმი (სომხეთი).

მოცემული ქსელი თითქმის ერთგვაროვანია, ქსელის ყველა შტოსათვის X/R თანაფარდობა დაახლოებით ერთნაირია (იხ.ნახ.4.3), ამიტომ შესაძლებელია კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური და რეაქტიული წინაღობები გამოითვალოს ცალ-ცალკე.

აქ გამოყენებულ ხაზთა ელექტრული პარამეტრები და ზოგადი ინფორმაციები მოცემულია ცხრ.4.3-სა და ცხრ.4.4-ში.

„ცხრილი 4.3.“ სადენტა ელექტრული პარამეტრები

სადენტის მარკა	r_0 , ომი/კმ	x_0 , ომი/კმ	$b_0 \cdot 10^{-6}$, სიმ/კმ
AC-3x400/51	0,025	0,306	3,62
AC-3x300/67	0,034	0,310	3,97
AC-3x330/43	0,029	0,308	3,6

„ცხრილი 4.4.“ 500 კვ ეგხ-თა ინფორმაცია და ელექტრული პარამეტრები

ეგხ-ს დასახელება, სიგრძე	კავშირი	სადენტის მარკა	R, ომი	X, ომი	$B \cdot 10^{-6}$, სიმ
„იმერეთი“, 128 კმ	ენგურ-ზესტ	AC-3x400/51	3,2	39,16	436,36
„ქართლი-2“, 164 კმ	ზესტ-ქსანი	AC-3x400/51	4,1	50,84	593,68
„ქართლი-1“, 91კმ	ქსანი-გარდაბ	AC-3x400/51	2,275	27,85	329,4
„კავკასიონი“, 342კმ	ნენსკ-ცენტრა	AC-3x300/67	11,628	106,02	1357,7
„ლია“, 16კმ	ჯვარი-ენგურ	AC-3x300/67	0,55	4,96	63,52
„სნო“, 100კმ	ქსანი-სტეფან	AC-3x300/67	3,4	31	397
„გაჩიანი“, 22,5კმ	გარდაბ-მარნე	ACSR-3x330/43	0,65	6,93	81
„ვარძია“, 168 კმ	მარნე-ახალც	ACSR-3x330/43	4,87	51,74	604,8
„ასურეთი“, 57კმ	ქსანი-მარნე	AC-3x300/67	1,94	17,67	226,3
„მუხ.ველი“, 182კმ	გარდაბ-სამუხ	ACSR-3x330/43	5,28	56	655,2
„ზეკარი“, 67 კმ	ზესტ-ახალც	ACSR-3x330/43	1,94	20,6	241,2
„-----“, 76 კმ	ჯვარი-წყალტ	AC-3x400/51	1,9	23,25	252,3
„-----“, 110 კმ	წყალტ-ახალც	AC-3x400/51	2,75	33,66	398,2
„-----“, 120 კმ	სტეფან-მოზდ	AC-3x300/67	4,08	37,2	476,4
„-----“, 52 კმ	ზესტ-წყალტ	AC-3x330/43	1,19	12,63	147,6
„-----“, 37 კმ	მარნე-აირუმი	ACSR-3x330/43	1,073	11,396	133,2
„-----“, 7 კმ	ხუდონ-ნენსკ	AC-3x300/67	0,238	2,17	27,79
„-----“, 47 კმ	ნენსკ-ჯვარი	AC-3x300/67	1,598	14,57	186,59
„-----“, 40 კმ	ხუდონ-ჯვარი	AC-3x300/67	1,36	12,4	158,8
„დერჩი“, 50 კმ	ლაჯან-წყალტ	AC-3x400/51	1,25	15,3	181

კვანძთა საკუთარი და ურთიერთ R_{ij} აქტიური წინაღობები - პირველ რიგში გამოვთვალოთ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური გამტარობები.

$Y_{i-j} = \frac{1}{R_{i-j}}$ - წარმოადგენს კვანძების ურთიერთ აქტიურ გამტარობას, სადაც R_{i-j} თავის მხრივ $i - j$ უბნის აქტიური წინაღობა, ომი.

$Y_{i-i} = \sum_{j=0}^n Y_{i-j}$ - წარმოადგენს კვანძების საკუთარ აქტიურ გამტარობას, სადაც n კვანძთა საერთო რაოდენობაა ქსელში, ხოლო ინდექსი „0“ მინიჭებული აქვს მახალანსებელ კვანძს.

თუ კი რომელიმე i და j კვანძებს ერთმანეთთან არ გააჩნიათ პირდაპირი ელექტრული კავშირი მათი ურთიერთგამტარობა მიჩნეულია ნულის ტოლად $Y_{i-j} = 0$, ჩვენს შემთხვევაში გვაქვს:

$$Y_{0-1} = \frac{1}{0,55} = 1,81; Y_{0-2} = \frac{1}{3,2} = 0,3125; Y_{1-3} = \frac{1}{1,9} = 0,53; Y_{1-10} = \frac{1}{1,36} = 0,735;$$

$$Y_{1-11} = \frac{1}{1,598} = 0,62578; Y_{2-3} = \frac{1}{1,19} = 0,84; Y_{2-4} = \frac{1}{4,1} = 0,244; Y_{2-7} = \frac{1}{1,94} = 0,515;$$

$$Y_{3-7} = \frac{1}{2,75} = 0,36; Y_{3-9} = \frac{1}{1,25} = 0,8; Y_{4-5} = \frac{1}{2,275} = 0,44; Y_{4-6} = \frac{1}{3,4} = 0,294;$$

$$Y_{4-8} = \frac{1}{1,94} = 0,515; Y_{5-8} = \frac{1}{0,65} = 1,538; Y_{5-14} = \frac{1}{5,28} = 0,189; Y_{6-13} = \frac{1}{4,08} = 0,245;$$

$$Y_{7-8} = \frac{1}{4,87} = 0,205; Y_{8-15} = \frac{1}{1,073} = 0,932; Y_{10-11} = \frac{1}{0,238} = 4,2; Y_{11-12} = \frac{1}{11,628} = 0,086;$$

$$Y_{1-1} = 3,7; Y_{2-2} = 1,91; Y_{3-3} = 2,53; Y_{4-4} = 1,493; Y_{5-5} = 2,167; Y_{6-6} = 0,539;$$

$$Y_{7-7} = 1,08; Y_{8-8} = 3,19; Y_{9-9} = 0,8; Y_{10-10} = 4,935; Y_{11-11} = 4,91; Y_{12-12} = 0,086;$$

$$Y_{13-13} = 0,245; Y_{14-14} = 0,189; Y_{15-15} = 0,932;$$

მიღებული შედეგების გათვალისწინებით შევადგინოთ საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ გამტარობათა მატრიცა შემდეგი ფორმით [3]:

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{1-1} & -Y_{1-2} \dots -Y_{1-f} \dots -Y_{1-n} \\ -Y_{f-1} & -Y_{f-2} \dots -Y_{f-f} \dots -Y_{f-n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n-1} & -Y_{n-2} \dots -Y_{n-f} \dots -Y_{n-n} \end{pmatrix}$$

აღნიშნული Y მატრიცის შებრუნებით მივიღებთ საკუთარი და ურთიერთ R აქტიური წინალობათა მატრიცას, მაშასადამე $R = Y^{-1}$ [3; 15]. შესაბამისად, მიღებულ იქნა კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური წინალობები, რომლებიც წარმოდგენილია ცხრილის სახით (იხ.ცხრ.4.5.).

„ცხრილი 4.5.“ კვანძთა საკუთარი და ურთიერთ აქტიური წინალობები

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,507	0,269	0,348	0,281	0,284	0,281	0,298	0,284	0,348	0,507	0,507	0,507	0,281	0,284	0,284
2	0,269	1,647	1,19	1,578	1,563	1,578	1,478	1,559	1,19	0,27	0,27	0,27	1,578	1,563	1,559
3	0,348	1,19	1,537	1,241	1,253	1,241	1,318	1,256	1,537	0,348	0,349	0,349	1,241	1,253	1,256
4	0,281	1,578	1,241	4,138	3,798	4,138	1,869	3,7	1,241	0,281	0,281	0,281	4,138	3,798	3,7
5	0,284	1,563	1,253	3,798	4,596	3,798	1,955	4,174	1,253	0,284	0,284	0,284	3,798	4,596	4,174
6	0,281	1,578	1,241	4,138	3,798	7,54	1,869	3,7	1,241	0,281	0,281	0,281	7,54	3,798	3,7
7	0,298	1,478	1,318	1,869	1,955	1,869	2,446	1,98	1,318	0,299	0,299	0,299	1,869	1,955	1,98
8	0,284	1,559	1,256	3,7	4,174	3,7	1,98	4,31	1,256	0,285	0,285	0,285	3,7	4,174	4,31
9	0,348	1,19	1,537	1,241	1,253	1,241	1,318	1,256	2,787	0,348	0,349	0,349	1,241	1,253	1,256
10	0,507	0,27	0,348	0,281	0,284	0,281	0,299	0,285	0,348	1,29	1,189	1,189	0,281	0,284	0,285
11	0,507	0,27	0,349	0,281	0,284	0,281	0,299	0,285	0,349	1,189	1,308	1,308	0,281	0,284	0,285
12	0,507	0,27	0,349	0,281	0,284	0,281	0,299	0,285	0,349	1,189	1,308	12,93	0,281	0,284	0,285
13	0,281	1,578	1,241	4,138	3,798	7,54	1,869	3,7	1,241	0,281	0,281	0,281	11,62	3,798	3,7
14	0,284	1,563	1,253	3,798	4,596	3,798	1,955	4,174	1,253	0,284	0,284	0,284	3,798	9,887	4,174
15	0,284	1,559	1,256	3,7	4,174	3,7	1,98	4,31	1,256	0,285	0,285	0,285	3,7	4,174	5,383

კვანძთა საკუთარი და ურთიერთ X_{ij} რეაქტიული წინალობები - პირველ რიგში გამოვთვალოთ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ რეაქტიული გამტარობები.

$Y_{i-j} = \frac{1}{X_{i-j}}$ - წარმოადგენს კვანძების ურთიერთ რეაქტიულ გამტარობას, სადაც X_{i-j} თავის მხრივ $i - j$ უბნის რეაქტიული წინალობა, ომი.

$Y_{i-i} = \sum_{j=0}^n Y_{i-j}$ – წარმოადგენს კვანძების საკუთარ რეაქტიულ გამტარობას, სადაც n კვანძთა საერთო რაოდენობაა ქსელში, ხოლო ინდექსი „0“ მინიჭებული აქვს მაბალანსებელ კვანძს.

თუ კი რომელიმე i და j კვანძებს ერთმანეთთან არ გააჩნიათ პირდაპირი ელექტრული კავშირი მათი ურთიერთგამტარობა მიჩნეულია ნულის ტოლად $Y_{i-j} = 0$. ჩვენს შემთხვევაში გვაქვს:

$$Y_{0-1} = \frac{1}{4,96} = 0,2; \quad Y_{0-2} = \frac{1}{39,16} = 0,0255; \quad Y_{1-3} = \frac{1}{23,25} = 0,043; \quad Y_{1-10} = \frac{1}{12,4} = 0,08;$$

$$Y_{1-11} = \frac{1}{14,57} = 0,0686; \quad Y_{2-4} = \frac{1}{50,84} = 0,019669; \quad Y_{2-3} = \frac{1}{12,63} = 0,079; \quad Y_{2-7} = \frac{1}{20,6} = 0,04854;$$

$$Y_{3-7} = \frac{1}{33,66} = 0,03; \quad Y_{3-9} = \frac{1}{15,3} = 0,065; \quad Y_{4-5} = \frac{1}{27,85} = 0,036; \quad Y_{4-6} = \frac{1}{31} = 0,032;$$

$$Y_{4-8} = \frac{1}{17,67} = 0,0565; \quad Y_{5-8} = \frac{1}{6,93} = 0,144; \quad Y_{5-14} = \frac{1}{56} = 0,01785; \quad Y_{6-13} = \frac{1}{37,2} = 0,02688;$$

$$Y_{7-8} = \frac{1}{51,74} = 0,0193; \quad Y_{8-15} = \frac{1}{11,396} = 0,0877; \quad Y_{10-11} = \frac{1}{2,17} = 0,46; \quad Y_{11-12} = \frac{1}{106,02} = 0,0094;$$

$$Y_{1-1} = 0,3916; \quad Y_{2-2} = 0,1727; \quad Y_{3-3} = 0,065; \quad Y_{4-4} = 0,1443; \quad Y_{5-5} = 0,1978;$$

$$Y_{6-6} = 0,059; \quad Y_{7-7} = 0,0978; \quad Y_{8-8} = 0,3075; \quad Y_{9-9} = 0,065; \quad Y_{10-10} = 0,54;$$

$$Y_{11-11} = 0,538; \quad Y_{12-12} = 0,0094; \quad Y_{13-13} = 0,02688; \quad Y_{14-14} = 0,0178; \quad Y_{15-15} = 0,0877;$$

წინამდებარე მსჯელობებიდან გამომდინარე და მიღებული შედეგების გათვალისწინებით შევადგინოთ საკუთარ და ურთიერთ რეაქტიულ გამტარობათა მატრიცა Y . ამ მატრიცის შებრუნებით კი მივიღებთ საკუთარი და ურთიერთ X რეაქტიული წინაღობათა მატრიცას, რომელიც წარმოადგენილია ცხრილის სახით (იხ.ცხრ.4.6.).

„ცხრილი 4.6.“ კვანძთა საკუთარი და ურთიერთ რეაქტიული წინაღობები

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4,679	2,536	3,187	2,648	2,665	2,665	2,763	2,669	3,187	4,679	4,679	4,679	2,665	2,665	2,669
2	2,536	19,46	14,33	18,77	18,61	18,81	17,72	18,57	14,33	2,536	2,536	2,536	18,81	18,61	18,57
3	3,187	14,33	18,01	14,96	15,06	15	15,61	15,08	18,01	3,187	3,187	3,187	15	15,06	15,08
4	2,648	18,77	14,96	49,04	45,03	49,04	22,6	44,06	14,96	2,648	2,648	2,648	49,04	45,03	44,06
5	2,665	18,61	15,06	45,03	53,52	45,15	23,47	48,7	15,06	2,665	2,665	2,665	45,15	53,52	48,7
6	2,665	18,81	15	49,04	45,15	80,3	22,66	44,17	15	2,655	2,655	2,655	80,3	45,15	44,17
7	2,763	17,72	15,61	22,6	23,47	22,66	28,48	23,69	15,61	2,763	2,763	2,763	22,66	23,47	23,69
8	2,669	18,57	15,08	44,06	48,7	44,17	23,69	49,86	15,08	2,669	2,669	2,669	44,17	48,7	49,86
9	3,187	14,33	18,01	14,96	15,06	15	15,61	15,08	33,39	3,187	3,187	3,187	15	15,06	15,08
10	4,679	2,536	3,187	2,648	2,665	2,655	2,763	2,669	3,187	11,83	10,9	10,9	2,655	2,665	2,669
11	4,679	2,536	3,187	2,648	2,665	2,655	2,763	2,669	3,187	10,9	11,99	11,99	2,655	2,665	2,669
12	4,679	2,536	3,187	2,648	2,665	2,655	2,763	2,669	3,187	10,9	11,99	118,37	2,655	2,665	2,669
13	2,665	18,81	15	49,04	45,15	80,3	22,66	44,17	15	2,655	2,655	2,655	117,5	45,15	44,17
14	2,665	18,61	15,06	45,03	53,52	45,15	23,47	48,7	15,06	2,665	2,665	2,665	45,15	109,7	48,7
15	2,669	18,57	15,08	44,06	48,7	44,17	23,69	49,86	15,08	2,669	2,669	2,669	44,17	48,7	61,27

მოცემულ პარაგრაფში აღნიშნული მატრიცული ალგებრის ოპერაციები ჩატარებულ იქნა მათემატიკური პროგრამა “MATLAB”-ის საშუალებით.

4.4. საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევა

განვიხილოთ საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმომქნელი 500 კვ ძაბვის არსებული ქსელი პერსპექტიული პროექტების გათვალისწინებით (ნახ.4.2). აქ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევა განხილულია სამი სცენარის მიხედვით: ავტონომიური რეჟიმი, საქართველოს ელექტროსისტემის პარალელური მუშაობა აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან და საქართველოს ელექტროსისტემის პარალელური მუშაობა რუსეთის ელექტროსისტემასთან. ავლნიშნოთ, რომ თითოეული სცენარის განხილვა მიმდინარეობს საქართველოს ელექტროსისტემის დატვირთვის ორი ზღვრული: მაქსიმალური და მინიმალური რეჟიმების გათვალისწინებით. მაბალანსებელ და

ბაზისურ კვანძად მიჩნეულია ელექტროსადგურ „ენგურ-ჰესის“ გენერაციის კვანძი, რომელიც სქემაზე აღნიშნული იქნება „0“-ით. დატვირთვის საკონტროლო კვანძებისათვის აღებულია პერსპექტიული 2027 წლის დატვირთვები. საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის საკონტროლო კვანძების პერსპექტიული (2025-2027) წლების დატვირთვები ნაჩვენებია ქვემოთ „ ცხრილი 4.7.“-ში. უნდა აღინიშნოს, რომ აქ ელექტროენერჯის მოხმარების ზრდის პროგნოზი განხილულია ზომიერი – 5%-იანი ზრდის სცენარით.

„ცხრილი 4.7.“ საკონტროლო კვანძთა პერსპექტიული კვანძური დატვირთვები,

$$P(\text{მგვტ}) + jQ(\text{მგვარ})$$

საკონტროლო კვანძი	პერსპექტიული წლები					
	მაქსიმალური დატვირთვა			მინიმალური დატვირთვა		
	2025	2026	2027	2025	2026	2027
ჯვარი	35+j16,8	36,75+j17,64	38,58+j18,52	9+j4,32	9,45+j4,53	9.92+j2,17
ზესტაფონი	315,8+j199,8	331,6+j209,8	348,2+j220,3	41,5+j183,8	43,57+j193	45,74+j202,65
ქსანი	182,3+j109,4	191,4+j114,9	200,97+j120,6	66,3+j44,5	69,61+j46,72	73,09+j49,05
გარდაბანი	187,8+j237,9	197,2+j249,8	207,06+j262,3	133,2+j120,8	139,9+j126,8	146,9+j133,14
მარნეული	97,1+j37,3	101,95+j39,2	107,04+j41,16	55,2+j7,96	57,96+j8,35	60,85+j8,76
წყალტუბო	120+j74,4	126+j78,1	132,3+j82	35+j21,7	36,75+j22,78	38,58+j23,91
ახალციხე	61,7+j4,01	64,78+j4,21	68,02+j4,42	120,6+j7,47	126,63+j7,84	132,96+j8,23
სტეფანწმინდა	18+j8,64	18,9+j9,07	19,84+j9,52	7+j3,36	7,35+j3,52	7,71+j3,69
ხუდონი	23+j11,04	24,15+j11,59	25,35+j12,16	8,7+j4,17	9,13+j4,37	9,58+j4,58
ნენსკრა	20+j9,6	21+j10,08	22,05+j10,58	7,34+j3,52	7,7+j3,69	8,08+j3,87
ლაჯანური	19,68+j9,44	20,66+j9,91	21,69+j10,4	8,12+j3,89	8,52+j4,08	8,94+j4,28

საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელში შემოსულ ელექტროსადგურთა პერსპექტიული 2027 წლის გენერაციები ნაჩვენებია „ ცხრილ 4.8“-ში. ამ ელექტროსადგურთა რიცხვს მიეკუთვნება: სეზონური რეგულირების ტიპის ელექტროსადგური ნენსკრა-ჰესი, რომლის დადგმული სიმძლავრე გახლავთ 280 მგვტ და წლიური გამომუშავება 1219 მლნ კვტ-სთ, მისი ექსპლუატაციაში

შესვლის თარიღია 2024 წელი; სეზონური რეგულირების ტიპის ელექტროსადგური ხუდონ - ჰესი, რომლის დადგმული სიმძლავრე გახლავთ 702 მგვტ და წლიური გამომუშავება 1528 მლნ კვტ.სთ, მისი ექსპლუატაციაში შესვლის თარიღია 2027 წელი; ასევე გენერაციის კვანძად შეგვიძლია მივიჩნიოთ ლაჯანურის ახალი 500 კვ ძაბვის კვანძი, სადაც მოხდება რაჭა-ლეჩხუმსა და ქვემო სვანეთში არსებული და პერსპექტიული ჰესების (როგორცაა: ლაჯანურ-ჰესი, ონის ჰესების კასკადი, ტვიში-ჰესი, ნამახვან-ჰესი, ცაგერი-ჰესი, ლენტეხი-ჰესი და სხვ.) სიმძლავრეთა ინტეგრირება(თავმოყრა), საუბარია დაახლოებით 500÷600 მგვტ სიმძლავრეზე [39].

„ცხრილი 4.8.“ ელექტროსადგურთა პერსპექტიული 2027 წლის გენერაციები,

$$P(\text{მგვტ}) + jQ(\text{მგვარ})$$

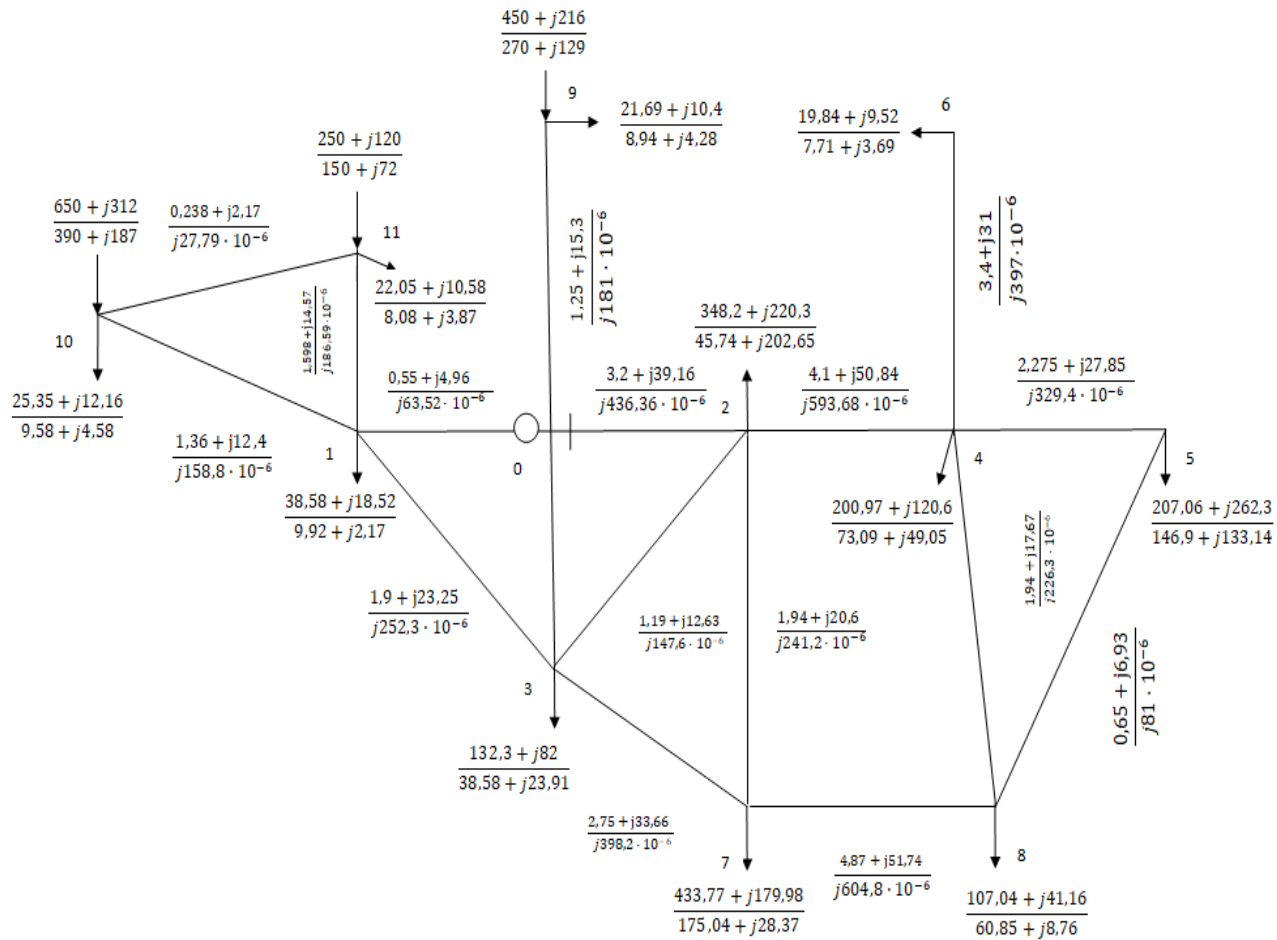
გენერაციის კვანძი	მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი	მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი
ნენსკრა	250+j120	150+j72
ხუდონი	650+j312	390+j187
ლაჯანური	450+j216	270+j129

მოგეხსენებათ, რომ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური და რეაქტიული წინაღობები ქსელის ელექტრულ პარამეტრებს მიეკუთვნება და სხვადასხვა სცენარისა თუ დატვირთვის რეჟიმების განხილვისას უცვლელია, მოცემული ქსელისათვის აღნიშნული სიდიდეები დადგენილია §4.3-ში (იხ.ცხრ.4.5, ცხრ.4.6).

4.4.1. ავტონომიური რეჟიმი

ამ დროს საქართველოს ელექტროსისტემა მუშაობს მეზობელი ქვეყნის ელექტროსისტემებთან დაუკავშირებლად ანუ დამოუკიდებელ, ავტონომიურ

რეჟიმში. ამ მომენტში საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის ჩანაცვლების სქემა ნაჩვენებია ნახ.4.4-ზე.



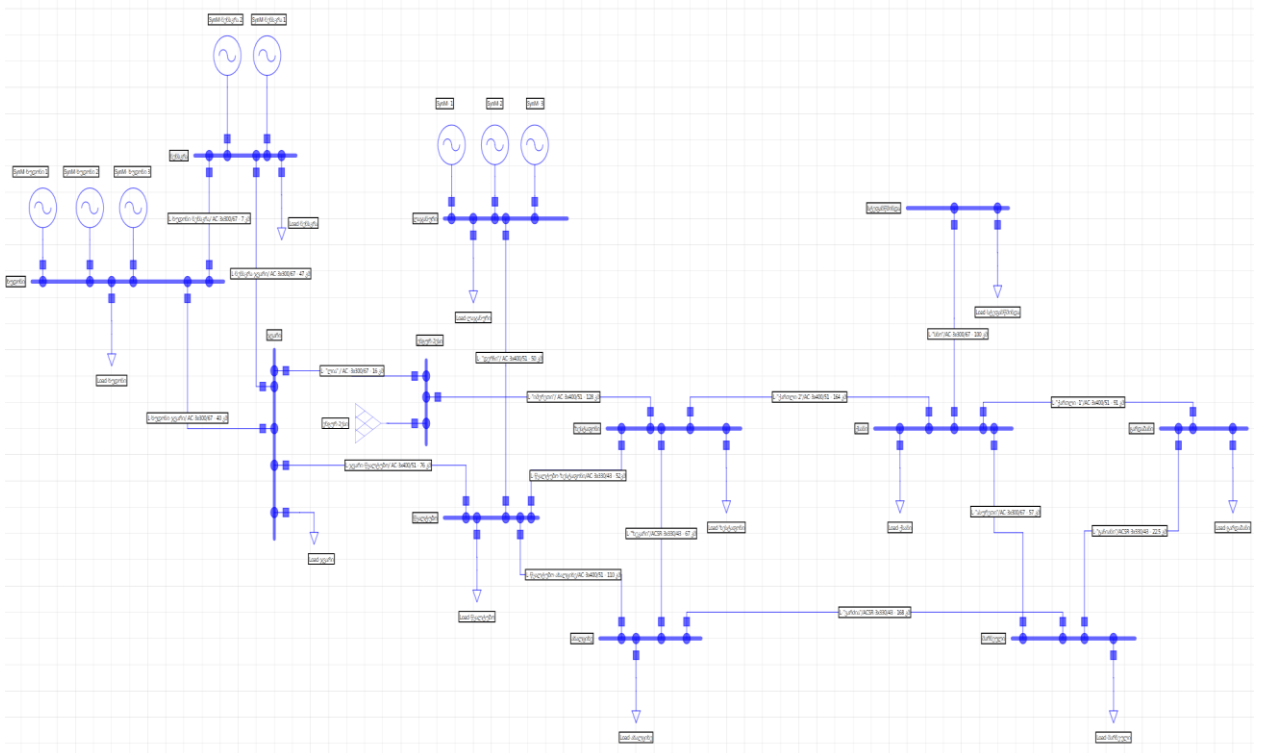
ნახ.4.4. საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის პერსპექტიული ქსელის ჩანაცვლების სქემა ავტონომიური რეჟიმისას

აღნიშნულ ნახაზზე: 0- ენგურ-ჰესი (მაბალანსებელი და ბაზისური კვანძი); 1- ჯვარი; 2- ზესტაფონი; 3- წყალტუბო; 4- ქსანი; 5 - გარდაბანი; 6 - სტეფანწმინდა; 7 - ახალციხე; 8 - მარნეული; 9 - ლაჯანური; 10 - ხუდონი; 11 - ნენსკრა.

სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევის ჩვენს მიერ წარმოდგენილი მათემატიკური მოდელის 1 პუნქტის მიხედვით აუცილებელია საკონტროლო კვანძებში ძაბვის მუშა მნიშვნელობების განსაზღვრა [35]. ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილ სქემაში სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილება (Load flow) და დამყარებული რეჟიმების ანგარიში (ძაბვის მუშა

მნიშვნელობათა განსაზღვრა კვანძებში) როგორც მაქსიმალურ, ისევე მინიმალურ დატვირთვის რეჟიმებში ჩატარდა კომპიუტერულ პროგრამა „NEPLAN“- ში.

„NEPLAN Software“ გახლავთ შვეიცარული პროგრამა, რომლის ფუნქციაა ელექტრული სისტემის დამყარებული და გარდამავალი რეჟიმების ანალიზი [40]. ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მოდელი “NEPLAN”- ში ნაჩვენებია ნახ.4.5-ზე.



ნახ.4.5. ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის მოდელი “NEPLAN” პროგრამაში

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი - “NEPLAN” პროგრამაში ჩატარებული ანგარიშების შედეგად დადგინდა ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის საკონტროლო კვანძების ძაბვის მუშა მნიშვნელობები, შედეგები მოცემულია ცხრილი 4.9-ში. ცხრილი 4.10-ში შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

„ცხრილი 4.9.“ საქართველოს ელექტროსისტემის ავტონომიური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძური შედეგები “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

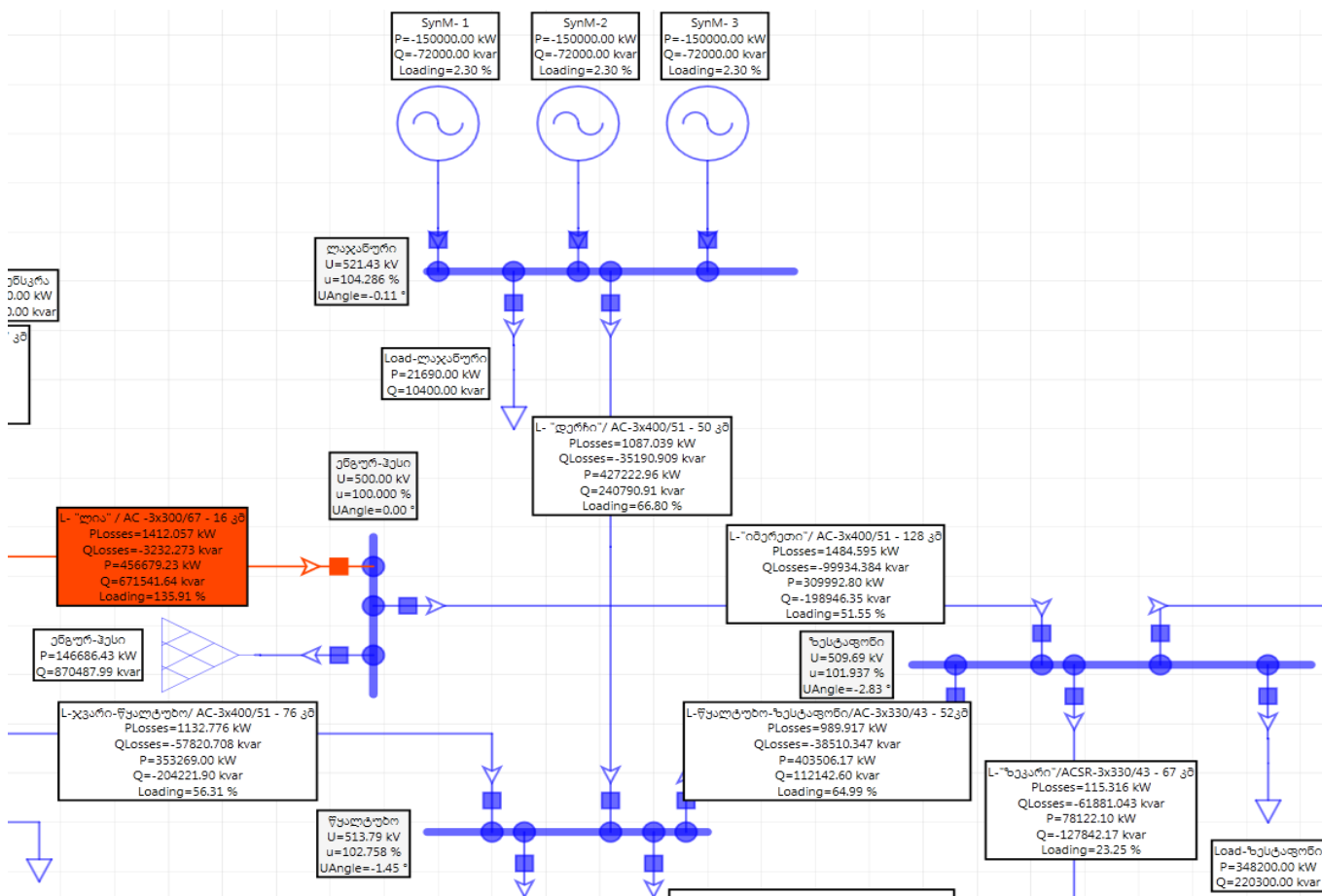
კვანძის დასახელება	U, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	α%, ძაბვა პროცენტულად
წყალტუბო	513,78995	-1,44731	102,75799
ენგურ-ჰესი	500,0	0,0	100,0
გარდაბანი	504,70691	-6,2742	100,94138
ლაჯანური	521,43097	-0,10724	104,28619
ნენსკრა	514,0284	1,57402	102,80568
ხუდონი	514,38954	1,64185	102,87791
სტეფანწმინდა	510,81715	-6,17369	102,16343
მარნეული	506,93914	-6,0492	101,38783
ქსანი	508,3858	-6,00628	101,67716
ზესტაფონი	509,68615	-2,83243	101,93723
ახალციხე	513,30806	-3,22655	102,66161
ჯვარი	507,0941	0,43029	101,41882

„ცხრილი 4.10.“ საქართველოს ელექტროსისტემის ავტონომიური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის შედეგების შეჯამება “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

ΔP , კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	ΔQ , კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	P , კვტ - დატვირთვა	Q , კვარ - დატვირთვა	P , კვტ - ელექტროსადგურთა გენერაცია	Q , კვარ - ელექტროსადგურთა გენერაცია	P , კვტ - მბალანსებელი კვანძური აქტიური სიმძლავრე
12193,568	-1014447,99	1191100	791960	1350	648000	-146,706

როგორც ცხრ.4.10-დან ვგებულობთ ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მაქსიმალური დატვირთვის დროს აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინაღობაში) აღწევს 12,193 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (1350 მგვტ) 0,9% –ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემდაღი ძაბვის ქსელში გვაქვს დაახლოებით 1014 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე.

საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის ავტონომიური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას დიდია აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონის კვანძთა დატვირთვები და შესაბამისად იზრდება სიმძლავრეთა ნაკადგადადინებები დასავლეთ საქართველოს რეგიონიდან აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში. აღნიშნულის გამო საკმაოდ დატვირთულია დასავლეთ და აღმოსავლეთ საქართველოს ურთიერთ დამაკავშირებელი შიდასასისტემო 500 კვ ზემალაღი ძაბვის ხაზები („ქართლი -2“, „ვარძია“), რის საფუძველზეც ძაბვის მუშა მნიშვნელობები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში ბევრად დაბალია ვიდრე დასავლეთ საქართველოს რეგიონში, იხ.ცხრ.4.19.



ნახ.4.6. ავტონომიური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელში კვანძ „ლაჯანურის“ მოდელი „NEPLAN“ პროგრამაში

აგრეთვე ნახ.4.6-ზე ნაჩვენებია მაქსიმალური დატვირთვისას დასავლეთ საქართველოს პრობლემატური კვანძი „ლაჯანური“, რომელიც გახლავთ

ერთადერთი კვანძი ამ რეჟიმში, სადაც ძაბვა გადახრილია დასაშვები ფარგლებიდან, იხ ცხრ.4.9.

ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ნუმერაციისა და ცხრ.4.9-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 507,09 \text{ კვ}; U_2 = 509,68 \text{ კვ}; U_3 = 513,79 \text{ კვ}; U_4 = 508,68 \text{ კვ}; U_5 = 504,7 \text{ კვ}; U_6 = 510,81 \text{ კვ}; U_7 = 513,3 \text{ კვ}; U_8 = 506,94 \text{ კვ}; U_9 = 521,43 \text{ კვ}; U_{10} = 514,39 \text{ კვ}; U_{11} = 514,02 \text{ კვ}.$$

ჩვენი მიდგომით ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [29, 41]:

$$0,98 \cdot U_{\text{ფ}} \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_{\text{ფ}} \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ცხრ.4.10-დან ჩანს ძაბვები ყველა კვანძში დასაშვებ ფარგლებშია გარდა „9“ კვანძისა, შესაბამისად რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა განიხილება სწორედ „9“ კვანძში - ლაჯანურში. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „9“ კვანძისათვის, გვექნება:

$$Q_{39} \cdot X_{99} = (U_{9 \text{ მოთხ}} - U_9) \cdot U_{\text{ფ}}$$

$$Q_{39} \cdot 33,39 = (515 - 521,43) \cdot 500$$

$$Q_{39} = -96,28 \text{ მგვარ};$$

ამრიგად, მათემატიკური მოდელის მიხედვით „9“ კვანძ ლაჯანურში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი (სასურველია FACTS Devices) უნდა მუშაობდეს $Q_{39} = -96,28$ მგვარ სიმძლავრით. აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარი (3.11) –ის შესაბამისად ქსელის დანარჩენ კვანძებშიც შეცვლის (შეამცირებს) ძაბვის მუშა მნიშვნელობებს. ვნახოთ თუ როგორ შეიცვლება ძაბვის მნიშვნელობები კვანძებში აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{39} \cdot X_{19}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 3,187}{500} = -0,61 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 506,48 \text{ კვ};$$

$$\delta U_2 = \frac{Q_{39} \cdot X_{29}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 14,33}{500} = -2,76 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 506,92 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = \frac{Q_{39} \cdot X_{39}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 18,01}{500} = -3,46 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 510,33 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = \frac{Q_{39} \cdot X_{49}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 14,96}{500} = -2,88 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 505,8 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = \frac{Q_{39} \cdot X_{59}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 15,06}{500} = -2,9 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 501,8 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = \frac{Q_{39} \cdot X_{69}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 15}{500} = -2,88 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 507,93 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = \frac{Q_{39} \cdot X_{79}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 15,61}{500} = -3 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 510,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = \frac{Q_{39} \cdot X_{89}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 15,08}{500} = -2,9 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 504,04 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = \frac{Q_{39} \cdot X_{99}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 33,39}{500} = -6,43 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = \frac{Q_{39} \cdot X_{109}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 3,187}{500} = -0,61 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 513,78 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = \frac{Q_{39} \cdot X_{119}}{U_6} = \frac{-96,28 \cdot 3,187}{500} = -0,61 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 513,41 \text{ კვ};$$

როგორც ვხედავთ მაქსიმალური დატვირთვისას „9“ კვანძ „ლაჯანურში“ დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის $Q_{39} = -96,28$ მგვარ სიმძლავრით ოპერირებისას ძაბვები ყველა კვანძში დასაშვებ ფარგლებშია, ამით ანგარიში დასრულებულია.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი - „NEPLAN“ პროგრამაში ჩატარებული ანგარიშების შედეგად დადგინდა ავტონომიური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელის საკონტროლო კვანძების ძაბვის მუშა მნიშვნელობები, შედეგები მოცემულია ცხრილი 4.11-ში. ცხრილი 4.12-ში კი შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

„ცხრილი 4.11.“ საქართველოს ელექტროსისტემის ავტონომიური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძური

შედეგები „NEPLAN“ პროგრამის მიხედვით

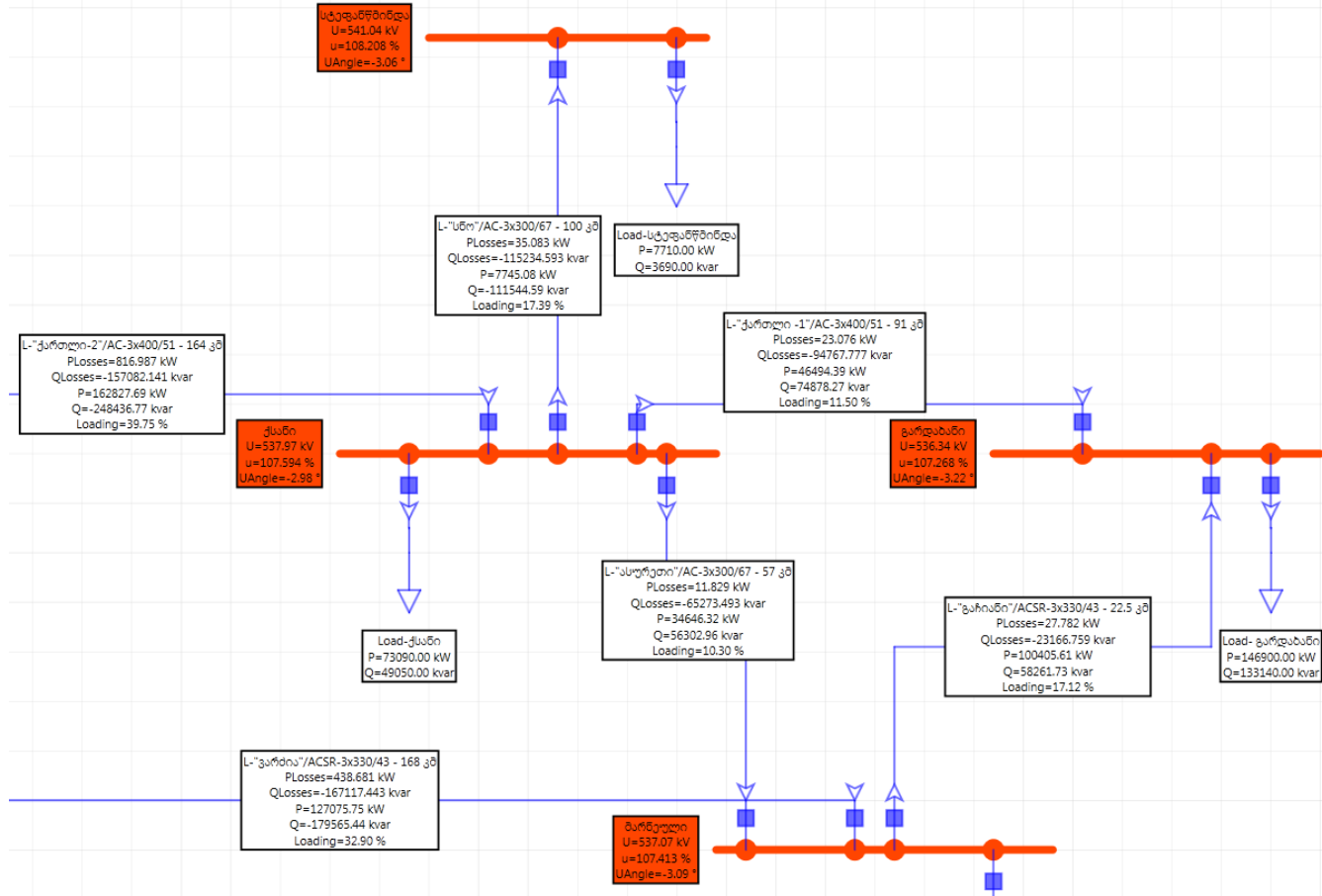
კვანძის დასახელება	U, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	u%, ძაბვა პროცენტულად
ენგურ-ჰესი	500,0	0,0	100,0
ჯვარი	507,55569	0,32878	101,51114
ლაჯანური	528,19795	0,28374	105,63959
წყალტუბო	523,28571	-0,5054	104,65714
ხუდონი	512,32486	1,0697	102,46497
მარნეული	537,06696	-3,09135	107,41339
ქსანი	537,97169	-2,97904	107,59434
გარდაბანი	536,34195	-3,22371	107,26839
სტეფანწმინდა	541,04053	-3,06251	108,20811
ნენსკრა	512,11396	1,02868	102,42279
ზესტაფონი	522,92979	-1,17484	104,58596
ახალციხე	528,77517	-1,67119	105,75503

„ცხრილი 4.12.“ საქართველოს ელექტროსისტემის ავტონომიური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის შედეგების შეჯამება “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

ΔP , კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიუ რი დანაკარგები ქსელში	ΔQ , კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიუ რი დანაკარგები ქსელში	P , კვტ - დატვირთვა	Q , კვარ - დატვირთვა	P კვტ - ელექტროსა დგურთა გენერაცია	Q კვარ - ელექტროსა დგურთა გენერაცია	P , კვტ - მაბალან სებელი კვანძის კვანძურ ი სიმძლავ რე
7413,09	-1142643,18	542350	444330	810000	388000	-260,37

როგორც ცხრ.4.12-დან ვგებულობთ ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მინიმალური დატვირთვის დროს აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინააღობაში) აღწევს 7,41 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (810 მგვტ) 0,91%-ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემდაღი ძაბვის ქსელის რეაქტიული ჯამური დატვირთვაა 444,33 მგვარ, მეორეხრივ ზემდაღი ძაბვის ხაზებში გვაქვს 1142,6 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე, რაც საბოლოოდ

სისტემაწარმოქმნელ ქსელში კმნის რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიურ სიჭარბეს.



ნახ.4.7. ავტონომიური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონის მოდელი “NEPLAN” პროგრამაში

ამ დროს რეაქტიული სიმძლავრის განსაკუთრებული სიჭარბით ხასიათდება აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონი (სავარაუდოდ ამ ტერიტორიებზე მდებარე 500 კვ ძაბვის ეგხ-თა დიდი სიგრძისა და მცირე დატვირთვის ფონზე), რის საფუძველზეც ძაბვები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში („ქსანი“, „სტეფანწმინდა“, „გარდაბანი“, „მარნეული“) ამალღებულია დასაშვებზე მეტად, იხ.ცხრ.4.11 და ნახ.4.7.

ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ნუმერაციისა და ცხრ.4.11-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 507,55 \text{ კვ}; \quad U_2 = 522,93 \text{ კვ}; \quad U_3 = 523,28 \text{ კვ}; \quad U_4 = 537,97 \text{ კვ}; \quad U_5 = 536,34 \text{ კვ}; \\ U_6 = 541,04 \text{ კვ}; \quad U_7 = 528,77 \text{ კვ}; \quad U_8 = 537,06 \text{ კვ}; \quad U_9 = 528,19 \text{ კვ}; \quad U_{10} = 512,32 \text{ კვ}; \\ U_{11} = 512,11 \text{ კვ}.$$

ჩვენი მიდგომით ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [29, 41]:

$$0,98 \cdot U_{\bar{6}} \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_{\bar{6}} \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ, მინიმალური დატვირთვისას ძაბვები მთელ რიგ კვანძებში („2“, „3“, „4“, „5“, „6“, „7“, „8“, „9“) ამალღებულია დასაშვებზე მეტად. [35]-ში განხილულ მათემატიკური მოდელის მიხედვით ამ შემთხვევაში მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა განიხილება იმ კვანძში, სადაც ძაბვის გადახრა მაქსიმალურია (კრიტიკული კვანძი). ჩვენს შემთხვევაში ეს გახლავთ „6“ კვანძი - „სტეფანწმინდა“. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „6“ კვანძისათვის, გვექნება:

$$Q_{36} \cdot X_{66} = (U_{6 \text{ მოთ}} - U_6) \cdot U_{\bar{6}} \\ Q_{36} \cdot 80,3 = (515 - 541,04) \cdot 500 \\ Q_{36} = -162,14 \text{ მგვარ};$$

ამრიგად, მათემატიკური მოდელის მიხედვით „6“ კვანძ ლაჯანურში დადგმული მაკომპენსირებელი დანადგარი უნდა მუშაობდეს $Q_{36} = -162,14$ მგვარ სიმძლავრით. ვნახოთ (3.11) – ის მიხედვით როგორ შეიცვლება ძაბვათა მნიშვნელობები კვანძებში ამ მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16}}{U_{\bar{6}}} = \frac{-162,14 \cdot 3,187}{500} = -0,86 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 506,69 \text{ კვ}; \\ \delta U_2 = \frac{Q_{36} \cdot X_{26}}{U_{\bar{6}}} = \frac{-162,14 \cdot 18,81}{500} = -6,1 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 515,9 \text{ კვ};$$

$$\begin{aligned} \delta U_3 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{36}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 15}{500} = -4,86 \text{ კვ; } \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 518,42 \text{ კვ;} \\ \delta U_4 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{46}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 49,04}{500} = -15,9 \text{ კვ; } \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 522,07 \text{ კვ;} \\ \delta U_5 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{56}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 45,15}{500} = -14,64 \text{ კვ; } \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 521,7 \text{ კვ;} \\ \delta U_6 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{66}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 80,3}{500} = -26,04 \text{ კვ; } \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;} \\ \delta U_7 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{76}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 22,66}{500} = -7,348 \text{ კვ; } \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 521,42 \text{ კვ;} \\ \delta U_8 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{86}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 44,17}{500} = -14,32 \text{ კვ; } \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 522,74 \text{ კვ;} \\ \delta U_9 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{96}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 15}{500} = -4,86 \text{ კვ; } \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 523,33 \text{ კვ;} \\ \delta U_{10} &= \frac{Q_{36} \cdot X_{106}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 2,655}{500} = -0,86 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 511,46 \text{ კვ;} \\ \delta U_{11} &= \frac{Q_{36} \cdot X_{116}}{U_5} = \frac{-162,14 \cdot 2,655}{500} = -0,86 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 511,25 \text{ კვ;} \end{aligned}$$

„6“ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შედეგად რამოდენიმე კვანძში („2“, „3“, „4“, „5“, „7“, „8“, „9“) ძაბვები ისევ დასაშვებ ფარგლებს გარეთაა (ამაღლებულია). [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეკუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „6“ კვანძისა და I იტერაციის შედეგად ახლად გამოვლენილი კრიტიკული კვანძის, ჩვენს შემთხვევაში „9“, მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{39} \cdot 15 = (515 - 541,04) \cdot 500 = -13020 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{39} \cdot 33,39 = (515 - 528,19) \cdot 500 = -6595 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია: $Q_{36} = -136,71$ მგვარ; $Q_{39} = -136,09$ მგვარ.

ვნახოთ აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმა „6“ და „9“ კვანძებში როგორ შეცვლის ძაბვებს კვანძებში.

II იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{39} \cdot X_{19}}{U_6} = \frac{-136,71 \cdot 2,665 - 136,09 \cdot 2,669}{500} = -1,59 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(2)}$$

$$= U_1^{(0)} + \delta U_1 = 505,96 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში, შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -9,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(2)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 513,89 \text{ კვ}; \quad \delta U_3 = -9 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(2)} = U_3^{(0)} +$$

$$\delta U_3 = 514,28 \text{ კვ}; \quad \delta U_4 = -17,48 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(2)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 520,49 \text{ კვ}; \quad \delta U_5 =$$

$$-16,44 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(2)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 519,19 \text{ კვ}; \quad \delta U_6 = -25,95 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(2)} = U_6^{(0)} +$$

$$\delta U_6 = 515,09 \text{ კვ}; \quad \delta U_7 = -10,44 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(2)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 518,33 \text{ კვ}; \quad \delta U_8 =$$

$$-16,18 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(2)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 520,89 \text{ კვ}; \quad \delta U_9 = -13,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(2)} = U_9^{(0)} +$$

$$\delta U_9 = 515 \text{ კვ}; \quad \delta U_{10} = -1,59 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(2)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 510,73 \text{ კვ}; \quad \delta U_{11} =$$

$$-1,59 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(2)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 510,52 \text{ კვ}.$$

II იტერაციის შედეგების მიხედვით რამოდენიმე კვანძში („4“, „5“, „6“, „7“, „8“) ძაბვები ისევ დასაშვებ ფარგლებს გარეთაა (ამაღლებულია). ამიტომ აქაც იგივე მსჯელობიდან გამომდინარე (3.10) მათემატიკური მოდელი შედეგადად საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“ და II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 = (515 - 541,04) \cdot 500 = -13020 \\ Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 = (515 - 537,07) \cdot 500 = -11035 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 = (515 - 528,19) \cdot 500 = -6595 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{36} = -74,467 \text{ მგვარ}; \quad Q_{38} = -122,46 \text{ მგვარ}; \quad Q_{39} = -108,75 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ შემთხვევაში.

III იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18}}{U_6} = \frac{-74,467 \cdot 2,665 - 122,46 \cdot 2,669 - 108,75 \cdot 3,187}{500}$$

$$= -1,74 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(3)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,55 - 1,74 = 505,81 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში, შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -10,47 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(3)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 522,93 - 10,47 = 512,46 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -9,84 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(3)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 523,28 - 9,84 = 513,44 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -21,375 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(3)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 537,97 - 21,375 = 516,59 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -21,92 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(3)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 536,34 - 21,92 = 514,42 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -26,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(3)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 541,04 - 26,04 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -12,57 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(3)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 528,77 - 12,57 = 516,2 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -22,06 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(3)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 537,06 - 22,06 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -13,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(3)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 528,19 - 13,19 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -1,74 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(3)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 512,32 - 1,74 = 510,58 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -1,74 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(3)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 512,11 - 1,74 = 510,37 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ III იტერაციის შემდეგ ძაბვის მუშა მნიშვნელობები „4“ და „7“ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად. ამასთან, გადახრა უფრო მეტია „4“ კვანძში ამიტომ აქ (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“ და III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „4“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 = (515 - 537,97) \cdot 500 = -11485 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 = (515 - 541,04) \cdot 500 = -13020 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 = (515 - 537,07) \cdot 500 = -11035 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 = (515 - 528,19) \cdot 500 = -6595 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{34} = -106,39 \text{ მგვარ}; Q_{36} = -48,78 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -52,57 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -104,18 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

IV იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19}}{U_5} \\ &= \frac{-106,39 \cdot 2,648 - 48,78 \cdot 2,665 - 52,57 \cdot 2,669 - 104,18 \cdot 3,187}{500} \\ &= -1,77 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(4)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,55 - 1,77 = 505,78 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -10,76 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(4)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 522,93 - 10,76 = 512,17 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -9,98 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(4)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 523,28 - 9,98 = 513,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -22,97 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(4)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 537,97 - 22,97 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -22,24 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(4)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 536,34 - 22,24 = 514,1 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -26,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(4)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 541,04 - 26,04 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -12,77 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(4)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 528,77 - 12,77 = 516 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -22,06 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(4)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 537,06 - 22,06 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -13,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(4)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 528,19 - 13,19 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -1,77 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(4)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 512,32 - 1,77 = 510,55 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -1,77 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(4)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 512,11 - 1,77 = 510,34 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ IV იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები ყველა კვანძში დასაშვებ ფარგლებშია გარდა „7“ კვანძისა, ამიტომ (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“, III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „4“ და IV იტერაციისას გამოვლენილ „7“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად გვექნება:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{37} \cdot 22,6 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 &= (515 - 537,97) \cdot 500 = -11485 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{37} \cdot 22,66 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 &= (515 - 541,04) \cdot 500 = -13020 \\ Q_{34} \cdot 22,6 + Q_{36} \cdot 22,66 + Q_{37} \cdot 28,48 + Q_{38} \cdot 23,69 + Q_{39} \cdot 15,61 &= (515 - 528,77) \cdot 500 = -6885 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{37} \cdot 23,69 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 &= (515 - 537,07) \cdot 500 = -11035 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{37} \cdot 15,61 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 &= (515 - 528,19) \cdot 500 = -6595 \end{aligned} \right.$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{34} = -102,33 \text{ მგვარ}; Q_{36} = -48,76 \text{ მგვარ}; Q_{37} = -34,44 \text{ მგვარ}; Q_{38} \\ = -42,8 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -94,32 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში აღნიშნულ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

V იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{37} \cdot X_{17} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19}}{U_6} \\ = \frac{-102,33 \cdot 2,648 - 48,76 \cdot 2,665 - 34,44 \cdot 2,763 - 42,8 \cdot 2,669 - 94,32 \cdot 3,187}{500}$$

$$= -1,82 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(5)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,55 - 1,82 = 505,73 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -11,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(5)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 522,93 - 11,19 = 511,74 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -10,29 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(5)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 523,28 - 10,29 = 512,99 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -22,97 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(5)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 537,97 - 22,97 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -22,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(5)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 536,34 - 22,19 = 514,15 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -26,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(5)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 541,04 - 26,04 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -13,77 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(5)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 528,77 - 13,77 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -22,06 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(5)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 537,06 - 22,06 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -13,19 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(5)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 528,19 - 13,19 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -1,82 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(5)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 512,32 - 1,82 = 510,5 \text{ კვ};$$

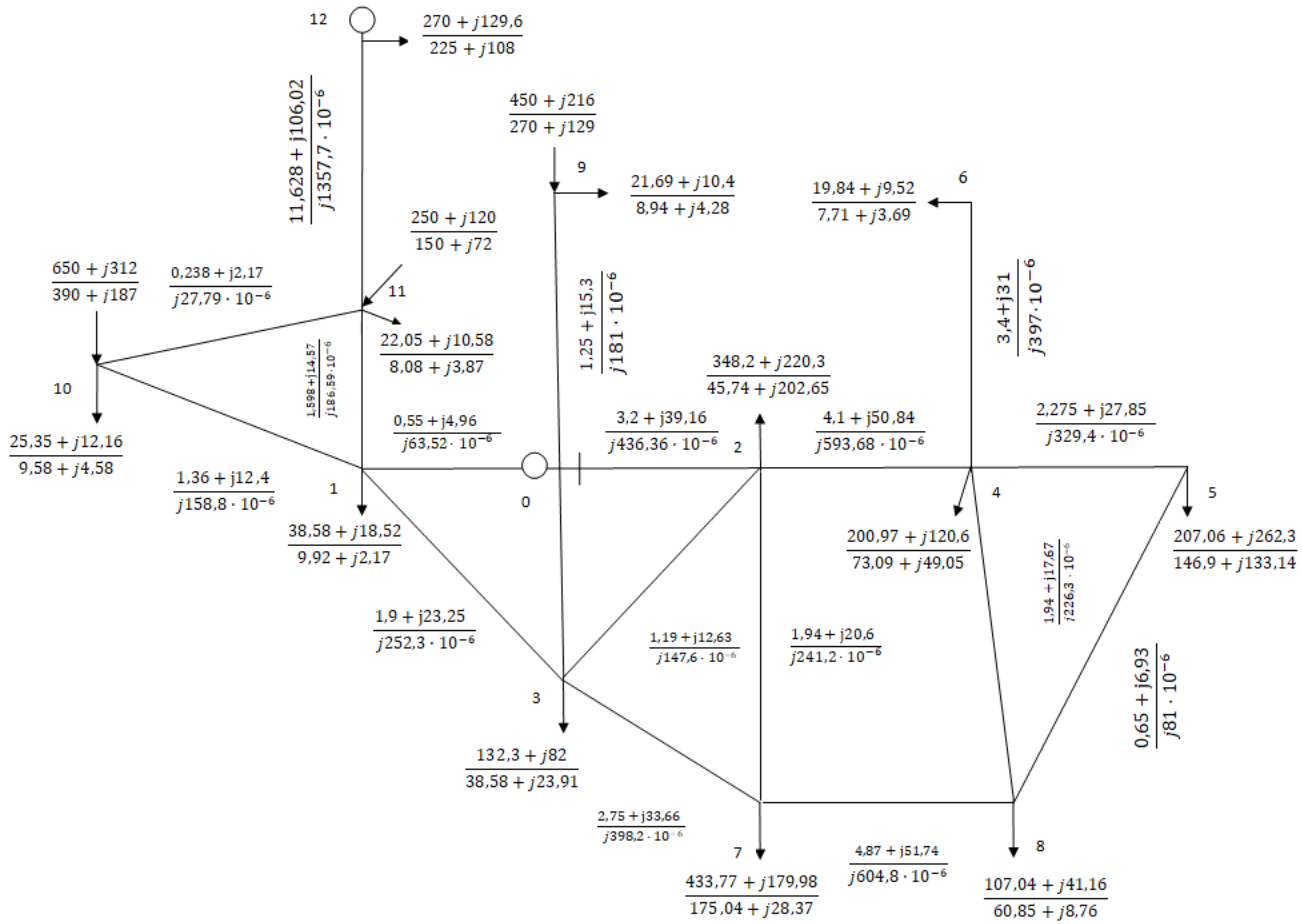
$$\delta U_{11} = -1,82 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(5)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 512,11 - 1,77 = 510,29 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ V იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები ყველა კვანძში დასაშვებ ფარგლებშია, ამით ანგარიში დასრულებულია.

4.4.2. სინქრონული პარალელური კავშირი რუსეთის ელექტროსისტემასთან

მოცემულის სცენარის დროს საქართველოს ელექტროსისტემა მუშაობს რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელურ სინქრონულ რეჟიმში. კერძოდ საქართველოს ელექტროსისტემიდან, კონკრეტულად „ნენსკრას“ და „ხუდონის“ გენერაციის კვანძებიდან, რუსეთის ელექტროსისტემაში 500 კვ ეგზ „კავკასიონით“ ექსპორტის

სახით საქართველოს ელექტროსისტემის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმისას გადაედინება 250 მგვტ სიმძლავრე, ხოლო მინიმალური დატვირთვისას 200 მგვტ სიმძლავრე. ქსელის ჩანაცვლების სქემა ნაჩვენებია ნახ.4.8-ზე.



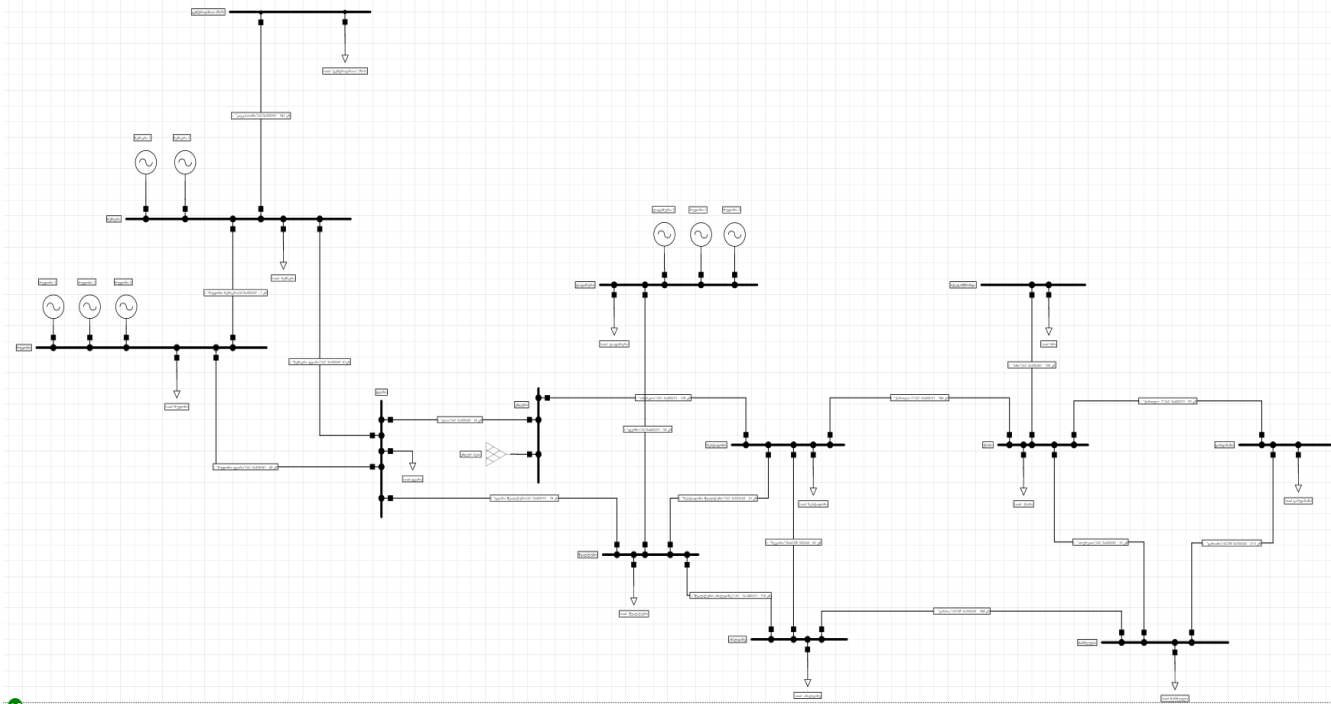
ნახ.4.8. საქართველოს პერსპექტიული 500 კვ ძაბვის ქსელის ჩანაცვლების სქემა რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელურ სინქრონულ კავშირისას

ნახაზზე კვანძთა აღნიშვნა იგივეა, რაც ავტონომიური სცენარისას უბრალოდ ემატება რუსეთის ელექტროსისტემის კვანძი „12“ - ცენტრალნაია.

აქაც ანგარიშის მეთოდოლოგია და მიმდინარეობა იგივეა, რაც ავტონომიური სცენარისას უბრალოდ ამ შემთხვევაში ჩანაცვლების სქემაში დამატებით გვაქვს რუსეთის ენერგოსისტემის ახალი კვანძი „12“ - ცენტრალნაია, აგრეთვე ნენსკრას „11“ და ცენტრალნაიას „12“ კვანძებს შორის დამაკავშირებელი 500 კვ ეგზ „კავკასიონი“, იხ.ნახ.4.8.

ამ სცენარის განხილვის დროსაც ნახ.4.8-ზე მოცემული ქსელის დამყარებული რეჟიმების ანგარიში, ძაბვის მუშა მნიშვნელობები კვანძებში და ქსელის ტექნიკურ-

ეკონომიკური მაჩვენებლები დადგინდა კომპიუტერულ-საინჟინრო პროგრამა „NEPLAN“-ში, იხ.ნახ.4.9.

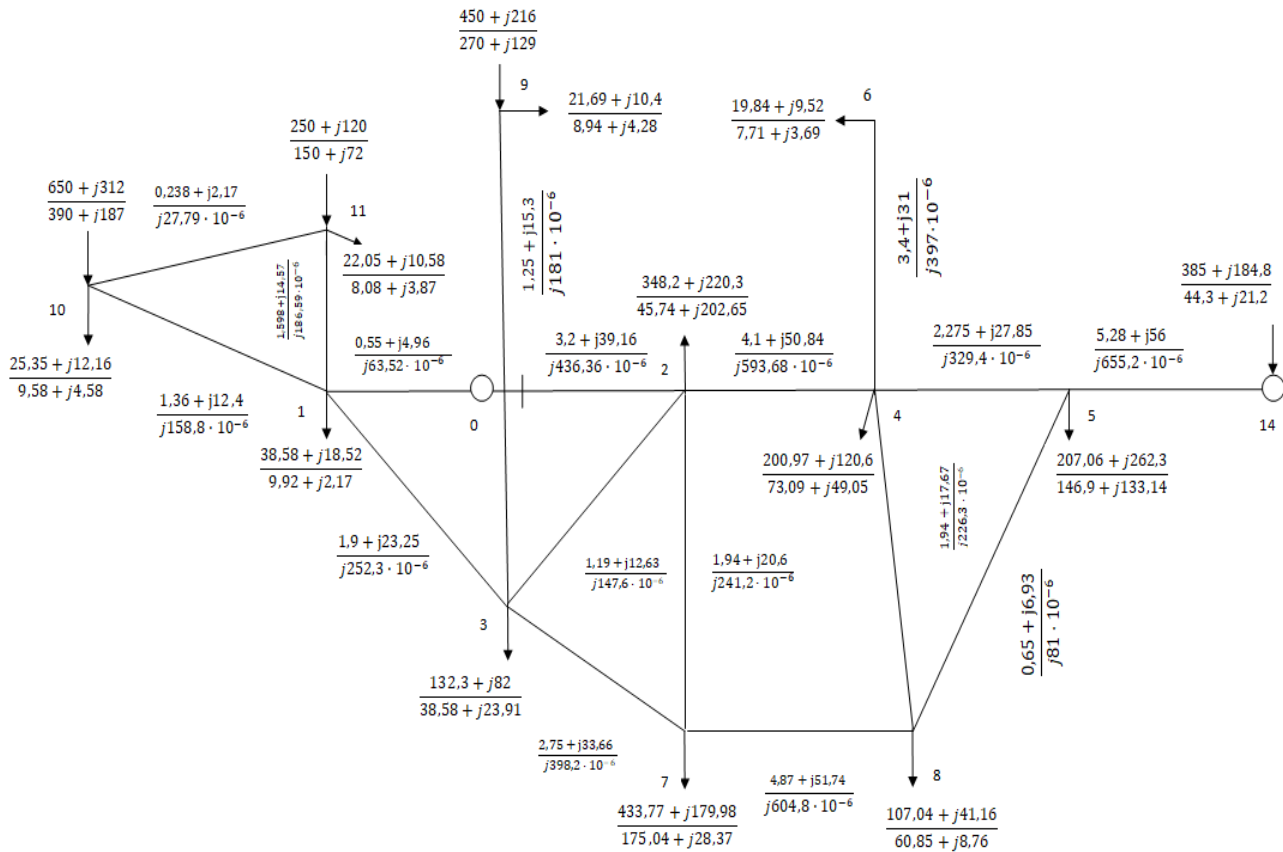


ნახ.4.9. საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელურ რეჟიმში ოპერირებისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის მოდელი“NEPLAN” პროგრამაში

ანგარიშის ძირითადი შედეგები და ამოხსნის სრული პროცედურა მოცემულია დანართ 3.1-ში.

4.4.3. სინქრონული პარალელური კავშირი აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან

მოცემული სცენარის დროს საქართველოს ელექტროსისტემა მუშაობს აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან სინქრონულ, პარალელურ რეჟიმში, ქსელის ჩანაცვლების სქემა ნაჩვენებია ნახ.4.10-ზე. კერძოდ „სამუხის“ კვანძიდან 500 კვ ეგხ „მუხრანის ველით“ სრულდება აზერბაიჯანის ელექტროსისტემიდან თურქეთის ელექტროსისტემისაკენ ელექტროენერჯის რეექსპორტი. საქართველოს ელექტროსისტემაში ეს სიმძლავრე ტრანზიტული ტვირთია, რომელიც სამუხის კვანძიდან შემოდის გარდაბნის კვანძში და შემდეგ ახალციხის კვანძიდან გადის თურქეთის ელექტროსისტემისაკენ, იხ.ცხრ.4.13.

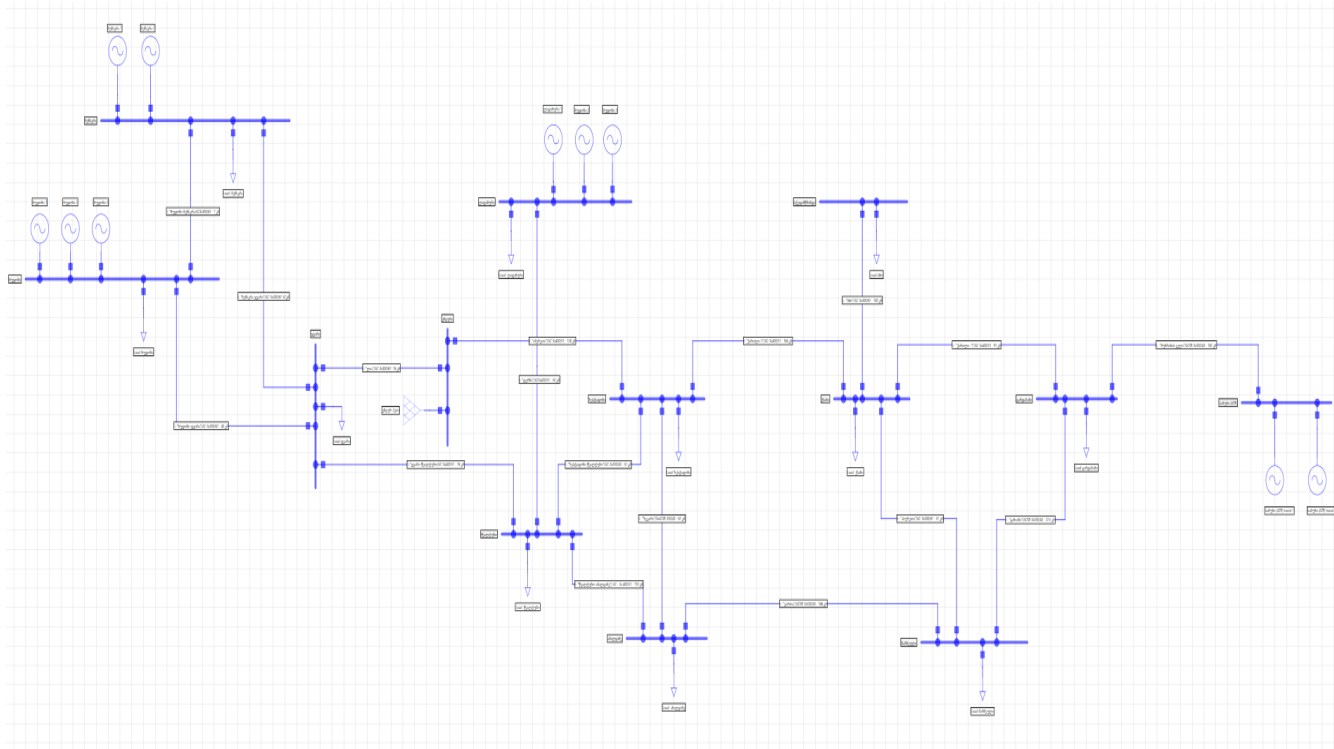


ნახ.4.10. საქართველოს პერსპექტიული 500 კვ ძაბვის ქსელის ჩანაცვლების სქემა აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელურ სინქრონულ კავშირისას

„ცხრილი 4.13.“ აზერბაიჯანის ელექტროსისტემიდან შემოდიანებული ელექტროენერგიის პერსპექტიული მნიშვნელობები P (მგვტ) + jQ (მგვარ)

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი			მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი		
2025	2026	2027	2025	2026	2027
349,5+j167,7	366,9+j176,1	385,3+j184,8	40,2+j19,3	42,2+j20,2	44,3+j21,2

აღნიშნული სცენარის განხილვის დროსაც ნახ.4.10-ზე მოცემული ქსელის დამყარებული რეჟიმების ანგარიში, ძაბვის მუშა მნიშვნელობები კვანძებში და ქსელის ტექნურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები დადგინდა კომპიუტერულ-საინჟინრო პროგრამა „NEPLAN“-ში, იხ. ნახ.4.11.



ნახ.4.11. საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელურ რეჟიმში ოპერირებისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის მოდელი“NEPLAN” პროგრამაში

ანგარიშის ძირითადი შედეგები და ამოხსნის სრული პროცედურა მოცემულია დანართ 3.2-ში.

საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ზემადალი ძაბვის ქსელში ჩატარებული ანგარიშის ძირითადი შედეგები შეჯამებულია ცხრ.4.14.-ში. აგრეთვე, მიღებული შედეგების გათვალისწინებით ცხრ.4.14-ში ნაჩვენებია საკონტროლო კვანძებში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის სტანდარტული მაკომპენსირებელ დანადგარები.

„ცხრილი 4.14.“ ჩატარებული ანგარიშის ძირითადი შედეგები

კვანძის დასახელება	მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი			მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი			რეკომენდირებული სტანდარტული მაკომპენსირებელი დანადგარი
	ავტ. რეჟიმი	პარალელი რუსეთთან	პარალელი აზერბაიჯანთან	ავტ. რეჟიმი	პარალელი რუსეთთან	პარალელი აზერბაიჯანთან	
ჯვარი	-	-	-	-	-	-	-
ზესტაფონი	-	-	-	-	-	-	-
წყალტუბო	-	-	-	-	-	-	-
ქსანი	-	-	-	-102,33	-104,49	-131,98	РОДЦ-60000/500Y1
გარდაბანი	-	-	-	-	-	-	-
სტეფანწმინ	-	-	-7,64	-48,76	-48,88	-50,12	РОДЦ-60000/500Y1
ახალციხე	-	-	-	-34,44	-44,47	-22,02	РОДЦ-60000/500Y1
მარნეული	-	-	-	-42,8	-43,34	-127,66	РОДЦ-60000/500Y1
ლაჯანური	-96,28	-105,15	-83,74	-94,32	-106,4	-91,53	РОДЦ-60000/500Y1
ხუდონი	-	-	-	-	-	-	-
ნენსკრა	-	-97,3	-	-	-	-	РОДЦ-60000/500Y1
ცენტრ-RUS	-	-9,02	-	-	-38,53	-	РОДЦ-60000/500Y1
სამუხი-AZE	-	-	-241,96	-	-	-117,42	2xРОДЦ-60000/500Y1

დასკვნები IV თავის მიმართ

1. საქართველოს ენერგოსისტემა, ბუნებრივი პირობებიდან გამომდინარე, დაპროექტებული და შექმნილია ჰიდროენერგეტიკული რესურსების ბაზაზე. იმის გამო, რომ წყლის რესურსი მკაცრი სეზონურობით გამოირჩევა, ლოგიკურია, რომ ჰიდროენერგეტიკაზე დაფუძნებული ქვეყნის ენერგოსისტემა ხასიათდებოდეს ელექტრული ენერჯის მოხმარებისა და გენერაციის სეზონური ასიმეტრიულობით. რაც გულისხმობს მოხმარების შედარებით დაბალ და გენერაციის მაღალ მაჩვენებელს ზაფხულში და მოხმარების მაღალ და გენერაციის დაბალ მაჩვენებელს ზამთარში. აღნიშნულ პრობლემას კიდევ უფრო მეტად ამძიმებს ელექტროენერჯის მოხმარების ზრდის ტენდენცია. ამიტომ, მეტად აქტუალური და ფუნდამენტალურია დაგეგმილი ჰიდროენერგეტიკული პროექტების განხორციელება და მათი ექსპლუატაციაში დროული შესვლა, რომლის შემდეგ ქვეყანა დიდ ნაბიჯს გადადგამს ენერგეტიკული დამოუკიდებლობისაკენ და მზად შემხვდება მომავალ გამოწვევებს.
2. საქართველო, თავისი გეოგრაფიული მდებარეობიდან გამომდინარე, მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს კავკასიის (შავი ზღვის აუზის ქვეყნების) რეგიონში დაგეგმილი ენერგეტიკულ ამოცანათა გადაჭრაში, რაც გულისხმობს ამ ქვეყნებს შორის ელექტროენერჯის მიმოცვლას. დღეისათვის არსებული შიდასასისტემო და სისტემათაშორისი ქსელი სრულად ვერ უზრუნველყოფს მისდამი დაკისრებულ ამოცანებს, მეტიც მაშინაც კი, როცა ყველა ელემენტი არის მწყობრში და ყველა პარამეტრი ნორმის ფარგლებშია, საქართველოს ელექტროსისტემის მუშაობა შეესაბამება „განგაშის რეჟიმს“. მაშასადამე, საქართველოს გადამცემი ქსელის ყველაზე კრიტიკულ პრობლემას წარმოადგენს კვების უსაფრთხოება და სწორედ ელექტრული სისტემის საიმედოობის დონის ამაღლება გახლავთ საქართველოს გადამცემი ქსელის განვითარების ლაიტმოტივი მომავალში და ამ ჭრილში განიხილება სისტემაწარმომქნელ

ქსელში დაგეგმილი ზემადალი ძაბვის 500 კვ ეგზ-თა პროექტების განხორციელება.

3. საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ზემადალი ძაბვის პერსპექტიულ ქსელში გაანგარიშებულ იქნა კვანძების საკუთარ და ურთიერთ აქტიური/რეაქტიული წინაღობები.
4. სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები უნდა იყოს რეგულირებადი, რათა ადგილი ჰქონდეს ძაბვის მდორე და არა უხემ რეგულირებას. სასურველია, რომ ეს დანადგარები იყოს ახალი თაობის FACTS Devices.
5. ნაშრომში მიღებული მათემატიკური მოდელის საშუალებით, გადაწყვეტილია საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ზემადალი ძაბვის პერსპექტიულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი. აღნიშნული ამოცანა განვიხილეთ საქართველოს ელექტროსისტემის სამი შესაძლო სცენარით (ავტონომიური რეჟიმი, სინქრონული პარალელური კავშირი რუსეთთან, სინქრონული პარალელური კავშირი აზერბაიჯანთან) ოპერირებისას. თითოეული სცენარის განხილვა მიმდინარეობს საქართველოს ენერგოსისტემის პერსპექტიული დატვირთვის ორი ზღვრული (მაქსიმალური, მინიმალური) რეჟიმის მიხედვით.
6. როგორც გამოთვლებმა გვიჩვენა, საქართველოს 500 კვ ძაბვის პერსპექტიული სისტემაწარმომქნელი ქსელის სხვადასხვა სცენარით ოპერირებისას გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე და ძაბვათა პრობლემები საკონტროლო კვანძებში, განსაკუთრებით მინიმალური დატვირთვის რეჟიმებში. შესაბამისად, საჭირო ხდება ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსება, რათა საკონტროლო კვანძებში ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები შევინარჩუნოთ დასაშვებ ფარგლებში.

ძირითადი შედეგები და ზოგადი დასკვნები

მოცემულ სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობისა და კვლევის პროცესში მიღებულ იქნა შემდეგი ზოგადი დასკვნები და შედეგები:

1. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულად მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს და კომპენსაციის შედეგად გამოწვეულ მთელ რიგ თანმდევ ეფექტს: ძაბვის რეგულირება; ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლება; ენერგოსისტემის მუშაობის საიმედოობის გაზრდა და სხვა. მთლიანი ქსელის აუცილებელი გათვალისწინების თვალსაზრისით ამ პრობლემას ელექტროენერგეტიკაში ანალოგია თითქმის არ მოეპოვება.
2. აღნიშნულ ნაშრომში, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი განიხილება შემდეგი სტრატეგიის მიხედვით:
 - სისტემური მიდგომის პრინციპი გამოყენებული იქნება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მიმართ, ამ ქსელის კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და დაყენების ადგილის შერჩევის კრიტერიუმად განიხილება ძაბვის ხარისხი აღნიშნული ქსელის კვანძებში;
 - თუ მივიღეთ, რომ ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით, ამ ქსელის რომელიმე კვანძში საჭიროა გარკვეული სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, მაშინ ეს სიმძლავრე ოპტიმალურად გადანაწილდება სისტემაწარმომქმნელი ქსელის მოცემულ კვანძში მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.
3. ნაშრომში მიღებულია სისტემაწარმომქმნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომელიც შედგენილია ქსელის კვანძების რეზულტატიური გენერაცია/დატვირთვებისა და კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ წინააღმართა გამოყენებით. ამ მოდელის საფუძველს წარმოადგენს რეალურ სახასიათო

- რეჟიმში მუშა ძაბვის გადახრის სიდიდე მოცემულ კვანძში, ხოლო კრიტერიუმს კი ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე განსახილველ კვანძში.
4. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევისათვის მიღებული მათემატიკური მოდელი მეტად მოსახერხებელი და ეფექტურია. ის საშუალებას გვაძლევს მუშა ძაბვების ანალიზის შემდგომ შევირჩიოთ ყველაზე კრიტიკული კვანძები (კვანძი) და მათ მიმართ შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა და მივიღოთ აღნიშნულ კვანძებში საჭირო მაკომპენსირებელ დანადგართა მნიშვნელობები. მოდელი ითვალისწინებს სისტემაწარმომქნელი ქსელის თითოეულ კვანძთან ურთიერთგავლენას და წარმატებით შეუძლია მოხსნას ძაბვათა პრობლემები უკლებლივ ყველა კვანძში.
 5. ელექტროსისტემის მაქსიმალურ და მასთან მიახლოებულ რეჟიმებში სისტემაწარმომქნელი ქსელის ზოგიერთ კვანძში, სადაც მიერთებულია შედარებით დიდი ჯამური დატვირთვის მქონე მანაწილებელი ქსელი შესაძლოა მოითხოვებოდეს რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის მქონე მაკომპენსირებელი დანადგარის განთავსება, რომლის კრიტერიუმად მიღებულია ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე ამ კვანძში. ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით, კერძოდ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაციის კუთხით, მიზანშეწონილია, რომ აღნიშნული სიმძლავრე ოპტიმალურად გადაანაწილდეს აღნიშნულ კვანძთან მიერთებულ უფრო დაბალი დონის ძაბვის მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ეკონომიკურობის კრიტერიუმის გამოყენებით.
 6. ნაშრომში მიღებულია სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძისათვის ძაბვის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული Q_c რეაქტიული სიმძლავრის მასთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის ოპტიმალურად გადაანაწილების (ეკონომიკურობის კრიტერიუმის მიხედვით) მათემატიკური მოდელი.
 7. ნაშრომში მიღებული მათემატიკური მოდელის გამოყენებით საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ზემალაღი ძაბვის პერსპექტიულ ქსელში გადაწყვეტილია რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი. აღნიშნული

ამოცანა განვიხილეთ საქართველოს ელექტროსისტემის სამი შესაძლო სცენარით (ავტონომიური რეჟიმი, სინქრონული პარალელური კავშირი რუსეთთან, სინქრონული პარალელური კავშირი აზერბაიჯანთან) ოპერირებისას. თითოეული სცენარის განხილვა მიმდინარეობს საქართველოს ენერგოსისტემის პერსპექტიული დატვირთვის ორი ზღვრული (მაქსიმალური, მინიმალური) რეჟიმის მიხედვით.

8. როგორც გამოთვლებმა გვიჩვენა, საქართველოს 500 კვ ძაბვის პერსპექტიული სისტემაწარმომქნელი ქსელის სხვადასხვა სცენარით ოპერირებისას გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე და ძაბვათა პრობლემები საკონტროლო კვანძებში, განსაკუთრებით მინიმალური დატვირთვის რეჟიმებში. შესაბამისად, საჭირო ხდება ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსება, რათა საკონტროლო კვანძებში ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები შევინარჩუნოთ დასაშვებ ფარგლებში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Веников В.А., Жуков Л.А., Карташев И.И., Рыжов Ю.П. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях. -М.: "Энергия", 1975. - 136 с.
2. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. - М.: Энергия,1975. - 128 с.
3. მახარაძე გ. ელექტროენერგეტიკული (ელექტრული) სისტემები. - გამომცემლობა: „უნივერსალი“, თბილისი, 2015.
4. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисев М.С. Регулирование напряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат., 1985.
5. Мельников Н.А., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях. - М.: Энергия, 1968 - 153 с.
6. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.С., Солдаткина Л.А. электрические системы.Т.2. электрические сети.- Под редакции В.А. Веникова. : Высшая школа, 1971.
- 440с.
7. Рыжов Ю.П., Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М – Издательский дом МЭИ, 2007.
8. ჯაფარიძე დ. ზემდგომი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზების ცალმხრივად ჩართვის რეჟიმი. III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერჯია“ ISSN: 1512-0120, N2(98), 2021. - გვ. 62-67.
9. Pavlos S. Georgilakis., and Peter G. Vernados. Flexible AC Transmission System Controllers: An Evaluation. Materials Science Forum, Switzerland. Trans Tech Publications. Vol. 670, 2011. - pp. 399-406.
10. Eremia M., Cheng-Ching L., Abdel-Aty E. Advanced solutions in power systems (HVDC, FACTS, and artificial intelligence). Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016.

11. B.T. Ramakrishna Rao., P.Chanti., N. Lavanya., S. chandra Sekhar., Y. Mohan kumar.
Power System Stability Enhancement Using Fact Devices. Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 4(Version 1), April 2014. – pp. 339-344.
12. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н. Управляемые компактные линии электропередачи переменного тока. International conference “Energy of Moldova” – 2012.
13. Глазунов А.А., и Глазунов А.А. Электрические сети и системы. – М.: ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1960. – 368с.
14. Ceraolo M., Poli D. Fundamentals of electric power engineering. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014.
15. Eremia M., Electric power systems, electric networks. Romanian academy publishing house, Bucharest, 2005.
16. Eremia M., Shahidehpour M. Handbook of electrical power system dynamics. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
17. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат., 1990.
18. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.
19. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
20. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах - М.: Энергоиздат, 1981. - 200 с.
21. ჯაფარიძე დ. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის კრიტერიუმები და სტრატეგია. II საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერგია“ ISSN: 1512-0120, N4(96), 2020. - გვ. 5-8.

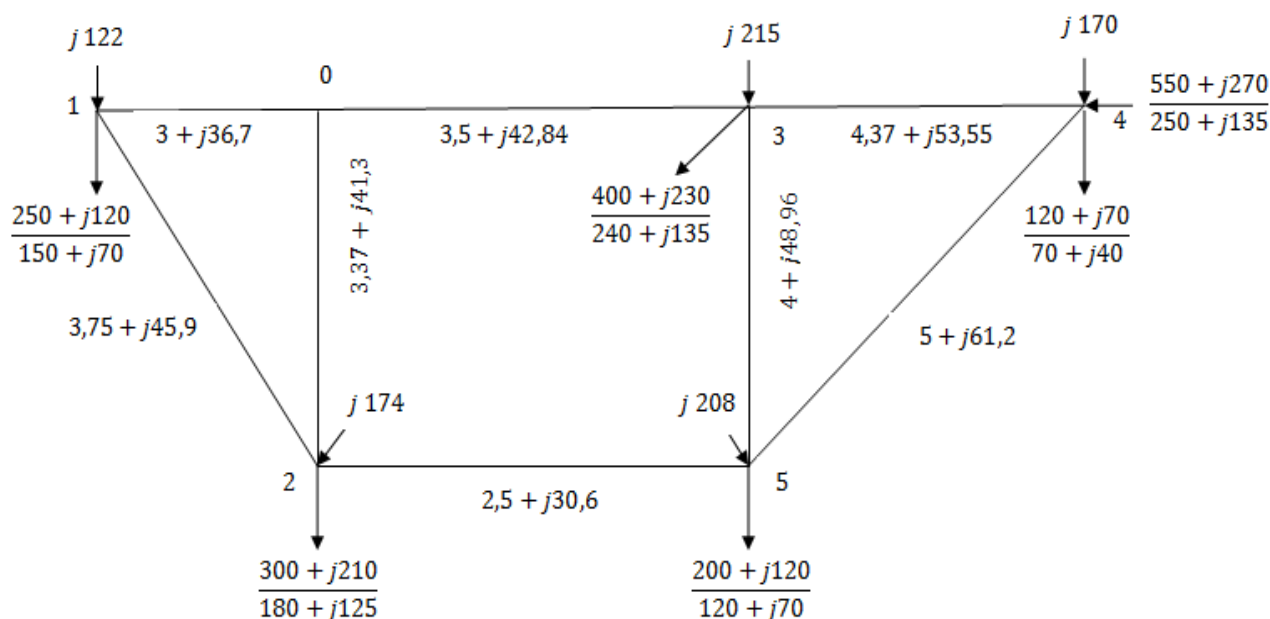
22. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკვივალენტობის პრინციპით. ენერგია. 4(12). 1999. გვ. 36-38.
23. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში. ენერგია. 4(16). 2000. გვ. 107-112.
24. მახარაძე გ. ახალაძე ფ. მკვებავი და მანაწილებელი ქსელების ინტერესთა ურთიერთგათვალისწინება რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციისას. ენერგია 3(71) 2014. გვ. 29-32.
25. ახალაძე ფ. მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია თანადაფინანსების პრინციპით. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის სამეცნიერო ჟურნალი „მოამბე“ 2(4) 2014.
26. Hofmann W., Schlabach J., Just W. Reactive power compensation: a practical guide. John Wiley & Sons Ltd, the atrium, southern gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, United Kingdom, 2012.
27. Leonard Grigsby L. Electric power generation, transmission, and distribution. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2012.
28. მახარაძე გ. ენეგოსისტემების რეჟიმების მართვა და ოპტიმიზაცია. გამომცემლობა „ტექნიკური-უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2005.
29. Baggini A. Handbook of power quality. John Wiley & Sons Ltd, the atrium, southern gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2008.
30. მახარაძე გ., სულაძე მ. ელექტრული ქსელების დაპროექტება. - გამომცემლობა: „უნივერსალი“, თბილისი, 2007.
31. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат., 1988.
32. Miller, T.J.E. Reactive power control in electric systems, Wiley, 1982.
33. Железко Ю.С., Карпов Ф.Ф. Учет потерь электроэнергии в сети энергосистемы при выборе компенсирующих устройств в распределительных сетях. - Промышленная энергетика, 1975, № 3, с. 38-40.

34. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М., Федин В.Т. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд- ние, 108 1983. - 112 с.
35. მახარაძე გ., ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის კრიტერიუმი და მათემატიკური მოდელი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული ISSN: 1512-0996, N4 (518), დეკემბერი 2020. - გვ. 105-112.
36. ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების გავლენა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებზე. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის სამეცნიერო ჟურნალი „მომამბე“ ISSN: 2233-3711, №2 (18), 2021. - გვ. 153-160.
37. ზივზივაძე ო., ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური გადანაწილება მანაწილებელ ქსელში. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული ISSN: 1512-0996, N3 (521), სექტემბერი 2021. - გვ. 123-129.
38. Jizhong Z. Optimization of power system operation. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
39. საქართველოს გადამცემი ქსელის განვითარების ათწლიანი გეგმა 2019-2029. გადამცემი სისტემის ოპერატორი „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა“, თბილისი, 2019.
40. Power system analysis software. NEPLAN AG Oberwachtstrasse 2 CH 8700 Küsnacht ZH. <https://www.neplan.ch>.
41. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М., Справочник по проектированию электрических сетей. М – Издательство „НЦ ЭНАС“, 2009.

დანართები

დანართი 1

მაგალითი №1 - განვიხილოთ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევის საკითხი 500 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემ ქსელში (დ.1.ნახ.1). ქსელის უბნებზე ნაჩვენებია ხაზთა გრძივი (აქტიური და რეაქტიული) წინაღობები, ხოლო სამომხმარებლო კვანძებში („1“, „2“, „3“, „5“) შესაბამისი კვანძური დატვირთვები მაქსიმალურ და მინიმალურ დატვირთვების რეჟიმებში. „0“ კვანძი მიჩნეულია მბალანსებელ და ბაზისურ კვანძად, ხოლო „4“ კვანძი გენერაციის კვანძია და მასთან მიერთებულია ელექტროსადგური. კვანძებში ნაჩვენებია ზემაღალი ძაბვის ხაზების მიერ მათ ტევადურ გამტარობაში გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე.



დ.1.ნახ.1 500 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემი ქსელი

ამოხსნა

მოცემული ქსელი სისტემაწარმომქნელია, ამიტომ აქ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევისას ძირითად კრიტერიუმად განიხლება ელექტროენერგიის ხარისხის კრიტერიუმი. კერძოდ, ძაბვის მოთხოვნილი დონე საკონტროლო კვანძებში [35]. აღნიშნულ ქსელში გამოყენებულია $AC - 3 \times 400/51$ [$r_0 = 0,025$; $x_0 = 0,306$; $b_0 = 3,62 \cdot 10^{-6}$] მარკის საჰაერო სადენი.

ქსელში მუშა ძაბვის გადახრის ზედა დასაშვებ ზღვრად მივიჩნით $+3\%$ ანუ $U_{დას.მაშ.} = 515$ კვ, ხოლო ქვედა დასაშვებ ზღვრად -2% ანუ $U_{დას.მინ.} = 490$ კვ.

$$0,98 \cdot U_{\bar{r}} \leq U_i \leq 1,03 \cdot U_{\bar{r}}$$

ქვემოთ ცხრილში (იხ.დ.1.ცხრ.1) მოცემულია კვანძების საკუთარ და ურთიერთ წინაღობები, კვანძთა რეზულტატიური აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეები და კვანძური ძაბვის მნიშვნელობები, გამოთვლილი (3.8) გამოსახულებით. ანგარიშის დროს მბალანსებელი კვანძის ძაბვად აღებულია $U_0 = 500$ კვ.

დ.1. „ცხრილი 1“ ქსელის ელექტრული და რეჟიმის პარამეტრები

კვანძი	1	2	3	4	5	
1	2,04+j24,77	0,8+j9,74	0,32+j3,87	0,44+j5,32	0,57+j6,97	
2	0,8+j9,74	1,82+j21,96	0,73+j8,73	1+j11,99	1,31+j15,72	
3	0,32+j3,87	0,73+j8,73	2,42+j29,32	2,01+j24,24	1,53+j18,44	
4	0,44+j5,32	1+j11,99	2,01+j24,24	4,37+j53,41	2,09+j25,34	
5	0,57+j6,97	1,31+j15,72	1,53+j18,44	2,09+j25,34	2,73+j33,21	
მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი	P, მგვტ	-250	-300	-400	430	-200
	Q, მგვარ	2	-36	-15	370	88
	U, კვ	500,53	508,09	518,27	542,9	521,35
მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი	P, მგვტ	-150	-180	-240	180	-120
	Q, მგვარ	52	49	80	265	138
	U, კვ	507,86	514,05	522,72	540,52	526,53

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი - რეზულტატიური კვანძური დატვირთვების მიხედვით ვიპოვოთ ძაბვათა გადახრები და მათი მუშა მნიშვნელობები კვანძებში, გამოსახულება (3.8):

$$\Delta U_1 = \frac{1}{U_0} \cdot \sum_{j=1}^5 (P_j R_{1j} + Q_j X_{1j}) = \frac{1}{500} \cdot [(-250) \cdot 2,04 + 2 \cdot 24,77 + (-300) \cdot 0,8 + (-36) \cdot 9,74 + (-400) \cdot 0,32 + (-15) \cdot 3,87 + 430 \cdot 0,44 + 370 \cdot 5,32 + (-200) \cdot 0,57 + 88 \cdot 6,97] = 0,535 \text{ კვ};$$

მუშა ძაბვა „1“ კვანძში იქნება $U_1 = U_0 + \Delta U_1 = 500 + 0,535 = 500,535 \text{ კვ};$

ანალოგიური გზით გამოვთვალოთ ძაბვათა გადახრები ყველა კვანძში და მივიღეთ: $\Delta U_2 = 8,059 \text{ კვ}; \Delta U_3 = 18,27 \text{ კვ}; \Delta U_4 = 42,9 \text{ კვ}; \Delta U_5 = 21,35 \text{ კვ}.$ შესაბამისად: $U_2 = 508,059 \text{ კვ}; U_3 = 518,27 \text{ კვ}; U_4 = 542,9 \text{ კვ}; U_5 = 521,35 \text{ კვ}.$

როგორც ვხედავთ ამ დროს ძაბვები „3“, „4“, „5“ კვანძებში გადახრილია დასაშვები ზღვრიდან, ამასთან ყველა ამ კვანძებისთვის დარღვეულია მარჯვენა ზედა საზღვარი. ამიტომ [35]-ში მოცემულ 2.1 ქვეპუნქტის მიხედვით(3.10) მათემატიკური მოდელი შევადგინოთ „4“ კვანძისათვის, სადაც ძაბვა ყველაზე მეტად გადახრილია დასაშვები ფარგლებიდან და მივიღებთ:

$$Q_{j4} \cdot X_{44} = (U_{\text{დას.ზღვ.}} - U_i) \cdot U_0$$

$$Q_{j4} \cdot 53,41 = (515 - 542,9) \cdot 500 = -27,9 \cdot 500$$

$$Q_{j4} = -261,18 \text{ მგვარ};$$

ამრიგად „4“ კვანძში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი უნდა მუშაობდეს $Q_{j4} = -261,18 \text{ მგვარ}$ სიმძლავრით, შევამოწმოთ აღნიშნული დანადგარი როგორ შეცვლის/იმოქმედებს სხვა კვანძებში ძაბვის სიდიდეზე. ძაბვათა გადახრა კვანძებში (3.11) გამოსახულების მიხედვით იქნება:

$$\delta_1 = \frac{Q_{j4} \cdot X_{14}}{U_0} = \frac{-261,8 \cdot 5,32}{500} = -2,77 \text{ კვ}; \quad \delta_2 = \frac{Q_{j4} \cdot X_{24}}{U_0} = \frac{-261,8 \cdot 11,99}{500} = -6,26 \text{ კვ}; \quad \delta_3 = \frac{Q_{j4} \cdot X_{34}}{U_0}$$

$$= \frac{-261,8 \cdot 24,24}{500} = -12,66 \text{ კვ}; \quad \delta_4 = \frac{Q_{j4} \cdot X_{44}}{U_0} = \frac{-261,8 \cdot 53,41}{500} = -27,9 \text{ კვ}; \quad \delta_5$$

$$= \frac{Q_{j4} \cdot X_{45}}{U_0} = \frac{-261,8 \cdot 25,34}{500} = -13,23 \text{ კვ}.$$

შესაბამისად „4“ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები კვანძებში გახლავთ:

$$U_1 = 500,35 - 2,77 = 497,58 \text{ კვ}; \quad U_2 = 508,059 - 6,26 = 501,835 \text{ კვ};$$

$U_3 = 518,27 - 12,66 = 505,835$ კვ; $U_4 = 542,9 - 27,9 = 515$ კვ; $U_5 = 521,35 - 13,23 = 508,12$ კვ.
 ამრიგად ყველა კვანძში ძაბვები დასაშვებ ფარგლებშია.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი - რეზულტატიური კვანძური დატვირთვების მიხედვით ვიპოვოთ ძაბვათა გადახრები და მათი მუშა მნიშვნელობები კვანძებში.

$$\Delta U_1 = \frac{1}{U_6} \cdot \sum_{j=1}^5 (P_j R_{1j} + Q_j X_{1j}) = \frac{1}{500} \cdot [(-150) \cdot 2,04 + 52 \cdot 24,77 + (-180) \cdot 0,8 + 49 \cdot 9,74 + (-240) \cdot 0,32 + 80 \cdot 3,87 + 180 \cdot 0,44 + 265 \cdot 5,32 + (-120) \cdot 0,57 + 138 \cdot 6,97] = 7,86 \text{ კვ};$$

მუშა ძაბვა „1“ კვანძში იქნება $U_1 = U_0 + \Delta U_1 = 500 + 7,86 = 507,86$ კვ;

ანალოგიური გზით გამოვთვალოთ ძაბვათა გადახრები ყველა კვანძში და მივიღეთ: $\Delta U_2 = 14,05$ კვ; $\Delta U_3 = 22,72$ კვ; $\Delta U_4 = 40,52$ კვ; $\Delta U_5 = 26,53$ კვ. შესაბამისად: $U_2 = 514,05$ კვ; $U_3 = 522,72$ კვ; $U_4 = 540,52$ კვ; $U_5 = 526,53$ კვ.

ამ დროსაც ძაბვები „3“, „4“, „5“ კვანძებში გადახრილია დასაშვები ზღვრიდან, ამასთან ყველა ამ კვანძებისთვის დარღვეულია მარჯვენა ზედა საზღვარი. ამიტომ [35]-ში მოცემულ 2.1 ქვეპუნქტის მიხედვით(3.10) მათემატიკური მოდელი შევადგინოთ „4“ კვანძისათვის, სადაც ძაბვა ყველაზე მეტად გადახრილია დასაშვები ფარგლებიდან და მივიღებთ:

$$Q_{j4} \cdot X_{44} = (U_{\text{დას.მ.ჯ.ს}} - U_i) \cdot U_6$$

$$Q_{j4} \cdot 53,41 = (515 - 540,52) \cdot 500 = -25,52 \cdot 500$$

$$Q_{j4} = -238,9 \text{ მგვარ};$$

ამრიგად „4“ კვანძში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი უნდა მუშაობდეს $Q_{j4} = -238,9$ მგვარ სიმძლავრით, შევამოწმოთ აღნიშნული დანადგარი როგორ იმოქმედებს სხვა კვანძებში ძაბვის სიდიდეზე. ძაბვათა გადახრა კვანძებში (3.11) გამოსახულების მიხედვით იქნება:

$$\delta_1 = \frac{Q_{j4} \cdot X_{14}}{U_6} = \frac{-238,9 \cdot 5,32}{500} = -2,54 \text{ კვ}; \quad \delta_2 = \frac{-238,9 \cdot 11,99}{500} = -5,72 \text{ კვ}; \quad \delta_3 = \frac{-238,9 \cdot 24,24}{500}$$

$$= -11,58 \text{ კვ}; \quad \delta_4 = \frac{-238,9 \cdot 53,41}{500} = -25,52 \text{ კვ}; \quad \delta_5 = \frac{-238,9 \cdot 25,34}{500} = -12,1 \text{ კვ}.$$

შესაბამისად „4“ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები კვანძებში გახლავთ:

$$U_1 = 507,86 - 2,54 = 505,32 \text{ კვ}; \quad U_2 = 514,05 - 5,72 = 508,33 \text{ კვ};$$

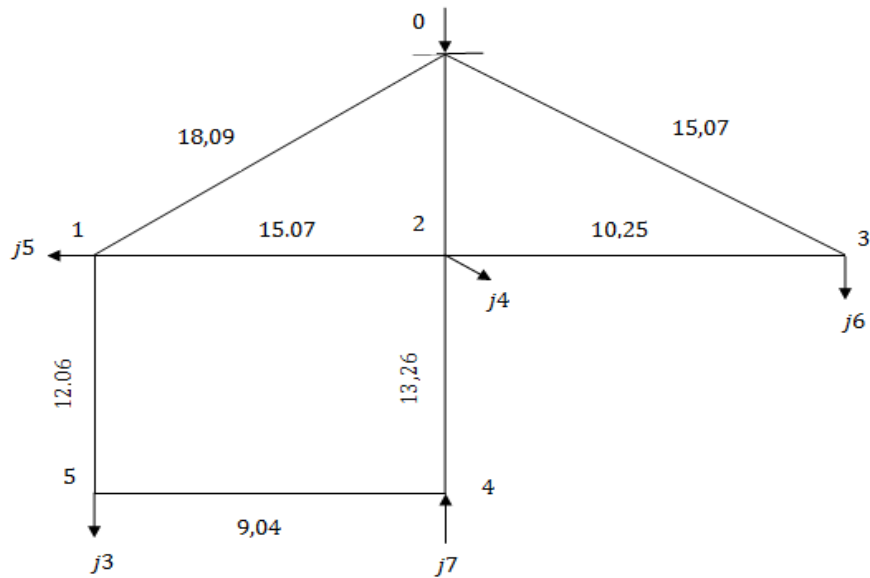
$$U_3 = 522,72 - 11,58 = 511,14 \text{ კვ}; \quad U_4 = 540,52 - 25,52 = 515 \text{ კვ}; \quad U_5 = 526,53 - 12,1 = 514,43 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ ყველა კვანძში ძაბვები დასაშვებ ფარგლებშია, ამით ანგარიში დასრულებულია.

დასკვნა - განხილულ ქსელში ძაბვის მნიშვნელობათა დასაშვებ ზღვრებში უზრუნველყოფის მიზნით „4“ კვანძში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში უნდა მუშაობდეს $Q_{j4} = -261,18$ მგვარ სიმძლავრით, ხოლო მინიმალური დატვირთვისას $Q_{j4} = -238,9$ მგვარ სიმძლავრით.

არსებობს მეორე უფრო ეკონომიკური გზაც, კერძოდ, რადგანაც „4“ კვანძი გენერაციისაა, მაშინ მაკომპენსირებელი დანადგარის როლი შეითავსოს ამ ელექტროსადგურის სინქრონულმა გენერატორებმა და ძაბვის ავტომატური რეგულატორის მეშვეობით ვარეგულიროთ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე და შესაბამისად ძაბვის დონე ამ კვანძში. კერძოდ, მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ელექტროსადგური გენერირებს 270 მგვარ რეაქტიულ სიმძლავრეს და ამ დროს ეს გენერაცია შემცირდეს 261,18 მგვარ-ით დაახლოებით 9 მგვარ-მდე. ხოლო მინიმალური დატვირთვისას ელექტროსადგურის მიერ გენერირებული 135 მგვარ რეაქტიულ სიმძლავრე მინიმუმამდე შემცირდეს და დამატებით დაიდგას რეგულირებად მაშუნტებელი რეაქტორი, რომელიც იმუშავებს $-103,9$ მგვარ სიმძლავრით.

მაგალითი №2 - განვიხილოთ 35 კვ ძაბვის რეგიონული მანაწილებელი ქსელი, დ.1.ნახ.2-ზე ნაჩვენებია ხაზთა აქტიური წინაღობები და კვანძთა დატვირთვა-გენერაციები. ნახაზზე „1“, „2“, „3“, „5“ დატვირთვის, ხოლო „4“ გენერაციის კვანძებია. მოცემული მანაწილებელი ქსელი მიერთებულია სისტემაწარმოქმნელი ქსელის „0“ კვანძთან, რომელიც განხილული ქსელისათვის მბაღანსებელ კვანძს წარმოადგენს. ამოცანის მიზანია ამ სისტემაწარმოქმნელი ქსელის კვანძისათვის ძაბვის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული $Q_j = j10$ მგვარ რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალურად (ეკონომიკური კრიტერიუმის მიხედვით) გადანაწილება მასთან მიერთებულ 35 კვ ძაბვის რეგიონალურ-მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის.



დ.1.ნახ.2 35 კვ ძაბვის რეგიონალური მანაწილებელი ქსელი

აღნიშნულ ქსელში გამოყენებულია AC – 50/8,0: [$r_0 = 0,603$ ომი/კმ] საჰაერო სადენი. ქვემოთ ცხრილში კი მოცემულია კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ წინაღობები - R_{ij} .

დ.1. „ცხრილი 2“ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური წინაღობები

კვანძი	1	2	3	4	5
1	9,18	3,99	2,37	5,95	7,34
2	3,99	6,33	3,77	5,38	4,79
3	2,37	3,77	8,37	3,2	2,85
4	5,95	5,38	3,2	13,67	10,35
5	7,34	4,79	2,85	10,35	14,24

(3.16)-ის მიხედვით შევადგინოთ მათემატიკური მოდელი მატრიცული სახით, ჩვენს შემთხვევაში იქნება:

$$\begin{pmatrix} 9,18 & 3,99 & 2,37 & 5,95 & 7,34 & \frac{35^2}{2} \\ 3,99 & 6,33 & 3,77 & 5,38 & 4,79 & \frac{35^2}{2} \\ 2,37 & 3,77 & 8,37 & 3,2 & 2,85 & \frac{35^2}{2} \\ 5,95 & 5,38 & 3,2 & 13,67 & 10,35 & \frac{35^2}{2} \\ 7,34 & 4,79 & 2,85 & 10,35 & 14,24 & \frac{35^2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ Q_{j3} \\ Q_{j4} \\ Q_{j5} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 6 \\ -7 \\ 3 \\ 10 \end{pmatrix}$$

შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{aligned} 9,18Q_{j1} + 3,99Q_{j2} + 2,37Q_{j3} + 5,95Q_{j4} + 7,34Q_{j5} + 612,5\lambda &= 56,45 \\ 3,99Q_{j1} + 6,33Q_{j2} + 3,77Q_{j3} + 5,38Q_{j4} + 4,79Q_{j5} + 612,5\lambda &= 44,6 \\ 2,37Q_{j1} + 3,77Q_{j2} + 8,37Q_{j3} + 3,2Q_{j4} + 2,85Q_{j5} + 612,5\lambda &= 63,3 \\ 5,95Q_{j1} + 5,38Q_{j2} + 3,2Q_{j3} + 13,67Q_{j4} + 10,35Q_{j5} + 612,5\lambda &= 5,83 \\ 7,34Q_{j1} + 4,79Q_{j2} + 2,85Q_{j3} + 10,35Q_{j4} + 14,24Q_{j5} + 612,5\lambda &= 43,26 \\ Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3} + Q_{j4} + Q_{j5} + 0 \cdot \lambda &= 10 \end{aligned}$$

მოგეხსენებათ „4“ კვანძი გენერაციისა და მასთან მიერთებულია ელექტროსადგური, ამიტომ ამ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დადგმა არ განვიხილოთ. ამის გათვალისწინებით განტოლებათა სისტემა მიიღებს სახეს.

I იტერაცია:

$$\begin{aligned} 9,18Q_{j1} + 3,99Q_{j2} + 2,37Q_{j3} + 7,34Q_{j5} + 612,5\lambda &= 56,45 \\ 3,99Q_{j1} + 6,33Q_{j2} + 3,77Q_{j3} + 4,79Q_{j5} + 612,5\lambda &= 44,6 \\ 2,37Q_{j1} + 3,77Q_{j2} + 8,37Q_{j3} + 2,85Q_{j5} + 612,5\lambda &= 63,3 \\ 7,34Q_{j1} + 4,79Q_{j2} + 2,85Q_{j3} + 14,24Q_{j5} + 612,5\lambda &= 43,26 \\ Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3} + Q_{j5} + 0 \cdot \lambda &= 10 \end{aligned}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია: $Q_{j1} = 4,7$ მგვარ; $Q_{j2} = 0,76$ მგვარ; $Q_{j3} = 5,67$ მგვარ; $Q_{j5} = -1,13$ მგვარ; $\lambda = 0,0082$;

როგორც ვხედავთ $Q_{j5} < 0$ და ამ კვანძისათვის დაირღვა შეზღუდვის (3.14) უტოლობა, ამიტომ ამ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა არამიზანშეწონილია. ამიტომ განტოლებათა სისტემა მიიღებს სახეს.

II იტერაცია:

$$\begin{aligned} 9,18Q_{j1} + 3,99Q_{j2} + 2,37Q_{j3} + 612,5\lambda &= 56,45 \\ 3,99Q_{j1} + 6,33Q_{j2} + 3,77Q_{j3} + 612,5\lambda &= 44,6 \\ 2,37Q_{j1} + 3,77Q_{j2} + 8,37Q_{j3} + 612,5\lambda &= 63,3 \\ Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3} + 0 \cdot \lambda &= 10 \end{aligned}$$

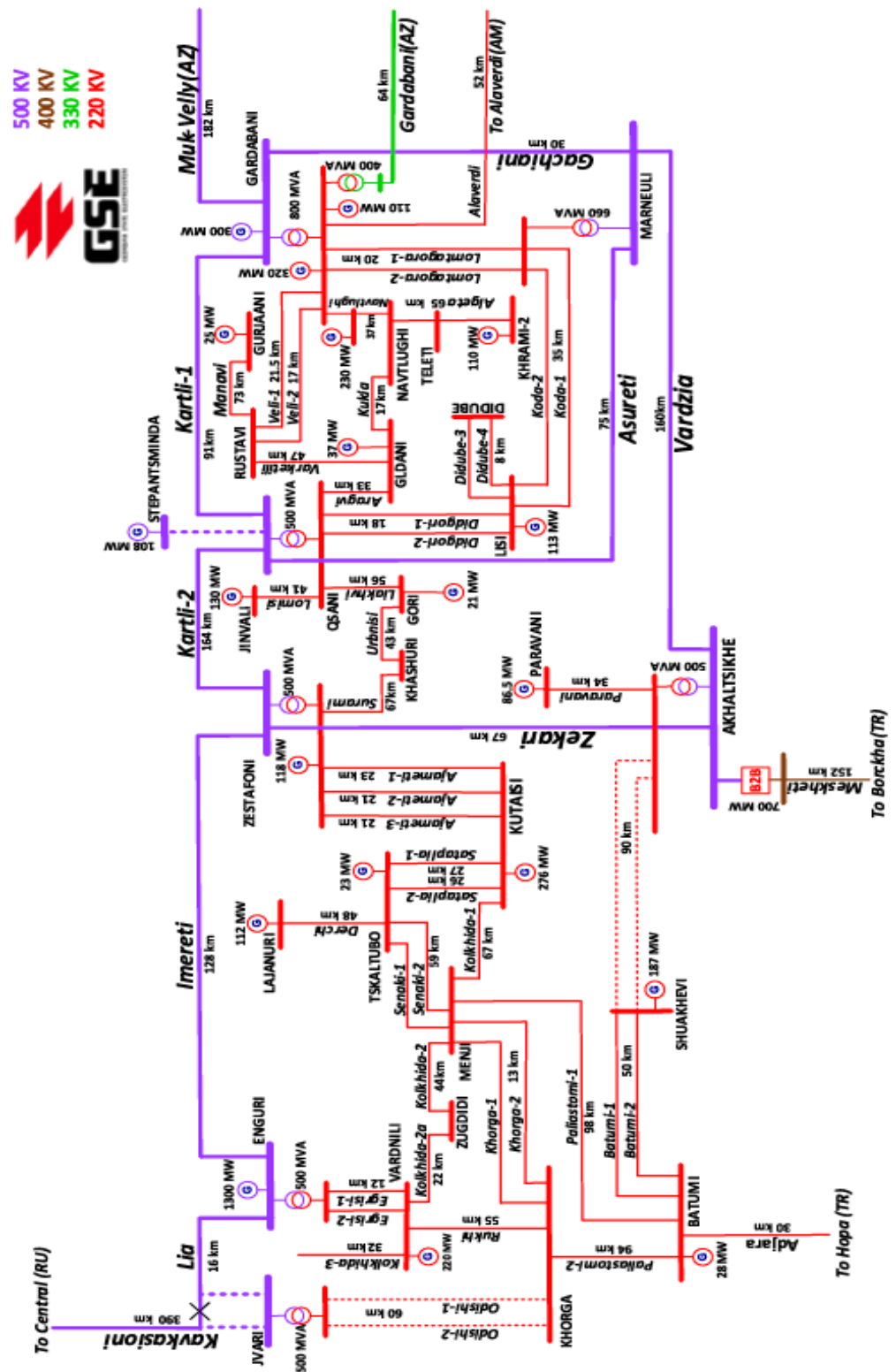
ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია: $Q_{j1} = 3,97$ მგვარ; $Q_{j2} = 0,37$ მგვარ; $Q_{j3} = 5,66$ მგვარ; $\lambda = 0,0083$;

ყველა კვანძისათვის სრულდება (3.14) შეზღუდვის უტოლობა, ამით ანგარიში დასრულებულია.

დასკვნა - სისტემაწარმომქნელი ქსელის „0“ კვანძიდან 10 მგვარ რეაქტიული სიმძლავრე ეკონომიკურად მიზანშეწონილია გადანაწილდეს მასთან მიერთებულ 35 კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის. (3.16) მათემატიკური მოდელის მიხედვით აღნიშნული სიმძლავრე გადანაწილდება შემდეგნაირად:

„1“ კვანძში დადგმული მაკომპენსირებელი დანადგარი იმუშავებს $Q_{j1} = 3,97$ მგვარ სიმძლავრით, „2“ კვანძში $Q_{j2} = 0,37$ მგვარ სიმძლავრით, ხოლო „3“ კვანძში $Q_{j3} = 5,66$ მგვარ სიმძლავრით. ავღნიშნოთ, რომ ეს დანადგარები მუშაობენ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში.

საქართველოს გადაწყვეტილების მიხედვით ატომური ენერჯის სისტემების განვითარების პროექტი 2019-2029



დ.2.სურ.1 საქართველოს ელექტროსისტემის სისტემაწარმოქმნელი ქსელი

სინქრონული პარალელური კავშირი რუსეთის ელექტროსისტემასთან

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი - “NEPLAN” პროგრამაში ჩატარებული ანგარიშების შედეგად დადგინდა საქართველოსა და რუსეთის ენერგოსისტემების პარალელური სინქრონული რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის საკონტროლო კვანძების ძაბვის მუშა მნიშვნელობები, შედეგები მოცემულია დ3.ცხრ.1-ში. დ3.ცხრ.2-ში შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

დ.3. „ცხრილი 1“ საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძური შედეგები “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

კვანძის დასახელება	U, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	α%, ძაბვა პროცენტულად
ლაჯანური	522,6988	-0,32359	104,53976
სტეფანწმინდა	512,02142	-6,32254	102,40428
ნენსკრა	518,21968	0,78166	103,64394
მარნეული	508,14741	-6,20012	101,62948
ცენტრალნაია (RUS)	520,1432	-5,44893	104,02864
ქსანი	509,58098	-6,15573	101,9162
ხუდონი	518,20799	0,91713	103,6416
ზესტაფონი	510,71446	-2,98755	102,14289
ახალციხე	514,46012	-3,39698	102,89202
ჯვარი	508,7854	0,11842	101,75708
ენგურ-ჰესი	500,0	0,0	100,0
წყალტუბო	515,07211	-1,65705	103,01442
გარდაბანი	505,92144	-6,42374	101,18429

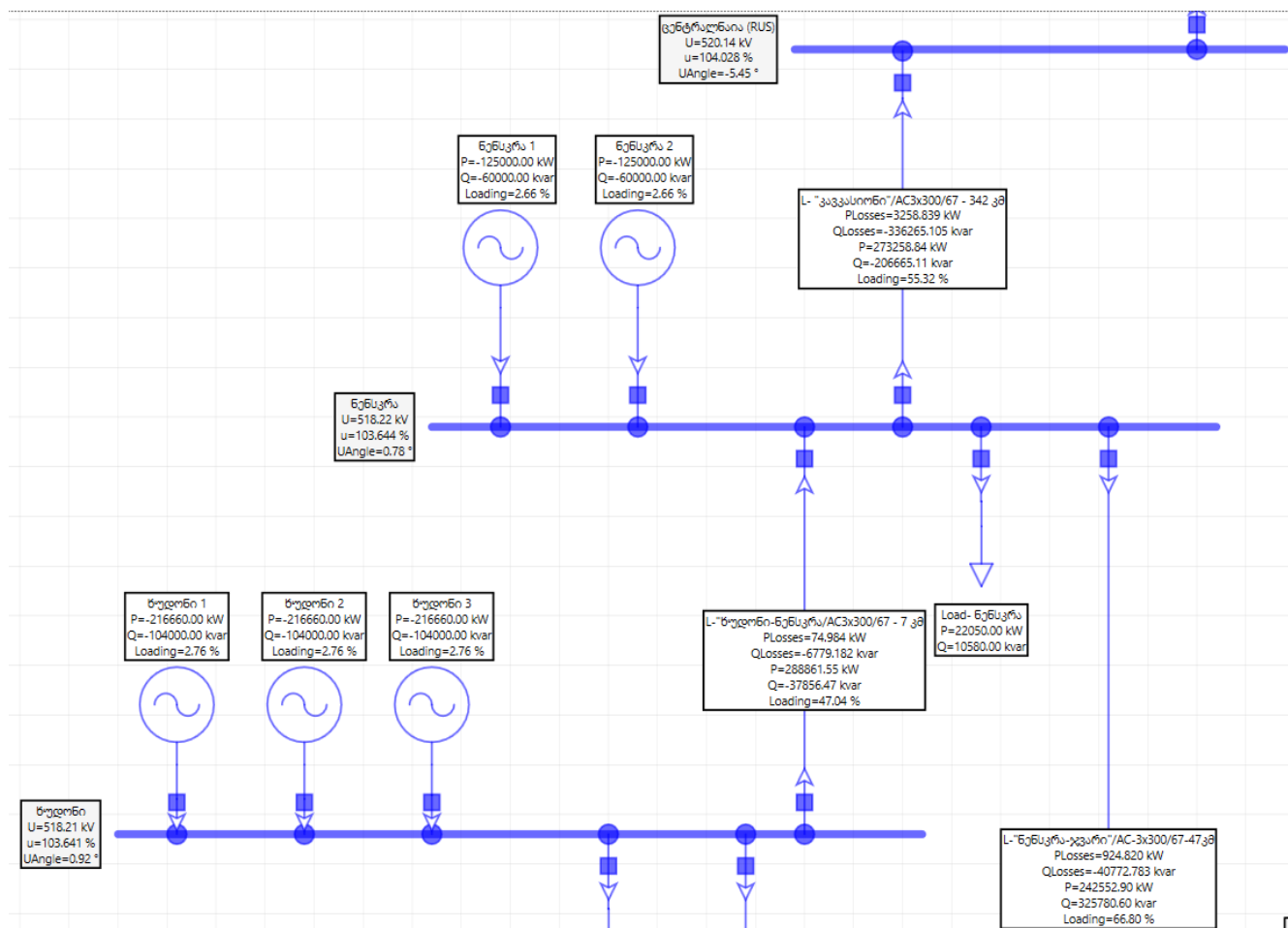
დ.3. „ცხრილი 2“ საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის შედეგების შეჯამება “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

ΔP, კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	ΔQ, კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	P, კვტ - დატვირთვა	Q, კვარ - დატვირთვა	P, კვტ - ელექტროსადგურთა გენერაცია	Q, კვარ - ელექტროსადგურთა გენერაცია	P, კვტ - მაბალანსებელი კვანძის სიმძლავრე
15324	-1357564,86	1461100	921560	1350000	648000	126424

როგორც დ.3.ცხრ.2-დან ვგებულობთ საქართველოსა და რუსეთის ენერგოსისტემების პარალელური სინქრონული რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მაქსიმალური დატვირთვის დროს აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინაღობაში) აღწევს 15,324 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (1350 მგვტ) 1,13 %-ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემდაღი ძაბვის ქსელში გვაქვს დაახლოებით 1357 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე.

საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას დიდია აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონის კვანძთა დატვირთვები, შესაბამისად იზრდება სიმძლავრეთა ნაკადგადადინებები დასავლეთ საქართველოს რეგიონიდან აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში. აღნიშნულის გამო საკმაოდ დატვირთულია დასავლეთ და აღმოსავლეთ საქართველოს ურთიერთდამაკავშირებელი შიდასასისტემო 500 კვ ზემდაღი ძაბვის ხაზები („ქართლი -2“, „ვარძია“), რის საფუძველზეც ძაბვის მუშა მნიშვნელობები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში ბევრად დაბალია ვიდრე დასავლეთ საქართველოს რეგიონში, იხ.დ.3.ცხრ.1.

საქართველოსა და რუსეთის ენერგოსისტემების დამაკავშირებელი 500 კვ ეგზ „კავკასიონის“ დიდი სიგრძისა (342 კმ) და ადგილობრივ ელექტროსადგურთა მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერირების გამო ძაბვები ამალღებულია საქართველოს ელექტროსისტემის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში („ნენსკრა“, „ხუდონი“, „ლაჯანური“) და საკუთრივ ცენტრალნიას კვანძში, იხ.დ.3.ნახ.1 და დ.3.ცხრ.1.



დ.3.ნახ.1 საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას ქსელის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში სიმძლავრეთა ნაკადგანაწილება „NEPLAN“-ის მიხედვით

§4.4-ის ნახ.4.8-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ნუმერაციისა და დ.3.ცხრ.1-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 508,78 \text{ კვ}; U_2 = 510,71 \text{ კვ}; U_3 = 515,07 \text{ კვ}; U_4 = 509,58 \text{ კვ}; U_5 = 505,92 \text{ კვ}; U_6 = 512,02 \text{ კვ}; \\ U_7 = 514,46 \text{ კვ}; U_8 = 508,14 \text{ კვ}; U_9 = 522,7 \text{ კვ}; U_{10} = 518,2 \text{ კვ}; U_{11} = 518,22 \text{ კვ}; U_{12} = 520,14 \text{ კვ}.$$

ჩვენი მიდგომით ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [41]:

$$0,98 \cdot U_6 \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_6 \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც დ.3.ცხრ.1-დან ჩანს ძაბვები „3“, „9“, „10“, „11“ და „12“ კვანძებში გადახრილია (ამაღლებულია) დასაშვებზე მეტად. ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „9“ კვანძში, ამიტომ [35]-ის მიხედვით რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა თავდაპირველად განიხილება სწორედ „9“ კვანძ - ლაჯანურში. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „9“ კვანძისათვის, გვექნება:

$$Q_{39} \cdot X_{99} = (U_{9 \text{ მოთ}} - U_9) \cdot U_6 \\ Q_{39} \cdot 33,39 = (515 - 522,7) \cdot 500 \\ Q_{39} = -115,3 \text{ მგვარ};$$

ამრიგად, მათემატიკური მოდელის მიხედვით „9“ კვანძ ლაჯანურში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი (სასურველია FACTS Devices) უნდა მუშაობდეს $Q_{39} = -115,3$ მგვარ სიმძლავრით. აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარი (3.11) –ის შესაბამისად ქსელის დანარჩენ კვანძებშიც შეცვლის (შეამცირებს) ძაბვის მუშა მნიშვნელობებს. ვნახოთ თუ როგორ შეიცვლება ძაბვის მნიშვნელობები კვანძებში აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{39} \cdot X_{19}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 3,187}{500} = -0,73 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 508,05 \text{ კვ}; \\ \delta U_2 = \frac{Q_{39} \cdot X_{29}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 14,33}{500} = -3,3 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 507,41 \text{ კვ}; \\ \delta U_3 = \frac{Q_{39} \cdot X_{39}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 18,01}{500} = -4,15 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 510,92 \text{ კვ}; \\ \delta U_4 = \frac{Q_{39} \cdot X_{49}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 14,96}{500} = -3,45 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 506,13 \text{ კვ}; \\ \delta U_5 = \frac{Q_{39} \cdot X_{59}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 15,06}{500} = -3,47 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 502,45 \text{ კვ}; \\ \delta U_6 = \frac{Q_{39} \cdot X_{69}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 15}{500} = -3,46 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 508,56 \text{ კვ}; \\ \delta U_7 = \frac{Q_{39} \cdot X_{79}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 15,61}{500} = -3,6 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 510,86 \text{ კვ}; \\ \delta U_8 = \frac{Q_{39} \cdot X_{89}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 15,08}{500} = -3,47 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 504,67 \text{ კვ}; \\ \delta U_9 = \frac{Q_{39} \cdot X_{99}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 33,39}{500} = -7,7 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ}; \\ \delta U_{10} = \frac{Q_{39} \cdot X_{109}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 3,187}{500} = -0,73 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 517,47 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = \frac{Q_{39} \cdot X_{119}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 3,187}{500} = -0,73 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 517,49 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{12} = \frac{Q_{39} \cdot X_{129}}{U_6} = \frac{-115,3 \cdot 3,187}{500} = -0,73 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{12}^{(1)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 519,41 \text{ კვ};$$

როგორც ვხედავთ I იტერაციის შემდეგ ძაბვები რიგ კვანძებში („10“, „11“, „12“) ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „12“ კვანძში. ამიტომ [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „9“ კვანძისა და I იტერაციის შედეგად ახლად გამოვლენილი „12“ კვანძის მიმართ, შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{312} \cdot 3,187 = (515 - 522,7) \cdot 500 = -3850 \\ Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 520,14) \cdot 500 = -2570 \end{cases}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია: $Q_{39} = -113,52$ მგვარ, $Q_{312} = -18,65$ მგვარ.

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ დანადგრთა განთავსების შედეგად.

II იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} = \frac{-113,52 \cdot 3,187 - 18,65 \cdot 4,679}{500} = -0,9 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,36 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\begin{aligned} \delta U_2 = -3,35 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(2)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 507,36 \text{ კვ}; \quad \delta U_3 = -4,2 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(2)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 510,87 \text{ კვ}; \\ \delta U_4 = -3,5 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(2)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 506,08 \text{ კვ}; \quad \delta U_5 = -3,51 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(2)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 502,41 \text{ კვ}; \\ \delta U_6 = -3,5 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(2)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 508,52 \text{ კვ}; \quad \delta U_7 = -3,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(2)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 510,82 \text{ კვ}; \\ \delta U_8 = -3,52 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(2)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 504,62 \text{ კვ}; \quad \delta U_9 = -7,7 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(2)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ}; \\ \delta U_{10} = -1,13 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(2)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 517,03 \text{ კვ}; \quad \delta U_{11} = -1,17 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(2)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 517,05 \text{ კვ}; \\ \delta U_{12} = -5,14 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{12}^{(2)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ}. \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ II იტერაციის შემდეგ ძაბვები „10“ და „11“ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „11“ კვანძში. ამიტომ [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „9“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილი „12“ და II იტერაციის შედეგად გამოვლენილი „11“ კვანძების მიმართ, შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{311} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 3,187 = (515 - 522,7) \cdot 500 = -3850 \\ Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{311} \cdot 11,99 + Q_{312} \cdot 11,99 = (515 - 518,22) \cdot 500 = -1610 \\ Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{311} \cdot 11,99 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 520,14) \cdot 500 = -2570 \end{cases}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{39} = -105,15 \text{ მგვარ}, Q_{311} = -97,3 \text{ მგვარ}, Q_{312} = -9,02 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ დანადგრთა განთავსების შედეგად.

III იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{311} \cdot X_{111} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} = \frac{-105,15 \cdot 3,187 - 97,3 \cdot 4,679 - 9,02 \cdot 4,679}{500} = -1,66 \text{ კვ};$$

$$\Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,12 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -3,55 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(3)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 510,71 - 3,55 = 507,16 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -4,46 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(3)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 515,07 - 4,46 = 510,61 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -3,7 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(3)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 509,58 - 3,7 = 505,88 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -3,73 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(3)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 505,92 - 3,73 = 502,19 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -3,72 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(3)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 512,02 - 3,72 = 508,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -3,87 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(3)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 514,46 - 3,87 = 510,59 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -3,74 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(3)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 508,14 - 3,74 = 504,4 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -7,7 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(3)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 522,7 - 7,7 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -3 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(3)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 518,2 - 3 = 515,2 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -3,22 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(3)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 518,22 - 3,22 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{12} = -5,14 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(3)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 520,14 - 5,14 = 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ, III იტერაციის შემდეგ ძაბვის მნიშვნელობები კვანძებში დასაშვებ ფარგლებშია, თუ არ ჩავთვლით ძაბვის უმნიშვნელო გადახრას „10“ კვანძ „ხუდონში“. ამის გამო დამატებით ღონისძიებებს არ მივიღებთ და ამით ანგარიში დასრულებულია.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი - „NEPLAN“ პროგრამაში ჩატარებული ანგარიშების შედეგად დადგინდა საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური სინქრონული რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელის საკონტროლო კვანძების ძაბვის მუშა მნიშვნელობები, შედეგები მოცემულია დ.3.ცხრ.3-ში. დ.3.ცხრ.4-ში კი შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

დ.3. „ცხრილი 3“ საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმოქმნილი ქსელის კვანძური შედეგები “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

კვანძის დასახელება	U, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	u%, ძაბვა პროცენტულად
ქსანი	539,26648	-3,11509	107,8533
ჯვარი	509,54051	0,06242	101,9081
ლაჯანური	529,64391	0,09782	105,92878
ხუდონი	516,87945	0,45097	103,37589
მარნეული	538,37416	-3,22825	107,67483
სტეფანწმინდა	542,34398	-3,19834	108,4688
გარდაბანი	537,6519	-3,35972	107,53038
ანალოციხე	530,06189	-1,8204	106,01238
ზესტაფონი	524,08513	-1,31194	104,81703
ნენსკრა	517,12097	0,35159	103,42419
ენგურ-ჰესი	500,0	0,0	100,0
წყალტუბო	524,74081	-0,68695	104,94816
ცენტრალნაია (RUS)	526,09883	-4,87513	105,21977

დ.3. „ცხრილი 4“ საქართველოს ელექტროსისტემის რუსეთის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმოქმნილი ქსელის შედეგების შეჯამება „NEPLAN“ პროგრამის მიხედვით

ΔP , კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიურ ი დანაკარგები ქსელში	ΔQ , კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიურ ი დანაკარგები ქსელში	P , კვტ - დატვირთვა	Q , კვარ - დატვირთვა	P კვტ - ელექტრო სადგურთ ა გენერაცია	Q კვარ - ელექტრო სადგურთ ა გენერაცია	P , კვტ - მაბალანსე ბელი კვანძის კვანძური სიმძლავრ ე
10486,82	-1490529,59	767350	552330	810000	388000	-32164

როგორც დ.3.ცხრ.4-დან ვგებულობთ ავტონომიური რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მინიმალური დატვირთვის დროს აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინაღობაში) აღწევს 10,48 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (810 მგვტ) 1,29%-ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემდალი ძაბვის ქსელის რეაქტიული ჯამური დატვირთვაა 552,33 მგვარ, მეორეხრივ ზემდალი ძაბვის ხაზებში გვაქვს 1490 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე, რაც საბოლოოდ სისტემაწარმოქმნილ ქსელში ქმნის რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიურ სიჭარბეს. ამ დროს რეაქტიული სიმძლავრის განსაკუთრებული სიჭარბით ხასიათდება აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონი (სავარაუდოდ ამ ტერიტორიებზე მდებარე 500 კვ ძაბვის ეგხ-თა დიდი სიგრძისა და მცირე დატვირთვების ფონზე), რის საფუძველზეც ძაბვები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში („ქსანი“, „სტეფანწმინდა“, „გარდაბანი“, „მარნეული“) ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად, იხ.დ.3.ცხრ.3.

საქართველოსა და რუსეთის ენერგოსისტემების დამაკავშირებელი 500 კვ ეგხ „კავკასიონის“ დიდი სიგრძისა (342 კმ) და ადგილობრივ ელექტროსადგურთა მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერირების გამო ძაბვები ამაღლებულია საქართველოს ელექტროსისტემის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში („ნენსკრა“, „ხუდონი“, „ლაჯანური“) და საკუთრივ ცენტრალნიას კვანძში, იხ.დ.3.ცხრ.3.

§4.4-ის ნახ.4.8-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ნუმერაციისა და ცხრ.3.3-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 509,54 \text{ კვ}; U_2 = 524,08 \text{ კვ}; U_3 = 524,74 \text{ კვ}; U_4 = 539,26 \text{ კვ}; U_5 = 537,65 \text{ კვ}; U_6 = 542,34 \text{ კვ}; U_7 = 530,06 \text{ კვ}; U_8 = 538,37 \text{ კვ}; U_9 = 529,64 \text{ კვ}; U_{10} = 516,88 \text{ კვ}; U_{11} = 517,12 \text{ კვ}; U_{12} = 526,09 \text{ კვ}.$$

ჩვენი მიდგომით ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [41]:

$$0,98 \cdot U_{\text{გ}} \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_{\text{გ}} \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ, მინიმალური დატვირთვისას „1“ კვანძის გარდა ძაბვის მნიშვნელობები ყველა კვანძში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად. [35]-ში განხილულ მათემატიკური მოდელის მიხედვით ამ შემთხვევაში მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა განიხილება იმ კვანძში, სადაც ძაბვის გადახრა მაქსიმალურია (კრიტიკული კვანძი). ჩვენს შემთხვევაში ეს გახლავთ „6“ კვანძი - „სტეფანწმინდა“. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „6“ კვანძისათვის, გვექნება.

$$Q_{36} \cdot X_{66} = (U_{6 \text{ მოთხ}} - U_6) \cdot U_6$$

$$Q_{36} \cdot 80,3 = (515 - 542,34) \cdot 500$$

$$Q_{36} = -170,24 \text{ მგვარ;}$$

ვნახოთ როგორც შეიცვლება(შემცირდება) ძაბვები კვანძებში აღნიშნული დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 2,665}{500} = -0,9 \text{ კვ; } \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 508,64 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_2 = \frac{Q_{36} \cdot X_{26}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 18,81}{500} = -6,4 \text{ კვ; } \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 517,68 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_3 = \frac{Q_{36} \cdot X_{36}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 15}{500} = -5,1 \text{ კვ; } \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 519,64 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_4 = \frac{Q_{36} \cdot X_{46}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 49,04}{500} = -16,7 \text{ კვ; } \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 522,56 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_5 = \frac{Q_{36} \cdot X_{56}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 45,15}{500} = -15,37 \text{ კვ; } \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 522,28 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_6 = \frac{Q_{36} \cdot X_{66}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 80,3}{500} = -27,34 \text{ კვ; } \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_7 = \frac{Q_{36} \cdot X_{76}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 22,66}{500} = -7,71 \text{ კვ; } \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 522,35 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_8 = \frac{Q_{36} \cdot X_{86}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 44,17}{500} = -15,04 \text{ კვ; } \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 523,33 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_9 = \frac{Q_{36} \cdot X_{96}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 15}{500} = -5,1 \text{ კვ; } \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 524,54 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{10} = \frac{Q_{36} \cdot X_{106}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 2,655}{500} = -0,9 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 515,98 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{11} = \frac{Q_{36} \cdot X_{116}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 2,655}{500} = -0,9 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 516,22 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{12} = \frac{Q_{36} \cdot X_{126}}{U_6} = \frac{-170,24 \cdot 2,655}{500} = -0,9 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{12}^{(1)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 525,19 \text{ კვ;}$$

როგორც ვხედავთ I იტერაციის შემდეგ „1“ და „6“ კვანძების გარდა ძაბვები დანარჩენ კვანძებში დასაშვებ ფარგლებს გარეთაა (ამაღლებულია), ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „12“ კვანძში. [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „6“ და I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „12“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{312} \cdot 2,655 = (515 - 542,34) \cdot 500 = -13670 \\ Q_{36} \cdot 2,655 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 526,09) \cdot 500 = -5545 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია: $Q_{36} = -168,81$ მგვარ; $Q_{312} = -43,06$ მგვარ.

ვნახოთ აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმა „6“ და „12“ კვანძებში როგორ შეცვლის (შემცირებს) ძაბვებს კვანძებში:

II იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} = \frac{-168,81 \cdot 2,665 - 43,06 \cdot 4,679}{500} = -1,3 \text{ კვ; } \Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1$$

$$= 508,24 \text{ კვ;}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\begin{aligned} \delta U_2 = -6,57 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_2^{(2)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 517,51 \text{ კვ;} & \delta U_3 = -5,34 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_3^{(2)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 519,4 \text{ კვ;} \\ \delta U_4 = -16,78 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_4^{(2)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 522,48 \text{ კვ;} & \delta U_5 = -15,47 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_5^{(2)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = \\ &522,18 \text{ კვ;} & \delta U_6 = -27,34 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_6^{(2)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;} & \delta U_7 = -7,89 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_7^{(2)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = \\ &522,17 \text{ კვ;} & \delta U_8 = -15,14 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_8^{(2)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 523,23 \text{ კვ;} & \delta U_9 = -5,34 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_9^{(2)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = \\ &524,3 \text{ კვ;} & \delta U_{10} = -1,83 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{10}^{(2)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 515,05 \text{ კვ;} & \delta U_{11} = -1,93 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{11}^{(2)} = U_{11}^{(0)} + \\ &\delta U_{11} = 515,19 \text{ კვ;} & \delta U_{12} = -11,09 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{12}^{(2)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ.} \end{aligned}$$

II იტერაციის შედეგების მიხედვით „1“, „6“ და „12“ კვანძების გარდა ძაბვები ყველა კვანძში გადახრილია (ამაღლებულია) დასაშვებზე მეტად, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „9“ კვანძში. ამიტომ [35]-დან გამომდინარე (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „12“ და II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{312} \cdot 2,655 = (515 - 542,34) \cdot 500 = -13670 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{312} \cdot 3,187 = (515 - 529,64) \cdot 500 = -7320 \\ Q_{36} \cdot 2,655 + Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 526,09) \cdot 500 = -5545 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია: $Q_{36} = -140,47$ მგვარ; $Q_{39} = -152,34$ მგვარ; $Q_{312} = -39,59$ მგვარ.

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ შემთხვევაში:

III იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} = \frac{-140,47 \cdot 2,665 - 152,34 \cdot 3,187 - 39,59 \cdot 4,679}{500} = -2,09 \text{ კვ;} \\ &\Rightarrow U_1^{(3)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,45 \text{ კვ;} \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\begin{aligned} \delta U_2 &= -9,85 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_2^{(3)} &= U_2^{(0)} + \delta U_2 = 514,23 \text{ კვ;} \\ \delta U_3 &= -9,95 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_3^{(3)} &= U_3^{(0)} + \delta U_3 = 514,79 \text{ კვ;} \\ \delta U_4 &= -18,54 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_4^{(3)} &= U_4^{(0)} + \delta U_4 = 520,72 \text{ კვ;} \\ \delta U_5 &= -17,48 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_5^{(3)} &= U_5^{(0)} + \delta U_5 = 520,17 \text{ კვ;} \\ \delta U_6 &= -27,34 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_6^{(3)} &= U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;} \\ \delta U_7 &= -11,34 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_7^{(3)} &= U_7^{(0)} + \delta U_7 = 518,72 \text{ კვ;} \\ \delta U_8 &= -17,21 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_8^{(3)} &= U_8^{(0)} + \delta U_8 = 521,16 \text{ კვ;} \\ \delta U_9 &= -14,64 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_9^{(3)} &= U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ;} \\ \delta U_{10} &= -2,58 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{10}^{(3)} &= U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 514,3 \text{ კვ;} \\ \delta U_{11} &= -2,66 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{11}^{(3)} &= U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 514,46 \text{ კვ;} \\ \delta U_{12} &= -11,09 \text{ კვ;} &\Rightarrow U_{12}^{(3)} &= U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ.} \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ III იტერაციის შემდეგ ძაბვის მუშა მნიშვნელობები „4“, „5“, „7“ და „8“ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად. ამასთან, გადახრა მაქსიმალურია „8“ კვანძში ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „12“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“ და III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „8“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{312} \cdot 2,655 = (515 - 542,34) \cdot 500 = -13670 \\ Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{312} \cdot 2,669 = (515 - 538,37) \cdot 500 = -11685 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{312} \cdot 3,187 = (515 - 529,64) \cdot 500 = -7320 \\ Q_{36} \cdot 2,655 + Q_{38} \cdot 2,669 + Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 526,09) \cdot 500 = -5545 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{36} = -75,39 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -128,03 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -123,81 \text{ მგვარ}; Q_{312} = -38,93 \text{ მგვარ.}$$

ენახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსების შემთხვევაში:

IV იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} \\ &= \frac{-75,39 \cdot 2,665 - 128,03 \cdot 2,669 - 123,81 \cdot 3,187 - 38,93 \cdot 4,679}{500} = -2,24 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(4)} \\ &= U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,3 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -11,39 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(4)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 512,75 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -10,83 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(4)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 513,91 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -22,59 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(4)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 516,67 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -23,21 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(4)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 514,44 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -27,34 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(4)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -13,56 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(4)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 516,5 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -23,37 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(4)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -14,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(4)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -2,72 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(4)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 514,16 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -2,8 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(4)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 514,32 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{12} = -11,09 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{12}^{(4)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ IV იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები მხოლოდ „4“ და „7“ კვანძებშია გადახრილი დასაშვები ფარგლებიდან, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „4“ კვანძში. ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „12“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“, III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „8“ და IV იტერაციისას გამოვლენილ „4“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად გვექნება:

$$\begin{cases} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 + Q_{312} \cdot 2,648 = (515 - 539,26) \cdot 500 = -12130 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{312} \cdot 2,655 = (515 - 542,34) \cdot 500 = -13670 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{312} \cdot 2,669 = (515 - 538,37) \cdot 500 = -11685 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{312} \cdot 3,187 = (515 - 529,64) \cdot 500 = -7320 \\ Q_{34} \cdot 2,648 + Q_{36} \cdot 2,655 + Q_{38} \cdot 2,669 + Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 118,37 = (515 - 526,09) \cdot 500 = -5545 \end{cases}$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{34} = -109,73 \text{ მგვარ}; Q_{36} = -48,9 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -55,95 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -119,11 \text{ მგვარ}; Q_{312} = -38,82 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში დანადგართა განთავსების შემთხვევაში:

V იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6} \\ &= \frac{-109,73 \cdot 2,648 - 48,9 \cdot 2,665 - 55,95 \cdot 2,669 - 119,11 \cdot 3,187 - 38,82 \cdot 4,679}{500} \\ &= -2,26 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(5)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,28 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -11,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(5)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 512,44 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -10,97 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(5)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 513,77 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -24,26 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(5)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -23,48 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(5)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 514,17 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -27,34 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(5)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -13,76 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(5)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 516,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -23,37 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(5)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -14,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(5)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -2,74 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(5)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 514,14 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -2,83 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(5)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 514,29 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{12} = -11,09 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{12}^{(5)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ V იტერაციის შემდეგ მხოლოდ „7“ კვანძშია გადახრილი ძაბვა დასაშვები ფარგლებიდან, ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „6“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „12“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“, III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „8“, IV იტერაციისას გამოვლენილ „4“ და V იტერაციისას გამოვლენილ „7“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად გვექნება:

$$\left[\begin{array}{l} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{37} \cdot 22,6 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 + Q_{312} \cdot 2,648 = -12130 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{37} \cdot 22,66 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{312} \cdot 2,655 = -13670 \\ Q_{34} \cdot 22,6 + Q_{36} \cdot 22,66 + Q_{37} \cdot 28,48 + Q_{38} \cdot 23,69 + Q_{39} \cdot 15,61 + Q_{312} \cdot 2,763 = -7530 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{37} \cdot 23,69 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{312} \cdot 2,669 = -11685 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{37} \cdot 15,61 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{312} \cdot 3,187 = -7320 \\ Q_{34} \cdot 2,648 + Q_{36} \cdot 2,655 + Q_{37} \cdot 2,763 + Q_{38} \cdot 2,669 + Q_{39} \cdot 3,187 + Q_{312} \cdot 118,37 = -5545 \end{array} \right.$$

სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{34} = -104,49 \text{ მგვარ}; Q_{36} = -48,88 \text{ მგვარ}; Q_{37} = -44,47 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -43,34 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -106,4 \text{ მგვარ}; Q_{312} = -38,53 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

VI იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{37} \cdot X_{17} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{312} \cdot X_{112}}{U_6}$$

$$= \frac{-104,49 \cdot 2,648 - 48,88 \cdot 2,665 - 44,47 \cdot 2,763 - 43,34 \cdot 2,669 - 106,4 \cdot 3,187 - 38,53 \cdot 4,679}{500}$$

$$= -2,33 \text{ კვ; } \Rightarrow U_1^{(6)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,21 \text{ კვ;}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში, შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -12,19 \text{ კვ; } \Rightarrow U_2^{(6)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 511,89 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_3 = -11,36 \text{ კვ; } \Rightarrow U_3^{(6)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 513,38 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_4 = -24,26 \text{ კვ; } \Rightarrow U_4^{(6)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_5 = -23,54 \text{ კვ; } \Rightarrow U_5^{(6)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 514,11 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_6 = -27,34 \text{ კვ; } \Rightarrow U_6^{(6)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_7 = -15,06 \text{ კვ; } \Rightarrow U_7^{(6)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_8 = -23,37 \text{ კვ; } \Rightarrow U_8^{(6)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_9 = -14,64 \text{ კვ; } \Rightarrow U_9^{(6)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{10} = -2,8 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{10}^{(6)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 514,08 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{11} = -2,89 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{11}^{(6)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 514,23 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{12} = -11,09 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{12}^{(6)} = U_{12}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ.}$$

მაშასადამე, VI იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მნიშვნელობები კვანძებში დასაშვებ ფარგლებშია, ამით ანგარიში დასრულებულია.

სინქრონული პარალელური კავშირი აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი - “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძური შედეგები საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემების პარალელური სინქრონული რეჟიმისას მოცემულია დ3.ცხრ.5-ში. დ3.ცხრ.6-ში შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

დ3. „ცხრილი 5“ საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძური შედეგები “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

კვანძის დასახელება	S, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	u%, ძაბვა პროცენტულად
ზესტაფონი	519,18833	-2,71931	103,83767
სტეფანწმინდა	540,59036	-4,32541	108,11807
ხუდონი	515,55917	1,61876	103,11183
ნენსკრა	515,19891	1,55123	103,03978
ქსანი	537,93647	-4,17175	107,58729
სამუხი (AZE)	571,30357	-0,16253	114,26071
გარდაბანი	540,26303	-3,88554	108,05261
მარნეული	538,78577	-4,03408	107,75715
ჯვარი	508,27666	0,4128	101,65533
ლაჯანური	528,1198	-0,18706	105,62396
წყალტუბო	520,55358	-1,4928	104,11072
ახალციხე	522,42435	-3,54457	104,48487
ენგური	500,0	0,0	100,0

დ3. „ცხრილი 6“ საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მაქსიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის შედეგების შეჯამება “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

ΔP , კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	ΔQ , კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	P , კვტ - დატვირთვა	Q , კვარ - დატვირთვა	P , კვტ - ელექტროსადგურთა გენერაცია და მეზობელი ენერგოსისტემიდან შემოდინებული აქტიური სიმძლავრე	Q , კვარ - ელექტროსადგურთა გენერაცია და მეზობელი ენერგოსისტემიდან შემოდინებული რეაქტიული სიმძლავრე	P , კვტ - მზაბალანსებული კვანძის სიმძლავრე
16170	-1245113,54	1556850	967520	1735000	832800	-161980

როგორც დ3.ცხრ.6-დან ვგებულობთ საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემების პარალელური სინქრონული რეჟიმისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის მაქსიმალური დატვირთვის დროს აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინაღობაში) აღწევს 16,17 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (1735 მგვტ) 0,93 %-ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემალაი ძაბვის ქსელში გვაქვს დაახლოებით 1245 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე.

მაქსიმალური დატვირთვისას საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემების დამაკავშირებელი 500 კვ ეგხ „მუხრანის ველით“ გარდაბნის კვანძში შემოდის დაახლოებით 385 მგვტ და 185 მგვარ სიდიდის სიმძლავრე, რაც საქართველოსთვის ტრანზიტული ტვირთია და ახალციხის კვანძიდან გადის თურქეთის ელექტროსისტემაში. საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემებს შორის დამაკავშირებელი 500 კვ ეგხ „მუხრანის ველის“ სიგრძეა 182 კმ, რის გამოც დიდია ამ ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე. სწორედ ამ ფაქტორებიდან გამომდინარე აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონისა („გარდაბანი“, „ქსანი“, „მარნეული“, „სტეფანწმინდა“) და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემის კვანძ „სამუხში“ გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის დიდი სიჭარბე. ამიტომ კვანძთა ძაბვის მუშა მნიშვნელობები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში ამალღებულია დასაშვებზე მეტად, იხ.დ3.ცხრ.5.

§4.4-ის ნახ.4.10-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ნუმერაციისა და ცხრ.3.5-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 508,27 \text{ კვ}; U_2 = 519,18 \text{ კვ}; U_3 = 520,55 \text{ კვ}; U_4 = 537,93 \text{ კვ}; U_5 = 540,26 \text{ კვ}; U_6 = 540,59 \text{ კვ}; U_7 = 522,42 \text{ კვ}; U_8 = 538,78 \text{ კვ}; U_9 = 528,11 \text{ კვ}; U_{10} = 515,55 \text{ კვ}; U_{11} = 515,19 \text{ კვ}; U_{14} = 571,3 \text{ კვ}.$$

ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [41]:

$$0,98 \cdot U_{\text{ფ}} \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_{\text{ფ}} \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ცხრ.3.5-დან ჩანს ძაბვები „1“ კვანძის გარდა ყველგან გადახრილია(ამალღებულია) დასაშვებზე მეტად. ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „14“ კვანძში, ამიტომ [35]-ის მიხედვით რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა თავდაპირველად განიხილება სწორედ „14“ კვანძ - სამუხში. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „9“ კვანძისათვის, გვექნება:

$$\begin{aligned} Q_{314} \cdot X_{14 \ 14} &= (U_{14 \text{ მოთხ}} - U_{14}) \cdot U_{\text{ფ}} \\ Q_{314} \cdot 109,7 &= (515 - 571,3) \cdot 500 \\ Q_{314} &= -256,6 \text{ მგვარ}; \end{aligned}$$

ამრიგად, მათემატიკური მოდელის მიხედვით „14“ კვანძ სამუხში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარი (სასურველია FACTS Devices) უნდა მუშაობდეს $Q_{314} = -256,6$ მგვარ სიმძლავრით. აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარი (3.11) –ის შესაბამისად ქსელის დანარჩენ კვანძებშიც შეცვლის (შეამცირებს) ძაბვის მუშა მნიშვნელობებს. ვნახოთ თუ როგორ შეიცვლება ძაბვის მნიშვნელობები კვანძებში აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1 \ 14}}{U_{\text{ფ}}} = \frac{-256,6 \cdot 2,665}{500} = -1,36 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 506,91 \text{ კვ}; \\ \delta U_2 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{2 \ 14}}{U_{\text{ფ}}} = \frac{-256,6 \cdot 18,61}{500} = -9,55 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 509,63 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta U_3 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{314}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 15,06}{500} = -7,72 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 512,83 \text{ კვ}; \\ \delta U_4 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{414}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 45,03}{500} = -23,1 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 514,83 \text{ კვ}; \\ \delta U_5 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{514}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 53,52}{500} = -27,46 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 512,8 \text{ კვ}; \\ \delta U_6 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{614}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 45,15}{500} = -23,17 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 517,42 \text{ კვ}; \\ \delta U_7 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{714}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 23,47}{500} = -12,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 510,38 \text{ კვ}; \\ \delta U_8 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{814}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 48,7}{500} = -25 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 513,78 \text{ კვ}; \\ \delta U_9 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{914}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 15,06}{500} = -7,72 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 520,39 \text{ კვ}; \\ \delta U_{10} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1014}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 2,665}{500} = -1,36 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 514,19 \text{ კვ}; \\ \delta U_{11} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1114}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 2,665}{500} = -1,36 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 513,83 \text{ კვ}; \\ \delta U_{14} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1414}}{U_6} = \frac{-256,6 \cdot 109,7}{500} = -56,3 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(1)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ I იტერაციის შემდეგ ძაბვები „6“ და „9“ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „9“ კვანძში. ამიტომ [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „14“ და I იტერაციის შედეგად ახლად გამოვლენილი „9“ კვანძის მიმართ, შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{314} \cdot 15,06 = (515 - 528,11) \cdot 500 = -6555 \\ Q_{39} \cdot 15,06 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 571,3) \cdot 500 = -28150 \end{cases}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია: $Q_{39} = -85,89$ მგვარ, $Q_{314} = -244,81$ მგვარ.

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ დანადგრთა განთავსების შედეგად,

II იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} = \frac{-85,89 \cdot 3,187 - 244,81 \cdot 2,665}{500} = -1,85 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 \\ &= 506,42 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში, შედეგები ასეთია:
 $\delta U_2 = -11,57$ კვ; $\Rightarrow U_2^{(2)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 507,61$ კვ; $\delta U_3 = -10,46$ კვ; $\Rightarrow U_3^{(2)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 510,09$ კვ;
 $\delta U_4 = -24,61$ კვ; $\Rightarrow U_4^{(2)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 513,32$ კვ; $\delta U_5 = -28,79$ კვ; $\Rightarrow U_5^{(2)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 511,47$ კვ;
 $\delta U_6 = -24,68$ კვ; $\Rightarrow U_6^{(2)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515,91$ კვ; $\delta U_7 = -14,17$ კვ; $\Rightarrow U_7^{(2)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 508,25$ კვ;
 $\delta U_8 = -26,43$ კვ; $\Rightarrow U_8^{(2)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 512,35$ კვ; $\delta U_9 = -13,11$ კვ; $\Rightarrow U_9^{(2)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515$ კვ;
 $\delta U_{10} = -1,85$ კვ; $\Rightarrow U_{10}^{(2)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 513,7$ კვ; $\delta U_{11} = -1,85$ კვ; $\Rightarrow U_{11}^{(2)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 513,34$ კვ;
 $\delta U_{14} = -56,3$ კვ; $\Rightarrow U_{14}^{(2)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515$ კვ.

როგორც ვხედავთ II იტერაციის შემდეგ მხოლოდ „6“ კვანძშია ძაბვა ამაღლებული დასაშვებზე მეტად. ამიტომ [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „14“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „9“ და II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“ კვანძების მიმართ, შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{314} \cdot 45,15 = (515 - 540,59) \cdot 500 = -12795 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{314} \cdot 15,06 = (515 - 528,11) \cdot 500 = -6555 \\ Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{39} \cdot 15,06 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 571,3) \cdot 500 = -28150 \end{cases}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{36} = -7,64 \text{ მგვარ}, Q_{39} = -83,74 \text{ მგვარ}, Q_{314} = -241,96 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ დანადგრთა განთავსების შედეგად.

III იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} = \frac{-7,64 \cdot 2,665 - 83,74 \cdot 3,187 - 241,96 \cdot 2,665}{500} = -1,86 \text{ კვ};$$

$$\Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 506,41 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში, შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -11,69 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(3)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 519,18 - 11,69 = 507,16 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -10,53 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(3)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 520,55 - 10,53 = 510,02 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -25,04 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(3)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 537,93 - 25,04 = 512,89 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -29,11 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(3)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 540,26 - 29,11 = 511,15 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -25,59 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(3)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 540,59 - 25,59 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -14,31 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(3)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 522,42 - 14,31 = 508,11 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -26,76 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(3)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 538,78 - 26,76 = 512,02 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -13,11 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(3)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 528,11 - 13,11 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -1,86 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(3)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 515,55 - 1,86 = 513,69 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -1,86 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(3)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 515,19 - 1,86 = 513,33 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{14} = -56,3 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(3)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 571,3 - 56,3 = 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ III იტერაციის შემდეგ ძაბვის მნიშვნელობები კვანძებში დასაშვებ ფარგლებშია, ამით ანგარიში დასრულებულია.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი - “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძური შედეგები საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემების პარალელური სინქრონული რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას მოცემულია დ3.ცხრ.7-ში. დ3.ცხრ.8-ში შეჯამებულია ქსელის ანგარიშის შედეგები.

დ3. „ცხრილი 7“ საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელური სინქრონული რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძური შედეგები “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

კვანძის დასახელება	U, კვ	U°, კვანძური ძაბვის ფაზური ძვრის კუთხე	u%, ძაბვა პროცენტულად
წყალტუბო	529,77426	-0,56842	105,95485
ნენსკრა	513,24438	1,00804	102,64888
ლაჯანური	534,6462	0,2015	106,92924
ენგური	500,0	0,0	100,0
ხუდონი	513,45474	1,04887	102,69095
ქსანი	558,42449	-2,8711	111,6849
მარნეული	559,03411	-2,96952	111,80682
სტეფანწმინდა	561,62958	-2,95136	112,32592
ჯვარი	508,69289	0,31127	101,73858
გარდაბანი	560,40336	-3,06912	112,08067
ზესტაფონი	531,35394	-1,22467	106,27079
სამუხი (AZE)	573,40479	-2,74765	114,68096
ახალციხე	538,91197	-1,76861	107,78239

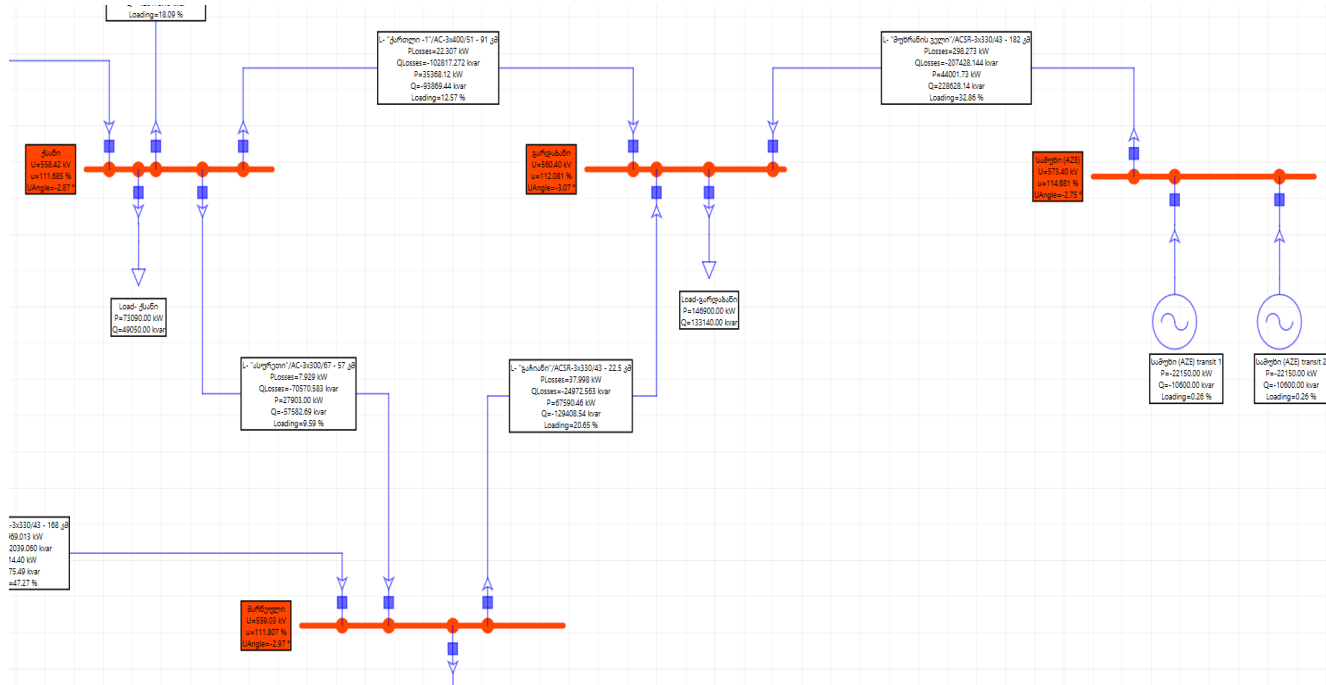
დვ. „ცხრილი 8“ საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას 500 კვ ძაბვის ქსელის შედეგების შეჯამება “NEPLAN” პროგრამის მიხედვით

ΔP , კვტ - აქტიური სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	ΔQ , კვარ - რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიური დანაკარგები ქსელში	P , კვტ - დატვირთვა	Q , კვარ - დატვირთვა	P კვტ - ელექტროსადგურთა გენერაცია და მეზობელი ენერგოსისტემიდან შემოდინებული აქტიური სიმძლავრე	Q კვარ - ელექტროსადგურთა გენერაცია და მეზობელი ენერგოსისტემიდან შემოდინებული რეაქტიული სიმძლავრე	P , კვტ - მბალანსე ბელი კვანძური სიმძლავრე
11363,1	-1363906,6	843160	464470	854300	409200	-223,1

როგორც დვ.ცხრ.8-დან ვგებულობთ საქართველოს ელექტროსისტემის აზერბაიჯანის ელექტროსისტემასთან პარალელური რეჟიმის მინიმალური დატვირთვისას საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელში აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები (ქსელის R წინაღობაში) აღწევს 11,363 მგვტ-ს, რაც ქსელის აქტიური სიმძლავრის ჯამური გენერაციის (854,3 მგვტ) 1,33%-ს შეადგენს. ამ დროს 500 კვ ზემადალი ძაბვის ქსელის რეაქტიული ჯამური დატვირთვაა 464,47 მგვარ, მეორეხრივ ზემადალი ძაბვის ხაზებში გვაქვს დაახლოებით 1364 მგვარ სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე, რაც საბოლოოდ სისტემაწარმოქმნელ ქსელში ქმნის რეაქტიული სიმძლავრის რეზულტატიურ სიჭარბეს. ამ დროს რეაქტიული სიმძლავრის განსაკუთრებული სიჭარბით ხასიათდება აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონი, სავარაუდოდ ამ ტერიტორიებზე მდებარე 500 კვ ძაბვის ეგ-თა დიდი სიგრძისა და მცირე დატვირთვების ფონზე.

აგრეთვე ამ დროს აზერბაიჯანისა და საქართველოს ენერგოსისტემებს შორის დამაკავშირებელი 500 კვ ეგ „მუხრანის ველი“ , სიგრძით 182 კმ, მუშაობს ფაქტობრივად უქმი სვლის რეჟიმში,

დატვირთულია დაახლოებით 49 მგვა სიმძლავრით. ზემო აღნიშნულის საფუძველზე ძაბვები აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონში („ქსანი“, „სტეფანწმინდა“, „გარდაბანი“, „მარნეული“) და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემის კვანძ - „სამუხში“ ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად, იხ.დ3.ცხრ.7. დ3.ნახ.2-ზე საილუსტრაციოდ ნაჩვენებია მინიმალური დატვირთვისას აზერბაიჯანისა და აღმოსავლეთ-საქართველოს კვანძებს შორის სიმძლავრეთა ნაკადგადადინება „NEPLAN“ პროგრამაში.



დ3.ნახ.2 აღმოსავლეთ-საქართველოსა და აზერბაიჯანის ენერგოსისტემის კვანძ „სამუხის“ კვანძებს შორის სიმძლავრეთა ნაკადგადადინება „NEPLAN“ პროგრამაში

§4.4-ის ნახ.4.10-ზე წარმოდგენილი კვანძთა ზუმერაციისა და ცხრ.3.7-ის შედეგების საფუძველზე ვწერთ:

$$U_1 = 508,69 \text{ კვ}; U_2 = 531,35 \text{ კვ}; U_3 = 529,77 \text{ კვ}; U_4 = 558,42 \text{ კვ}; U_5 = 560,4 \text{ კვ}; U_6 = 561,62 \text{ კვ}; U_7 = 538,91 \text{ კვ}; U_8 = 559,03 \text{ კვ}; U_9 = 534,64 \text{ კვ}; U_{10} = 513,45 \text{ კვ}; U_{11} = 513,24 \text{ კვ}; U_{14} = 573,4 \text{ კვ}.$$

ჩვენი მიდგომით ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში 500 კვ ძაბვის ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვა ნომინალურიდან არ უნდა გადაიხაროს $(-2 \div +3)\%$ -ზე მეტად. კონკრეტულად ძაბვის მუშა მნიშვნელობა მოთავსებული უნდა იყოს ფარგლებში [41]:

$$0,98 \cdot U_6 \leq U_0 + \Delta U_i \leq 1,03 \cdot U_6 \Rightarrow 490 \leq U_i \leq 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ, მინიმალური დატვირთვისას „1“, „10“, „11“ კვანძების გარდა ძაბვის მნიშვნელობები ყველა დანარჩენ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად. [35]-ში განხილულ მათემატიკური მოდელის მიხედვით ამ შემთხვევაში მაკომპენსირებელი დანადგარის დადგმა განხილება იმ კვანძში, სადაც ძაბვის გადახრა მაქსიმალურია (კრიტიკული კვანძი). ჩვენს შემთხვევაში ეს გახლავთ „14“ კვანძი - „სამუხი“. შევადგინოთ (3.10) მათემატიკური მოდელი „14“ კვანძისათვის, გვექნება:

$$Q_{314} \cdot X_{14 \ 14} = (U_{14 \ მოთხ} - U_{14}) \cdot U_6$$

$$Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 573,4) \cdot 500$$

$$Q_{314} = -266,18 \text{ მგვარ};$$

ვნახოთ როგორც შეიცვლება(შემცირდება) ძაბვები კვანძებში აღნიშნული დანადგარის დადგმის შედეგად.

I იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 2,665}{500} = -1,41 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(1)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 507,28 \text{ კვ}; \\ \delta U_2 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{214}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 18,61}{500} = -9,9 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 521,45 \text{ კვ}; \\ \delta U_3 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{314}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 15,06}{500} = -8,01 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(1)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 521,76 \text{ კვ}; \\ \delta U_4 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{414}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 45,03}{500} = -23,97 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(1)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 534,45 \text{ კვ}; \\ \delta U_5 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{514}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 53,52}{500} = -28,49 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(1)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 531,91 \text{ კვ}; \\ \delta U_6 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{614}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 45,15}{500} = -24,03 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(1)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 537,59 \text{ კვ}; \\ \delta U_7 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{714}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 23,47}{500} = -12,49 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(1)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 526,42 \text{ კვ}; \\ \delta U_8 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{814}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 48,7}{500} = -25,92 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(1)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 533,11 \text{ კვ}; \\ \delta U_9 &= \frac{Q_{314} \cdot X_{914}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 15,06}{500} = -8,01 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(1)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 526,63 \text{ კვ}; \\ \delta U_{10} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1014}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 2,665}{500} = -1,41 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(1)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 512,04 \text{ კვ}; \\ \delta U_{11} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1114}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 2,665}{500} = -1,41 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(1)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 511,83 \text{ კვ}; \\ \delta U_{14} &= \frac{Q_{314} \cdot X_{1414}}{U_6} = \frac{-266,18 \cdot 109,7}{500} = -58,4 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(1)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ}. \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ I იტერაციის შემდეგ ძაბვები მთელ რიგ კვანძებში („2“, „3“, „4“, „5“, „6“, „7“, „8“, „9“) დასაშვებ ფარგლებს გარეთაა (ამაღლებულია), ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „6“ კვანძში. [35]-ში წარმოდგენილი მოდელის 2.1. ქვეპუნქტის თანახმად (3.10) მათემატიკური მოდელი უნდა შევადგინოთ თავიდან გამოვლენილი „14“ და I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{314} \cdot 45,15 = (515 - 561,62) \cdot 500 = -23310 \\ Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 573,4) \cdot 500 = -29200 \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემის ამონახსნია: $Q_{36} = -182,96$ მგვარ; $Q_{314} = -190,87$ მგვარ.

ვნახოთ აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმა „6“ და „14“ კვანძებში როგორ შეცვლის (შემცირებს) ძაბვებს კვანძებში:

II იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} = \frac{-182,96 \cdot 2,665 - 190,87 \cdot 2,665}{500} = -1,99 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(2)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 \\ &= 506,7 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში. შედეგები ასეთია:

$$\begin{aligned} \delta U_2 &= -13,98 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(2)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 517,37 \text{ კვ}; & \delta U_3 &= -11,23 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(2)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = \\ &= 518,54 \text{ კვ}; & \delta U_4 &= -35,13 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(2)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 523,25 \text{ კვ}; & \delta U_5 &= -36,95 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(2)} = U_5^{(0)} + \\ \delta U_5 &= 523,45 \text{ კვ}; & \delta U_6 &= -46,62 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(2)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ}; & \delta U_7 &= -17,25 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(2)} = U_7^{(0)} + \\ \delta U_7 &= 521,66 \text{ კვ}; & \delta U_8 &= -34,75 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(2)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 524,28 \text{ კვ}; & \delta U_9 &= -11,23 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(2)} = \end{aligned}$$

$$U_9^{(0)} + \delta U_9 = 523,41 \text{ კვ}; \quad \delta U_{10} = -1,99 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(2)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 511,46 \text{ კვ}; \quad \delta U_{11} = -1,99 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(2)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 511,25 \text{ კვ}; \quad \delta U_{14} = -58,4 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(2)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ}.$$

II იტერაციის შედეგების მიხედვით ძაბვები მთელ რიგ კვანძებში („2“, „3“, „4“, „5“, „7“, „8“, „9“) დასაშვებ ფარგლებს გარეთაა (ამაღლებულია), ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „8“ კვანძში. ამიტომ [35]-დან გამოდინარე (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „14“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“ და II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{314} \cdot 45,15 = (515 - 561,62) \cdot 500 = -23310 \\ Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{314} \cdot 48,7 = (515 - 559,03) \cdot 500 = -22015 \\ Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{38} \cdot 48,7 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 573,4) \cdot 500 = -29200 \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{36} = -86,57 \text{ მგვარ}; \quad Q_{38} = -246,57 \text{ მგვარ}; \quad Q_{314} = -121,08 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ შემთხვევაში.

III იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} = \frac{-86,57 \cdot 2,665 - 246,57 \cdot 2,669 - 121,08 \cdot 2,665}{500} = -2,42 \text{ კვ};$$

$$\Rightarrow U_1^{(3)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 506,27 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -16,92 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(3)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 514,43 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -13,68 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(3)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 516,09 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -41,12 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(3)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 517,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -44,53 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(3)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 515,87 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -46,62 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(3)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -21,29 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(3)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 517,62 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -44,03 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(3)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -13,68 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(3)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 520,96 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -2,42 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(3)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 511,03 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -2,42 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(3)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 510,82 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{14} = -58,4 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(3)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ}.$$

როგორც ვხედავთ III იტერაციის შემდეგ ძაბვის მუშა მნიშვნელობები „3“, „4“, „5“, „7“ და „9“ კვანძებში ამაღლებულია დასაშვებზე მეტად. ამასთან, გადახრა მაქსიმალურია „9“ კვანძში ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „14“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“ და III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „9“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად ვწერთ:

$$\begin{cases} Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{314} \cdot 45,15 = (515 - 561,62) \cdot 500 = -23310 \\ Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{314} \cdot 48,7 = (515 - 559,03) \cdot 500 = -22015 \\ Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{314} \cdot 15,06 = (515 - 534,64) \cdot 500 = -9820 \\ Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{38} \cdot 48,7 + Q_{39} \cdot 15,06 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 573,4) \cdot 500 = -29200 \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{36} = -82,46 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -219,29 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -103,59 \text{ მგვარ}; Q_{314} = -120,66 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში ამ მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

IV იტერაცია:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6} \\ &= \frac{-82,46 \cdot 2,665 - 219,29 \cdot 2,669 - 103,59 \cdot 3,187 - 120,66 \cdot 2,665}{500} = -2,91 \text{ კვ}; \\ &\Rightarrow U_1^{(4)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 505,78 \text{ კვ}; \end{aligned}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში. შედეგები ასეთია:

$$\begin{aligned} \delta U_2 &= -18,7 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(4)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 512,65 \text{ კვ}; \\ \delta U_3 &= -16,45 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(4)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 513,32 \text{ კვ}; \\ \delta U_4 &= -41,37 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(4)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 517,05 \text{ კვ}; \\ \delta U_5 &= -44,84 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(4)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 515,56 \text{ კვ}; \\ \delta U_6 &= -46,62 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(4)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ}; \\ \delta U_7 &= -23,02 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(4)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 515,88 \text{ კვ}; \\ \delta U_8 &= -44,03 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(4)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ}; \\ \delta U_9 &= -19,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(4)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ}; \\ \delta U_{10} &= -2,91 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(4)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 510,54 \text{ კვ}; \\ \delta U_{11} &= -2,91 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(4)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 510,33 \text{ კვ}; \\ \delta U_{14} &= -58,4 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(4)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{12} = 515 \text{ კვ}. \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ IV იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები მხოლოდ „4“ „5“ და „7“ კვანძებშია გადახრილი დასაშვები ფარგლებიდან, ამასთან გადახრა მაქსიმალურია „4“ კვანძში. ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „14“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“, III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „9“ და IV იტერაციისას გამოვლენილ „4“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად გვექნება:

$$\begin{cases} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 + Q_{314} \cdot 45,03 = (515 - 558,42) \cdot 500 = -21710 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{314} \cdot 45,15 = (515 - 561,62) \cdot 500 = -23310 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{314} \cdot 48,7 = (515 - 559,03) \cdot 500 = -22015 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{314} \cdot 15,06 = (515 - 534,64) \cdot 500 = -9820 \\ Q_{34} \cdot 45,03 + Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{38} \cdot 48,7 + Q_{39} \cdot 15,06 + Q_{314} \cdot 109,7 = (515 - 573,4) \cdot 500 = -29200 \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$Q_{34} = -134,58$ მგვარ; $Q_{36} = -50,13$ მგვარ; $Q_{38} = -133,91$ მგვარ; $Q_{39} = -97,84$ მგვარ; $Q_{314} = -117,42$ მგვარ.

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

V იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6}$$

$$= \frac{-134,58 \cdot 2,648 - 50,13 \cdot 2,665 - 133,91 \cdot 2,669 - 97,84 \cdot 3,187 - 117,42 \cdot 2,665}{500}$$

$$= -2,94 \text{ კვ}; \Rightarrow U_1^{(5)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 505,75 \text{ კვ};$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში. შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -19,08 \text{ კვ}; \Rightarrow U_2^{(5)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 512,27 \text{ კვ};$$

$$\delta U_3 = -16,63 \text{ კვ}; \Rightarrow U_3^{(5)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 513,14 \text{ კვ};$$

$$\delta U_4 = -43,42 \text{ კვ}; \Rightarrow U_4^{(5)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_5 = -45,2 \text{ კვ}; \Rightarrow U_5^{(5)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 515,2 \text{ კვ};$$

$$\delta U_6 = -46,62 \text{ კვ}; \Rightarrow U_6^{(5)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_7 = -23,26 \text{ კვ}; \Rightarrow U_7^{(5)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 515,65 \text{ კვ};$$

$$\delta U_8 = -44,03 \text{ კვ}; \Rightarrow U_8^{(5)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_9 = -19,64 \text{ კვ}; \Rightarrow U_9^{(5)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{10} = -2,94 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{10}^{(5)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 510,51 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{11} = -2,94 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{11}^{(5)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 510,3 \text{ კვ};$$

$$\delta U_{14} = -58,4 \text{ კვ}; \Rightarrow U_{14}^{(5)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ};$$

როგორც ვხედავთ V იტერაციის შემდეგ მხოლოდ „5“ და „7“ კვანძებშია ძაბვა გადახრილი დასაშვები ფარგლებიდან, ამიტომ [35]-ის მიხედვით (3.10) მათემატიკური მოდელი შედგება საწყის ეტაპზე გამოვლენილ „14“, I იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „6“, II იტერაციის შედეგად გამოვლენილ „8“, III იტერაციის შემდეგ გამოვლენილ „9“, IV იტერაციისას გამოვლენილ „4“ და V იტერაციისას გამოვლენილ „7“ კვანძების მიმართ. შესაბამისად გვექნება:

$$\begin{cases} Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 49,04 + Q_{37} \cdot 22,6 + Q_{38} \cdot 44,06 + Q_{39} \cdot 14,96 + Q_{314} \cdot 45,03 = -21710 \\ Q_{34} \cdot 49,04 + Q_{36} \cdot 80,3 + Q_{37} \cdot 22,66 + Q_{38} \cdot 44,17 + Q_{39} \cdot 15 + Q_{314} \cdot 45,15 = -23310 \\ Q_{34} \cdot 22,6 + Q_{36} \cdot 22,66 + Q_{37} \cdot 28,48 + Q_{38} \cdot 23,69 + Q_{39} \cdot 15,61 + Q_{314} \cdot 23,47 = -11955 \\ Q_{34} \cdot 44,06 + Q_{36} \cdot 44,17 + Q_{37} \cdot 23,69 + Q_{38} \cdot 49,86 + Q_{39} \cdot 15,08 + Q_{314} \cdot 48,7 = -22015 \\ Q_{34} \cdot 14,96 + Q_{36} \cdot 15 + Q_{37} \cdot 15,61 + Q_{38} \cdot 15,08 + Q_{39} \cdot 33,39 + Q_{314} \cdot 15,06 = -9820 \\ Q_{34} \cdot 45,03 + Q_{36} \cdot 45,15 + Q_{37} \cdot 23,47 + Q_{38} \cdot 48,7 + Q_{39} \cdot 15,06 + Q_{314} \cdot 109,7 = -29200 \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემის ამონახსნია:

$$Q_{34} = -131,98 \text{ მგვარ}; Q_{36} = -50,12 \text{ მგვარ}; Q_{37} = -22,02 \text{ მგვარ}; Q_{38} = -127,66 \text{ მგვარ}; Q_{39} = -91,53 \text{ მგვარ}; Q_{314} = -117,42 \text{ მგვარ}.$$

ვნახოთ როგორ შეიცვლება (შემცირდება) ძაბვები კვანძებში დანადგართა განთავსების შემთხვევაში.

VI იტერაცია:

$$\delta U_1 = \frac{Q_{34} \cdot X_{14} + Q_{36} \cdot X_{16} + Q_{37} \cdot X_{17} + Q_{38} \cdot X_{18} + Q_{39} \cdot X_{19} + Q_{314} \cdot X_{114}}{U_6}$$

$$= \frac{-131,98 \cdot 2,648 - 50,12 \cdot 2,665 - 22,02 \cdot 2,763 - 127,66 \cdot 2,669 - 91,53 \cdot 3,187 - 117,42 \cdot 2,665}{500}$$

$$= -2,97 \text{ კვ; } \Rightarrow U_1^{(6)} = U_1^{(0)} + \delta U_1 = 505,72 \text{ კვ;}$$

ანალოგიურად გამოთვლილია ძაბვათა მუშა მნიშვნელობები დანარჩენ კვანძებში. შედეგები ასეთია:

$$\delta U_2 = -19,35 \text{ კვ; } \Rightarrow U_2^{(6)} = U_2^{(0)} + \delta U_2 = 512 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_3 = -16,82 \text{ კვ; } \Rightarrow U_3^{(6)} = U_3^{(0)} + \delta U_3 = 512,95 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_4 = -43,42 \text{ კვ; } \Rightarrow U_4^{(6)} = U_4^{(0)} + \delta U_4 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_5 = -45,21 \text{ კვ; } \Rightarrow U_5^{(6)} = U_5^{(0)} + \delta U_5 = 515,19 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_6 = -46,62 \text{ კვ; } \Rightarrow U_6^{(6)} = U_6^{(0)} + \delta U_6 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_7 = -23,91 \text{ კვ; } \Rightarrow U_7^{(6)} = U_7^{(0)} + \delta U_7 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_8 = -44,03 \text{ კვ; } \Rightarrow U_8^{(6)} = U_8^{(0)} + \delta U_8 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_9 = -19,64 \text{ კვ; } \Rightarrow U_9^{(6)} = U_9^{(0)} + \delta U_9 = 515 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{10} = -2,97 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{10}^{(6)} = U_{10}^{(0)} + \delta U_{10} = 510,48 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{11} = -2,97 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{11}^{(6)} = U_{11}^{(0)} + \delta U_{11} = 510,27 \text{ კვ;}$$

$$\delta U_{14} = -58,4 \text{ კვ; } \Rightarrow U_{14}^{(6)} = U_{14}^{(0)} + \delta U_{14} = 515 \text{ კვ.}$$

მაშასადამე, VI იტერაციის შემდეგ ძაბვათა მნიშვნელობები კვანძებში დასაშვებ ფარგლებშია, თუ არ ჩავთვლით ძაბვის უმნიშვნელო გადახრას „5“ კვანძში. ამისათვის დამატებით ღონისძიებებს არ მივიღებთ და ამით ანგარიში დასრულებულია.