

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

## კიკალიშვილი მამუკა

მანაწილებელი ელექტრული ქსელების  
რეჟიმების ოპტიმიზაცია და მენეჯმენტი

05.14.02 – ელექტროსადგურები, ქსელები, ელექტროენერგეტიკული  
სისტემები და მათი მართვა

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის  
სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად

მეცნიერ ხელმძღვანელი:

თბილისი  
2006

## ს ა რ ჩ ე ვ ი

შესავალი.

თავი 1. რეაქტიული სიმძლავრე ელექტრული ქსელში.

- 1.1. ენერგეტიკული პროცესი ცვლადი დენის წრედში.
- 1.2. რეაქტიული სიმძლავრის თავისებურებანი.
- 1.3. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზანი.
- 1.4. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების ზოგადი დახასიათება.

თავი 2. სიმძლავრის დანაკარგები ელექტრულ ქსელებში. დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი.

- 2.1. შესავალი.
- 2.2. განაწილების კოეფიციენტები და გავლენის წინააღმდეგობები.
- 2.3 კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინააღმდეგობათა განსაზღვრის მეთოდოლოგია.
- 2.4. სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში.
- 2.5. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი.

თავი 3 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის თანამედროვე მდგომარეობა.

- 3.1 პრობლემის არსი სისტემური მიდგომის თვალსაზრისით.
- 3.2 რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის არსებული მიდგომები.

თავი 4. ელექტრული სისტემის იერარაქიულობა და

რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა.

- 4.1. ელექტრული სისტემის იერარქიულობა.
- 4.2. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანის დასმა.
- 4.3. ოპტიმიზაციის ამოცანის მათემატიკური მოდელი.
- 4.4. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის დასმა.
- 4.5. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემა.
- 4.6.  $a$  პარამეტრის ფიზიკური არსი და მისი გავლენა რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხზე.

თავი 5 ქსელის სქემის ეკვივალენტირება და რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია.

- 5.1. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გლობალური ამოცანის გამარტივების საფუძვლები.
- 5.2. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი და მაკომპენსირებელი დანადგარებით ქსელის აღჭურვილობის კოეფიციენტი.
- 5.3. რეგიონულ ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია.
- 5.4. რიცხვითი მაგალითი (5.27) სახის მათემატიკური მოდელისადმი.

5.5. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში.

5.6. დატვირთვის გადატანა და კომპენსაციის ხარისხი.

5.7 ოპტიმალური კომპენსაციის განტოლებათ სისტემის იტერაციული ამოხსნა.

5.8. თეორიული კვლევის შედეგების პრაქტიკული გამოყენება და დანერგვა.

5.9. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ეკონომიკური ეფექტი (შეფასებითი ანგარიში).

თავი 6. მანაწილებელ ქსელში (6-10 კვ) ენერჯის განაწილების აღრიცხვის მეთოდი.

6.1. მანაწილებელ ქსელში (6-10 კვ) ელ. ენერჯის განაწილების, კონტროლის, მართვის და დაგეგმვის ახალი მეთოდი.

6.2. ფიდერებზე შესყიდვის და დარიცხვის დაბალანსება. დასკვნა.

გამოყენებული ლიტერატურა.

დანართები.

## შ ე ს ა ვ ა ლ ი

საქართველოში მიმდინარეობს ახალი საზოგადოებრივი სისტემის ფორმირების პროცესი. ქვეყანაში მყარდება პოლიტიკური და სამეურნეო ურთიერთობათა ახალი სისტემა, რომელმაც უნდა შექმნას საქართველოს დამოუკიდებელი არსებობისა და მდგრადი განვითარების პრინციპულად ახალი პირობები. აღნიშნულ პროცესში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ენერგეტიკული სექტორის გარდაქმნისა და მისი განვითარების ეფექტური პირობების შექმნას. ენერგეტიკულმა სექტორმა უნდა შექმნას ქვეყნის ეკონომიკის სტაბილური ფუნქციონირებისა და მდგრადი განვითარების საფუძველი. ამავდროს, მსოფლიოში მიმდინარე გლობალური პოლიტიკური და ეკონომიკური პროცესების ფონზე, საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორს შეუძლია ეფექტურად ჩაერთოს რეგიონში ენერჯის წარმოების, ტრანსპორტირებისა და მოხმარების პროცესებში, აქტიური მონაწილეობა მიიღოს მთელი რეგიონის ეკონომიკური ინტეგრაციისა და პოლიტიკური სტაბილურობის ეკონომიკური პირობების ჩამოყალიბებაში.

ახალ პირობებში საჭირო გახდა ქვეყნის მთელი ენერგეტიკული სექტორის სისტემური გარდაქმნა, მისი ფუნქციონირების სრულიად ახალი წესისა და მენეჯმენტის ახალი ფორმების დამკვიდრება. ამასთან დაკავშირებით, საჭირო ხდება საქართველოს ენერგეტიკული პოლიტიკის სრული გადააზრება. ქვეყნისა და რეგიონის ერთიან ეკონომიკურ სივრცეში ენერგეტიკის ახალი როლისა და ფუნქციის, მათი რეალიზაციის ახალ ორგანიზაციულ ფორმათა ჩამოყალიბება.

დღეისათვის საქართველოს ენერგეტიკა უაღრესად რთულ პირობებში ფუნქციონირებს. მიმდინარეობს დარგის სტრუქტურული გარდაქმნა და ტექნიკური რეაბილიტაცია. სრულყოფილი ხდება ფართომამუტაბიანი პრივატიზაციის ჩატარებისა და ინვენსტიციების მოზიდვის პირობები.

საქართველოს გააჩნია განსაკუთრებულად ხელსაყრელი ბუნებრივი პირობები ჰიდროენერგეტიკის შემდგომი განვითარებისათვის. კარგი შესაძლებლობები იქმნება საქართველოს ენერგოსისტემის თავისებურებათა ეფექტური გამოყენების ბაზაზე ძვირადღირებული პიკური ელექტროენერჯის ექსპორტის განვითარებისათვის.

ახალ სოციალურ-ეკონომიკურ ვითარებაში არსებითად შეიცვლება ენერგორესურსების მოხმარების სტრუქტურა. საჭიროა ჩამოყალიბდეს პერსპექტიული ხედვა ენერგომოხმარების შესახებ როგორც კომუნალური, ასევე სამრეწველო სფეროებისათვის, საჭიროა განისაზღვროს ამ მოთხოვნათა სახელმწიფო რეგულირების ფორმები და მექანიზმი. ყურადღებას იმსახურებს საქართველოს მსხვილ ენერგომომხმარებელ საწარმოთა განვითარების პერსპექტივა.

ენერგორესურსების მოხმარების ეფექტურობის მკვეთრი ამაღლების ამოცანა, როგორც ქვეყნის ენერგეტიკული კომპლექსის მდგომარეობის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი ფაქტორი, ჯერ კიდევ არ გამხდარა კრიტიკული ანალიზის ობიექტი. ენერგოწარმოების პრობლემათა გადაწყვეტის პროცესი მჭიდრო კავშირში უნდა იყოს ენერგომომხმარების რაციონალიზაციის პრობლემებთან.

ქვეყანაში საბაზრო ეკონომიკის განვითარების თანამედროვე პირობებში აქტუალურია ცალკეულ ლოკალურ მანაწილებელ ელექტრულ ქსელებში მთელი რიგი ტექნიკური ხასიათის ამოცანათა ურთიერთ დამოუკიდებელი გადაწყვეტა. მაგრამ ისეთი ხასიათის ამოცანა, როგორცაა მოცემულ მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია, თავისი ამონახსნის შედეგებით იგი გავლენას ახდენს მთლიანად ელექტრული სისტემის თითქმის ყველა ელემენტის მუშაობის რეჟიმზე. აქედან გამომდინარე, ასეთი ხასიათის ამოცანის ამოხსნა სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენების გარეშე გამოიწვევს მნიშვნელოვან ცდომილებას და ასევე ცდომილებების შემცველი იქნება ქსელში ამოხსნის შედეგების განხორციელებით გამოწვეული ტექნიკურ-ეკონომიკური ეფექტის შეფასების პარამეტრები. იმავდროულად, ელექტრულ ქსელში დამოუკიდებელი უწყებრივი ქვედანაყოფების არსებობა აძნელებს სისტემის ყველა საფეხურის ძაბვათა ქსელების ერთდროული გათვალისწინების პრაქტიკულ რეალიზაციას. ეს გარემოება გარკვეულწილად გვაიძულებს უარი ვთქვათ სისტემური მიდგომის პრინციპის სრულმასშტაბოვანი რეალიზაციის კლასიკურ მეთოდებზე და ცნობილი საწყისი ინფორმაციის პირობებში ვისარგებლოთ ეკვივალენტობის სხვადასხვა მეთოდებით. ასეთი მიდგომა საშუალებას მოგვცემს ადვილად გადავლახოთ ის სიძნელები, რომლებიც წარმოიშობა მთლიანი ქსელისათვის კონფიგურაციის, ელემენტთა ელექტრული პარამეტრებისა და სამომხმარებლო კვანძებში დატვირთვების შესახებ სრულყოფილი და საკმარისი ინფორმაციის მიღებასთან დაკავშირებით.

გარე სამყარო შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ურთიერთდაკავშირებული უსასრულო რაოდენობის კომპონენტთა ერთობლიობა. სისტემურს უწოდებენ კომპონენტთა იმ ნაწილს, რომელთათვისაც პრაქტიკული ამოცანის საკმარისი სიზუსტით ამოხსნისას შესაძლებელია უგულველვყოთ გარე სამყაროსთან გარკვეული სახის კავშირები. ამ თვალსაზრისით სისტემური მიდგომა ეწოდება მიდგომას, რომლის დროს მხედველობაში მიიღება განსახილველ კომპონენტებსა და გარე სამყაროს შორის შედარებით არსებითი კავშირები ანუ მოიძებნოს კომპონენტთა ისეთი მინიმალური რაოდენობა, რომელიც გაითვალისწინებს დასმული ამოცანის გადაწყვეტაზე ტექნიკური, ეკონომიკური და სოციალური ფაქტორების გავლენას. ამასთან, დადგენილი უნდა იქნეს ის კავშირები, რომლებიც შეიძლება განხილული იქნეს, როგორც დასმული ამოცანის საზღვარი და, რომელიც შესაძლებლობას მოგვცემს განვიხილოთ ქსელის ნაწილი დანარჩენი ნაწილისაგან გამოყოფილად და ამ ნაწილში დასმული ამოცანის ამოხსნის შედეგები საკმარისი სიზუსტით მიუახლოვდება ქსელის ყველა ნაწილის ერთდროული გათვალისწინებისას იმავე ამოცანის ამოხსნის შედეგებს.

ისტორიულად ჩამოყალიბებულ გარემოებათა გამო საქართველოს ენერგოსისტემა მუშაობს სამომხმარებლო კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის დაბალი ხარისხის პირობებში. ეს, მომხმარებელთან ელექტროენერჯის გადაცემისას იწვევს მისი თანმხლები მნიშვნელოვანი სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემასაც. ამასთან, რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა მკვებავ (110კვ და მეტი ძაბვის) და მანაწილებელ (0,38-35კვ ძაბვის) ქსელებში



დაკავშირებულია რიგ არასასურველ მოვლენებთან, რომლებიც იწვევენ, როგორც ქსელის, ასევე მომხმარებელთა მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელთა გაუარესებას, რაც უარყოფითად მოქმედებს საწარმოთა მანქანა-დანადგარებისა და მექანიზმების მუშაობაზე, მათ მწარმოებლობაზე. თვითონ ქსელის მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელთა გაუარესება გამომდინარეობს, ერთის მხრივ, გადასაცემი რეაქტიული სიმძლავრისა და მეორეს მხრივ, ქსელში სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგების გაზრდით, რაც თავის მხრივ ამცირებს ქსელის ელემენტების გამტარუნარიანობას გადასაცემი აქტიური სიმძლავრის თვალსაზრისით და ამასთან, ქსელში დანაკარგების გაზრდა ელექტროსადგურებზე ზრდის პირველადი ენერგორესურსის ხარჯს.

ზოგადად, ელექტროსისტემაში რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტი მერყეობს  $\text{tg}\alpha=0,65-0,75$  ფარგლებში. ეს ნიშნავს მას, რომ ქსელში ამ პირობებში აქტიურ სიმძლავრესთან ერთად რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი გადაცემით აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები იზრდება დაახლოებით 50-60%-ით. აქედან გამომდინარე, გადასაცემი რეაქტიული სიმძლავრის ეკონომიკურად დასაბუთებულ მნიშვნელობამდე დაყვანის ამოცანის გადაწყვეტა აქტუალურია და მნიშვნელოვანი ეკონომიკური ეფექტით ხასიათდება.

აქტიური სიმძლავრის მოხმარების კვანძებში რეაქტიულ სიმძლავრეს ძირითადად ინდუქციური ხასიათი გააჩნია, ე.ი. მოიხმარება ინდუქციურ-რეაქტიული სიმძლავრე. ქსელის ელემენტების გავლით მისი გადადინების შემცირების მიზნით სამომხმარებლო კვანძებში გამოიყენება მაკომპენსირებელი დანადგარები, რომლებიც ამ შემთხვევაში წარმოადგენენ კონდენსატორთა სტატიკურ ბატარეას,

სინქრონულ კომპენსატორებს და სხვ. ამასთან, კონდენსატორთა სტატიკური ბატარეა ყოველთვის გასცემს ქსელში ინდუქციური ხასიათის რეაქტიულ სიმძლავრეს და იგი შეიძლება იყოს როგორც რეგულირებადი, ასევე არარეგულირებადი. სინქრონული კომპენსატორი კი აგზნების დენის ცვლილების ხარჯზე შეიძლება მუშაობდეს ინდუქციური სიმძლავრის როგორც მოხმარების, ასევე გენერაციის რეჟიმში.

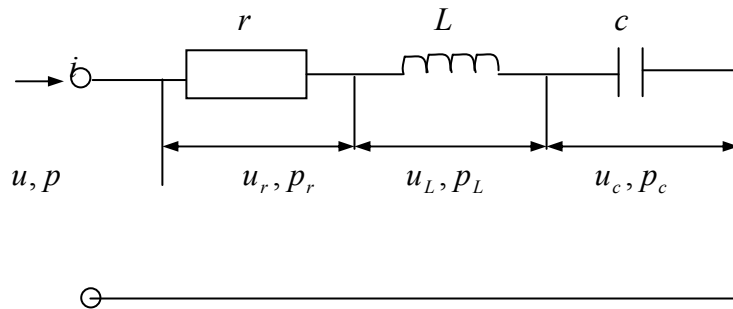
ქსელში ნებისმიერი სახის მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება მოითხოვს დამატებით კაპიტალდაბანდებასა და შესაბამის ყოველწლიურ საექსპლუატაციო ხარჯებს. ამიტომ რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის საკითხი ტექნიკურ-ეკონომიკური ხასიათის ამოცანათა კლასს განეკუთვნება და მისი ამოხსნის მიზანია ისეთი ამონახსნის მოძებნა, რომელიც ქსელისა და მომხმარებელთა მუშაობის ტექნიკურად დასაშვებ პირობებში უზრუნველყოფს მაქსიმალურ ეკონომიკურ ეფექტს.

## თავი 1. რეაქტიული სიმძლავრე ელექტრული ქსელში

### 1.1. ენერგეტიკული პროცესი ცვლადი დენის წრედში

ცვლადი დენის წრედში მყისი სიმძლავრე  $p = ui$  წარმოადგენს დროის ფუნქციას, რომელიც ამ წრედის ცალკეულ უბნებზე მყისი სიმძლავრეების ჯამის ტოლია (ნახ.1.1)

$$p = ui = p_r + p_L + p_c = i^2 r + \frac{d}{dt}(W_{\text{მაგნ}}) + \frac{d}{dt}(W_{\text{ელ}}),$$



ნახ. 1.1

სადაც:

- სიმძლავრე  $p_r = i^2 r$  ხასიათდება მუდამ დადებითი მნიშვნელობით და წარმოადგენს ენერგიის მოხმარების შეუქცევად პროცესს. მას აქტიურ სიმძლავრეს უწოდებენ;
- სიმძლავრე  $p_L = \frac{d}{dt}(W_{\text{მაგნ}})$ , როცა  $p_L > 0$  განსაზღვრავს ქსელის ინდუქციური ელემენტის მაგნიტურ ველში ენერგიის შემოსვლის სიჩქარეს და როცა  $p_L < 0$  ამ ველიდან წყაროში ენერგიის დაბრუნების სიჩქარეს.  $p_L$  სიმძლავრის ინდუქციურ-რეაქტიულ სიმძლავრეს უწოდებენ;

– სიმძლავრე  $p_c = \frac{d}{dt}(W_{\text{კლ}})$ , როცა  $p_c > 0$  განსაზღვრავს კონდენსატორული ელემენტის ელექტრულ ქსელში ენერჯის შემოსვლის სიჩქარეს და როცა

–  $p_c < 0$  ამ ველიდან წყაროში ენერჯის შემოსვლის სიჩქარეს.  $p_c$  სიმძლავრეს ტევადურ-რეაქტიულ სიმძლავრეს უწოდებენ.

როგორც ელექტროტექნიკიდანაა ცნობილი ელექტრული წრედის ცალკეულ უბნებზე მყისი სიმძლავრეები გამოითვლება ფორმულებით [46].

აქტიური სიმძლავრე

$$p_r = u_r \cdot i = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) \quad (1.1)$$

ინდუქციურ რეაქტიული სიმძლავრე

$$p_L = u_L i = U_L I \sin 2\omega t$$

ტევადურ - რეაქტიული სიმძლავრე

$$p_c = u_c i = U_c I \sin 2\omega t$$

ანუ რეაქტიული სიმძლავრე

$$p_x = p_L + p_c = UI \sin \varphi \sin 2\omega t. \quad (1.2)$$

მთელი წრედის მომჭერებზე მყისი სიმძლავრე გამოითვლება ფორმულით

$$p = p_r + (p_L + p_c) = p_r + p_x = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (1.3)$$

მოყვანილი გამოსახულებიდან ჩანს, რომ პერიოდის განმავლობაში აქტიური სიმძლავრე.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_r dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos \varphi dt = UI \cos \varphi$$

ე.ი.

$$P = UI \cos \varphi, \quad (1.4)$$

იმავე პერიოდის განმავლობაში რეაქტიული მყისი სიმძლავრე ირხევა  $2\omega$  კუთხური სიხშირით და რხევის ამპლიტუდა რეაქტიული სიმძლავრის აბსოლიტური მნიშვნელობის ტოლია

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1.5)$$

ქვემოთ ნახაზზე (ნახ. 1.2) ნაჩვენებია მთელი ელექტრული წრედის მომჭერებზე დენის, ძაბვის და სიმძლავრის მყისი მნიშვნელობების ცვლილების დიაგრამა, რომელიც აგებულია შემთხვევისთვის როცა  $U_L > U_c$ .

წრედის სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობა

$$P_{\text{საშ}} = UI \cos \varphi \quad (1.6)$$

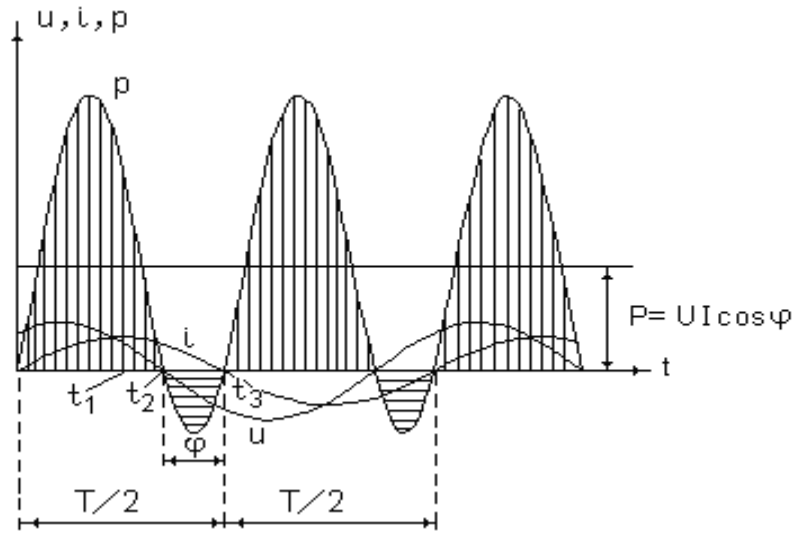
და ამ საშუალო მნიშვნელობების მიმართ მიმდინარეობს მყისი სიმძლავრის რხევა  $UI$  ამპლიტუდით.

ენერგეტიკული პროცესი, რომელიც მიმდინარეობს დენის პირველნახევარ პერიოდში, ანუ  $(0, t_3)$  ინტერვალში ნაჩვენებია 1.3 ნახაზზე.

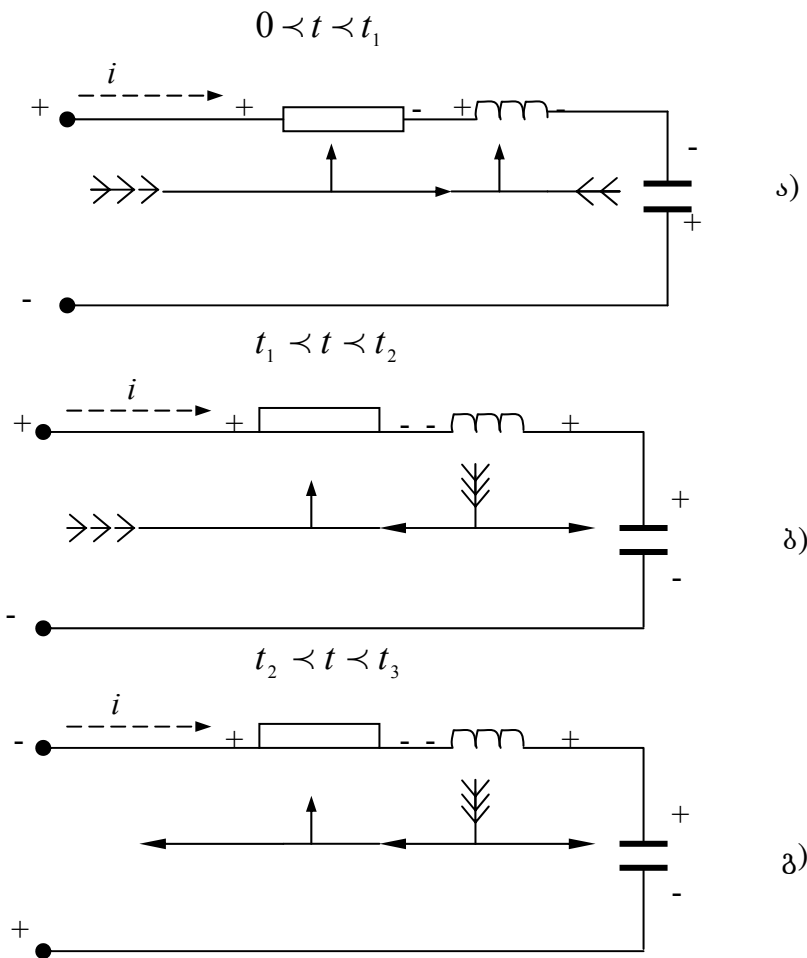
1.3ა ნახაზი შეესაბამება  $(0, t_1)$  ინტერვალს, როცა დენი იზრდება ნულიდან თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე. დროის ამ ინტერვალში ენერგია გროვდება წრედის ინდუქციურ წინააღობაში, ხოლო კონდენსატორში დაგროვილი ენერგია ბრუნდება უკან და გადადის ინდუქციური ელემენტის მაგნიტური ველის ენერგიაში. ამ პერიოდში მიმდინარეობს კონდენსატორის განმუხტვა. რადგანაც, ჩვენს შემთხვევაში  $\omega L > \frac{1}{\omega c}$  და შესაბამისად  $p_L > p_c$ , წყაროდან ინდუქციურ ელემენტში შედის დამატებითი ენერგია. წყაროდან წრედში შემოდის აგრეთვე ენერგია, რომელიც მოიხმარება წრედის აქტიური წინააღობის მიერ.

1.3ბ ნახაზი შეესაბამება  $(t_1, t_2)$  ინტერვალს, როცა წრედში დენი მცირდება და ინდუქტივობის მაგნიტური ველიდან ენერგია ბრუნდება უკან, რომლის ნაწილი გადადის ტევადობაში ელექტრული ველის ენერგიის სახით (ამ დროს კონდენსატორი იმუხტება), ხოლო ნაწილი გარდაიქმნება სითბოდ აქტიურ წინაღობაში. დროის ამ ინტერვალში დენი წრედში ჯერ კიდევ საკმარისად დიდია და, შესაბამისად, აქტიური წინაღობის მიერ მოხმარებული ენერგია  $i_r^2$  დიდია, რის გამოც დენის წყარო, როგორც დროის წინა ინტერვალში, აგზავნის ენერგიას წრედში, რაც აუცილებელია აქტიური წინაღობის მიერ მოხმარებული ენერგიის შესავსებად. დროის  $t_2$  მომენტი იმით ხასიათდება რომ  $i^2 r$  სიდიდე იმდენად შემცირდა, რომ ინდუქტივობის მაგნიტური ენერგიის ხარჯზე წარმოებს ენერგიის მიწოდება როგორც ტევადობის ელექტრულ ველში, ასევე აქტიური წინაღობაში.

1.3გ ნახაზი შეესაბამება დროის შემდეგ ინტერვალს  $(t_2, t_3)$ , როცა დენი მცირდება ნულამდე. დროის ამ შუალედში ენერგია ბრუნდება წყაროში. ამ ინტერვალში  $p < 0$  ე.ი. წყარო ქსელიდან იღებს ენერგიას, რომელიც დაგროვილი იყო ინდუქტივობაში.



ნახ. 1.2



ნახ. 1.3

ამრიგად დენის პირველ ნახევარ პერიოდში მთავრდება წრედის ენერჯის რხევის ერთი ციკლი. მეორე ნახევარ პერიოდში წრედში

მიმდინარე ენერგეტიკული პროცესი მეორდება და ამასთან დენის და ძაბვის მიმართულებები იცვლება საწინააღმდეგოდ.

ელექტრულ წრედში მიმდინარე ზემოთ აღწერილი ენერგეტიკული პროცესი აშკარად მიუთითებს მას, რომ როცა ინდუქტივობის მაგნიტურ ველში და ტევადობის ელექტრულ ველში, ენერგიები ერთმანეთის თანაზომიდია მაშინ, ჯერ-ერთი, კვების წყაროდან წრედში შემოსული ენერგია შედარებით მცირდება და მეორეც, თუ ინდუქციური და ტევადური ელემენტები ტერიტორიულად ერთმანეთთან ახლოსაა, მაშინ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადი მცირდება და შესაბამისად მცირდება სიმძლავრის დანაკარგებიც.

## 1.2 რეაქტიული სიმძლავრის თავისებურებანი

ელექტრული ქსელის მუშა რეჟიმების ანგარიშებში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების მნიშვნელობები გამოიყენება ერთდროულად. ყველა გამოთვლით ოპერაციებში რეაქტიული სიმძლავრე გამოიყენება აქტიურის ანალოგიურად, მაგრამ ეს არ ნიშნავს მას, რომ ეს სიმძლავრეები ანალოგიური სიდიდეებია.

აქტიური სიმძლავრე ძირითადად მოიხმარება ელექტრომიმღების მიერ, სადაც ელექტრული ენერგია გარდაიქმნება სხვა სახის ენერგიად (მექანიკური, სითბური, სინათლის და სხვა). ნაწილობრივ აქტიური სიმძლავრე იკარგება ქსელის ელემენტების აქტიური წინააღმდეგობებში. რეაქტიული სიმძლავრე მოიხმარება არა მარტო ელექტრომიმღების მიერ, არამედ მნიშვნელოვან წილად ქსელის ელემენტების მიერაც. ზოგადად რეაქტიული სიმძლავრე მოიხმარება ქსელის ყველა იმ ელემენტის მიერ, სადაც დენი ფაზით ჩამორჩება ძაბვას.



აქტიური სიმძლავრის გენერაცია წარმოებს ელექტროსადგურებზე სინქრონული გენერატორების მიერ. რეაქტიული სიმძლავრე კი შეიძლება გენერირებული იქნეს ქსელის ნებისმიერი წერტილში. იგი შეიძლება გენერირდეს სინქრონული მანქანებით ჭარბი აგზნების პირობებში, ხაზების ტევადურ გამტარობაში, კონდენსატორთა ბატარეებში და ა.შ. შეიძლება ითქვას, რომ რეაქტიული სიმძლავრე გენერირდება ქსელის ყველა იმ ელემენტის მიერ სადაც დენი ფაზით წინ უსწრებს ძაბვას.

აქტიური სიმძლავრის გადაცემის მიზანია მომხმარებელთა ელექტრომომარაგება, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა თანმდევი მოვლენაა. უნდა აღინიშნოს, რომ რეაქტიული სიმძლავრე ახასიათებს მხოლოდ ცვლად დენს. რეაქტიული სიმძლავრის ქსელში განაწილების სურათის შეცვლა შესაძლებელია სპეციალური მაკომპენსირებელი დანადგარის მეშვეობით. ამ სიმძლავრის კომპენსაცია გარკვეულ წილად იძულებითი ღონისძიებაა, რადგანაც რიგ შემთხვევებში გენერატორების ქონებული რეაქტიული სიმძლავრე არასაკმარისია მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული დატვირთვის დასაკმაყოფილებლად.

რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემის არაეკონომიკურობა კარნახობს, მას რომ ამ სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები დაყენებული უნდა იქნეს მანაწილებელ ქსელში უშუალოდ მომხმარებელთან. ამასთან ეს დანადგარები რეაქტიული სიმძლავრის გენერირების თვალსაზრისით უნდა იყოს რეგულირებადი, რადგანაც მომხმარებლის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე იცვლება მომხმარებელთა მუშაობის რეჟიმის ცვლილებასთან ერთად.

როგორც ცნობილია ცვლადი დენის ნებისმიერი ელექტრული ქსელისთვის დროის ყველა მომენტში უნდა სრულდებოდეს სრული სიმძლავრის ბალანსი. სიმძლავრეთა ბალანსი აუცილებელი პირობაა, მაგრამ რეაქტიულ სიმძლავრესთან მიმართებაში მნიშვნელოვანია რომ იგი უნდა სრულდებოდეს არა მხოლოდ მთელი სისტემისთვის, არამედ რეგიონული ქსელებისთვის, რადგანაც მთელი რიგი ტექნიკური მიზეზების გამო რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემისას შეიძლება წარმოიშვას სხვადასხვა სახის სიძნელები.

რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დარღვევა იწვევს ქსელებში ძაბვის დონის ცვლილებას. კერძოდ, ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის პირობებში ძაბვა ქსელში მაღალია, ხოლო დეფიციტის პირობებში კი პირიქით – დაბალი.

ენერგოსისტემებში, რომლებიც დეფიციტურია აქტიური სიმძლავრის მიხედვით, ძაბვა ნომინალურზე დაბალია. როცა სისტემა დეფიციტურია აქტიული სიმძლავრის მიხედვით, იგი დეფიციტურია რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვითაც. ბალანსის უზრუნველყოფის მიზნით აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის დასაფარავად საჭირო აქტიური სიმძლავრე შემოაქვთ მეზობელი ენერგოსისტემიდან, სადაც არსებობს ჭარბი აქტიური სიმძლავრე. რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტის დასაფარავად მისი მეზობელი ენერგოსისტემიდან შემოტანა არაეფექტურია. უფრო ეფექტურია დეფიციტი დაფარული იქნეს მოცემულ სისტემაში მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების გზით.

ელექტრულ სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად წყაროს, როგორც ზემოთ ავლინებით, წარმოადგენს ელექტროსადგურების სინქრონული გენერატორები. ამასთან, ამ გენერატორთა რეაქტიული სიმძლავრის შეცვლა მიიღწევა აგზნების დენის ცვლილებით. ნორმალური დატვირთვის რეჟიმში გენერატორები გამოიმუშავენ ნომინალურ აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეს. აგზნების დენის შემცირებით შევამცირებთ გენერატორის მიერ ქსელში გაცემულ რეაქტიულ სიმძლავრეს. გენერატორის აქტიური დატვირთვის შემცირებისას შესაძლებელია გავზარდოთ მის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე, მაგრამ ასეთი გაზრდა დასშვებია მხოლოდ გარკვეულ პირობებში, რომელიც ზემოდან შეიზღუდება როგორც სტატორის, ასევე როტორის ნომინალური დენის მიხედვით.

გენერატორის რეაქტიული დატვირთვის გაზრდა აქტიური დატვირთვის შემცირების ხარჯზე, განსაკუთრებით სისტემის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში, ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია. ამ დროს უფრო ეფექტურია რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება, რასაც პრაქტიკულად თითქმის ყოველთვის მიმართავენ.

გენერატორები ნომინალური დატვირთვის პირობებში იძლევიან ქსელის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული დატვირთვის დაახლოებით 60% რეაქტიული სიმძლავრეს. ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე შეიძლება ჩავთვალოთ 20%-მდე [35]. ამასთან ამ სიმძლავრეთა გადაცემა მომხმარებლის კვანძებამდე როგორც ტექნიკურად, ასევე ეკონომიკურად ყოველთვის არ არის მიზანშეწონილი. ამრიგად,

მაკომპენსირებელი დანადგარების მიერ გენერირებული რაქტიული სიმძლავრის სიდიდე უნდა ჭარბობდეს მოთხოვნილი რაქტიული დატვირთვის 20%-ს მაინც.

რაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, როგორც ყოველგვარი ტექნიკური ღონისძიება, შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა მიზნისთვის. კერძოდ, ჯერ-ერთი რაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია აუცილებელია რაქტიული სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან გამომდინარე; მეორე-მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება გამოიყენება ქსელში აქტიური სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგების შემცირებისთვის და, მესამე, მაკომპენსირებელი დანადგარების საშუალებით შეიძლება ვარეგულიროთ ძაბვა მომხმარებელთა სალტეებზე.

### 1.3 რაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზანი

რაქტიული სიმძლავრე პრაქტიკულად მოხერხებული ფორმაა ცვლადი დენის წრედში გარდამავალი პროცესების მიმდინარეობის ანალიზის თვალსაზრისით.

რადგანაც მთელ რიგ შემთხვევებში რაქტიული სიმძლავრის ბალანსის უზრუნველსაყოფად საჭირო ხდება ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება, ქსელის ექსპლუატაციის პირობებიდან გამომდინარე ისმება ამოცანა ამ დანადგარების მაღალ ეფექტურად გამოყენების თვალსაზრისით. ამ ამოცანის ამოხსნისთვის პირველ რიგში უნდა დადგინდეს რაქტიული სიმძლავრის გადაცემისას რა მოვლენებთან გვაქვს საქმე ქსელში და რა გავლენას ახდენს მისი

გადაცემა ელექტრომომარაგების სისტემის მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე.

ელექტროსისტემებში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად მომხმარებლებს წარმოადგენს სინქრონული ძრავები, ვენტილური გარდამსახები, ინდუქციური ელექტროდუმელები, ტრანსფორმატორები, საჰაერო ხაზები და სხვ. ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგი მთლიანი რეაქტიული დატვირთვის თითქმის 50%-ს აღწევს. ამასთან, კარგების 70-75% მოდის ტრანსფორმატორებში კარგვებზე. სამრეწველო საწარმოებში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითადი მომხმარებელია სინქრონული ძრავები, რომლებზედაც მოდის საწარმოს მიერ მოთხოვნილი ჯამური რეაქტიული სიმძლავრის 65-70% [21].

როგორც ცნობილია რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა იწვევს ქსელის ელემენტების დატვირთვის გაზრდას და შესაბამისად, ძაბვისა და სიმძლავრის დანაკარგების დამატებით ზრდას. ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების გაზრდა იწვევს ელექტროსადგურებზე პირველადი ელექტრორესურსების და შესაბამისად, ფულადი და მატერიალური ხარჯების ზრდას. რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების ზრდა კიდევ უფრო ზრდის სისტემის ჯამურ რეაქტიულ დატვირთვას, რაც მიუთითებს მასზე, რომ აუცილებელი ხდება რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი გენერაცია ელექტრომომარაგების სისტემებში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების გზით და შედეგად მინიმუმამდე დავიყვანოთ რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა ქსელის ელემენტების გავლით.

მანაწილებელ ქსელებში დაყენებული მაკომპენსირებელი დანადგარები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ძაბვის

რეგულირებისათვის და ამიტომ ამ ქსელებში მაკომპენსირებელი დანადგარების მუშაობის ეკონომიკურობა განხილული უნდა იქნეს ძაბვის რეჟიმზე მათი ზემოქმედების თვალსაზრისით. ქსელში ძაბვის დაბალი მნიშვნელობა როგორც წესი დაკავშირებულია რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტთან. ხოლო მაღალი მნიშვნელობა კი მის სიჭარბესთან.

პირველ შემთხვევაში მუშაობაში ჩართული უნდა იქნეს კონდენსატორთა ახალ ჯგუფი, ხოლო მეორე შემთხვევაში კი უნდა მოხდეს ნაწილის ამორთვა. ამ გზით ძაბვის რეჟიმის დასაშვები პარამეტრების მიხედვით უზრუნველყოფილი იქნება რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი.

სხვა გარემოებასთან გვაქვს საქმე, როცა რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სახით გამოიყენება სინქრონული ძრავები. ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით სინქრონული ძრავები იძლევიან კონდენსატორთა ბატარეის ანალოგიურ ეფექტს, მაგრამ მათი გამოყენება დაკავშირებულია აქტიური სიმძლავრის მნიშვნელოვან დანაკარგებთან თვითონ ძრავებში. ამიტომ ძაბვის რეგულირება სინქრონული ძრავების აგზნების დენის ცვლილებით ყოველთვის ეკონომიკურად გამართლებული არ არის.

რეგულირებადი კონდენსატორთა ბატერიის გამოყენება პრაქტიკულად მიზანშეწონილია ყველა ძაბვის მანაწილებელ ქსელებში. არარეგულირებადი კომპენსატორთა ბატარეია კი მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ მხოლოდ იმ სიდიდით, რაც განისაზღვრება ქსელის მოცემული კვანძის მინიმალური რეაქტიული დატვირთვით.

მკვებავ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის განაწილების თვალსაზრისით მოთხოვნები შეიძლება სხვადასხვა იყოს:

- იმ შემთხვევაში, როცა მკვებავ ქსელში ენერჯის მიმღებ ქვესადგურზე არ გვაქვს ძაბვის რეგულირების ცენტრალიზებული მოწყობილობა მანაწილებელ ქსელში ძაბვის რეგულირების მიზნით, მაშინ ქვესადგურებზე ძაბვას წაეყენება ძალიან მკაცრი მოთხოვნები – მისი მერყეობა უნდა თავსდებოდეს საკმარისად ვიწრო ფარგლებში;
- იმ შემთხვევაში, როცა მკვებავი ქსელის მიმღებ ქვესადგურზე გვაქვს ზემოაღნიშნული სახის ძაბვის რეგულირების მოწყობილობა რეგულირების ფართო დიაპაზონით, მაშინ მანაწილებელი ქსელის მხრიდან მიმღები ქვესადგურის სალტებზე ძაბვის მნიშვნელობის მიმართ რაიმე დამატებითი პირობები არ მოითხოვება. ამ დროს მკვებავ ქსელებში რეაქტიული სიმძლავრის განაწილება შეიძლება განვახორციელოთ თვით მკვებავი ქსელების მუშაობის ეკონომიკურობის პირობით. ამ შემთხვევაში განმსაზღვრელია ქსელში აქტიური სიმძლავრის მინიმიზაციის პირობა საკვანძო წერტილებში ძაბვის უდიდესი დასაშვები მნიშვნელობის შეზღუდვისა და კვების წყაროების მუშა რეაქტიული სიმძლავრის გათვალისწინების პირობებში.

#### **1.4 რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების ზოგადი დახასიათება**

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ეს არის მაკომპენსირებელი დანადგარის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის მიზნობრივი გენერაცია ან მოხმარება.

ელექტრულ ქსელებში მაკომპენსირებელ დანადგარებს წარმოადგენს სინქრონული კონდენსატორები, კონდენსატორთა ბატარეა, რეაქტორები და რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები. მაკომპენსირებელი დანადგარები პირობითად შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად: 1. დანადგარები მომხმარებელთა და ქსელის ელემენტების მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისათვის – სინქრონული კომპენსატორები და განივად ჩართული კონდენსატორთა ბატარეა; 2. დანადგარები ხაზების რეაქტიული ელექტრული პარამეტრების კომპენსაციისათვის – გრძივად ჩართული კონდენსატორთა ბატარეა და განივად ჩართული რეაქტორები.

*სინქრონული კომპენსატორები* წარმოადგენს უქმ სვლაზე მომუშავე შემსუბუქებული კონსტრუქციის სინქრონულ ძრავას [44]. ჭარბი აგზნების რეჟიმში მუშაობისას კომპენსატორი წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის გენერატორს, ხოლო არასრული აგზნების რეჟიმში მუშაობისას კი რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებელს. აღზნების დენის ცვლილება, როგორც წესი ავტომატიზირებულია.

უდიდესი სიმძლავრე, რომელიც შეიძლება კომპენსატორმა განავითაროს ჭარბი აგზნების რეჟიმში, მის ნომინალურ სიმძლავრეს შეადგენს. მუშაობისას კომპენსატორი ქსელიდან მოითხოვს აქტიურ სიმძლავრეს, რომელიც მისი ნომინალური სიმძლავრის 2-4%-ს შეადგენს და განიხილება როგორც დანაკარგები კომპენსატორში. კონსტრუქციის თავისებურების გამო არასრული აგზნების რეჟიმში კომპენსატორი ქსელიდან იღებს  $Q = 0,5Q_0$  სიმძლავრეს.



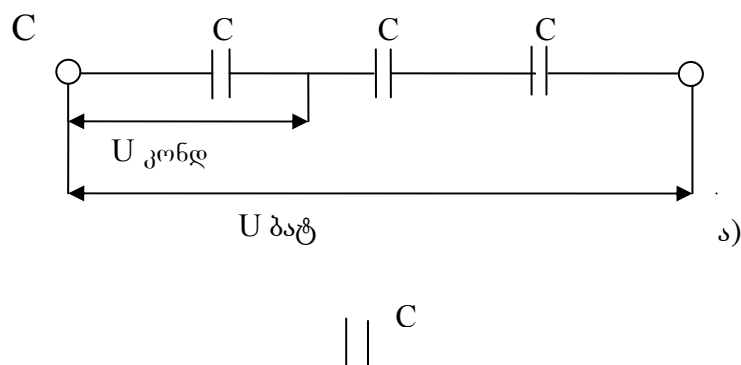
სინქრონულ კომპენსატორი მზადდება რამდენიმე ათეული მგვარ სიმძლავრით.

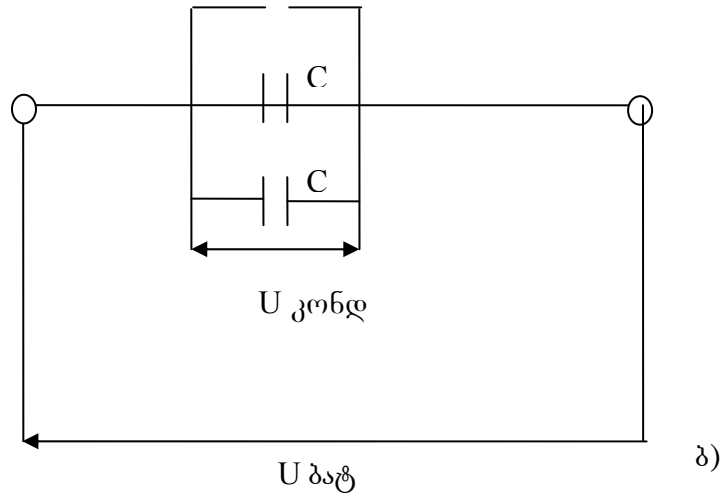
სინქრონული კომპენსატორის დადებით თვისებას შეადგენს: ა) ქსელში ძაბვის ვარდნისას იზრდება კომპენსატორის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე აგზნების იმავე დენის პირობებშიც კი, ხოლო ძაბვის ამაღლებისას კი პირიქით მცირდება გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე. კომპენსატორის ეს თვისება ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით დადებით მარეგულირებელ ეფექტს წარმოადგენს; ბ) გენერირებული ან მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის მდორე ან ავტომატური რეგულირება.

კომპენსატორის უარყოფით მხარეს შეადგენს: ა) შეიძლება დაყენებულ იქნეს მხოლოდ 6 ან 10 კვ ძაბვის ქსელში; ბ) ექსპლუატაციისა და მონტაჟის შედარებითი სირთულე; გ) აქტიური სიმძლავრის შედარებით დიდი დანაკარგები.

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

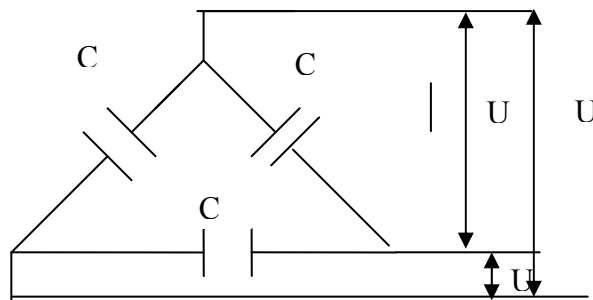
კონდენსატორთა ბატარეა კომპლექტდება მიმდევრობით და პარალელურად შეერთებული ცალკეული კონდენსატორებისაგან (ნახ. 1.4).



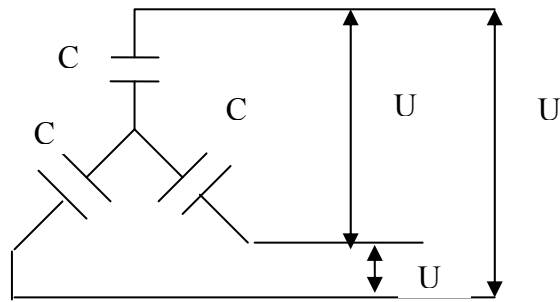


ნახ. 1.4

კონდენსატორები მზადდება 0,22-10,5 კვ ძაბვაზე 10-125 კვარ ერთეულოვანი სიმძლავრით. სამფაზა ქსელში კონდენსატორთა ბატარეა ჩაერთვება ვარსკვლავად (ნახ. 1.5,ა) ან სამკუთხედად (ნახ.1.5,ბ). სამკუთხედად შეერთებისას ბატარეის სიმძლავრე 3 ჯერ მეტია, ვიდრე ვარსკვლავად შეერთებისას. 1 კვ-მდე ძაბვის ქსელში შეერთება ხდება სამკუთხედად, ხოლო უფრო მაღალი ძაბვის შემთხვევაში კი ვარსკვლავად.



ა) ნახ. 1.5



ბ) ნახ. 1.5

ბატარეია შეიძლება იყოს რეგულირებადი და არარეგულირებადი. არარეგულირებად ბატარეაში კონდენსატორთა რიცხვი უცვლელია და ბატარეის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია მოცემულ კვანძში ქსელის მუშა ძაბვის სიდიდეზე და იგი არ უნდა აღემატებოდეს კვანძის უმცირეს რეაქტიულ დატვირთვას. რეგულირებად ბატარეაში კონდენსატორთა რიცხვი ქსელის რეჟიმისაგან დამოკიდებულებაში იცვლება ხელით ან ავტომატურად, რაც საშუალებას გვაძლევს ვარეგულიროთ ბატარეის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია. ამასთან რეგულირება წარმოებს საფეხუროვნად.

მუშაობისას კონდენსატორთა ბატარეა ქსელიდან იღებს აქტიურ სიმძლავრეს, რომელიც მისი ნომინალური სიმძლავრის 0,3-0,4%-ს შეადგენს და რომელიც იხარჯება კონდენსატორის დიელექტრიკისა და კორპუსში დანაკარგებზე.

სინქრონულ კომპენსატორთან შედარებით კონდენსატორთა ბატარეის უპირატესობა მდგომარეობს შემდეგში:

- შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს როგორც დაბლ (0,38კვ), ასევე შედარებით უფრო მაღალ (6-10კვ) ძაბვაზე;
- აქტიური სიმძლავრის შედარებით მცირე დანაკარგები;
- ექსპლუატაციის სიმარტივე;
- მონტაჟის სიმარტივე;

ბატარიის უარყოფითი მხარეა:

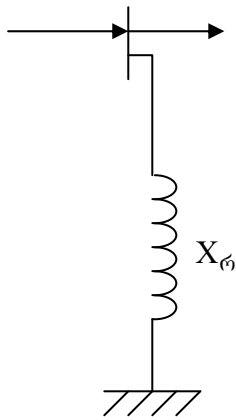
- გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის პირდაპირ კვადრატულ პროპორციული დამოკიდებულება ძაბვაზე რეგულირების უარყოფითი ეფექტით;
- რეაქტიული სიმძლავრის მხოლოდ გენერირების შესაძლებლობა;
- გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის საფეხუროვანი რეგულირება ან საერთოდ რეგულირების გარეშე;
- სამსახურის შედარებით მოკლე ვადა (8-10 წელი).

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

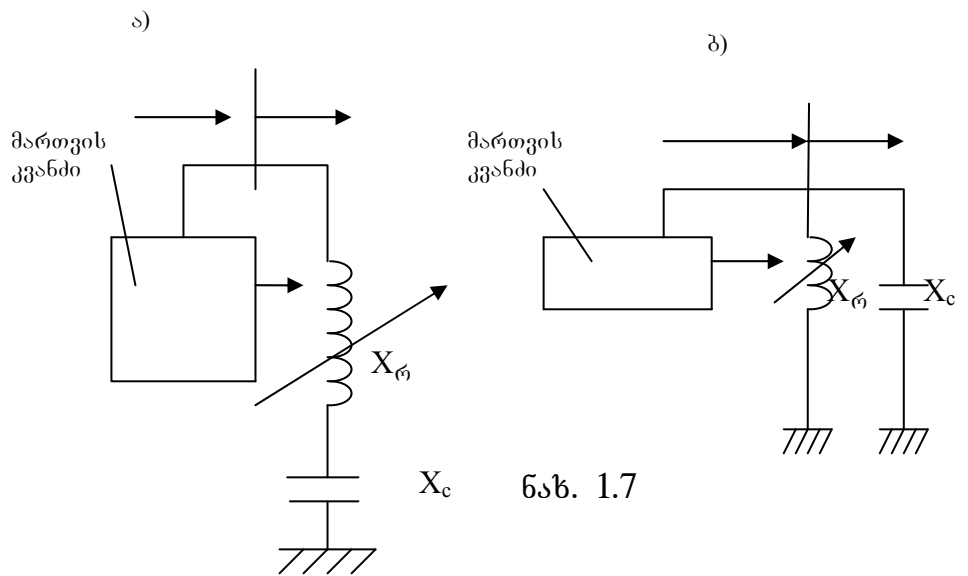
კონდენსატორთა ბატარეა შეიძლება დაყენებული იქნეს:

- უშუალოდ მომხმარებელთან (ინდივიდუალური კომპენსაცია);
- მანაწილებელ ქსელებში (ჯგუფური კომპენსაცია);
- ქვესადგურის დაბალი ძაბვის (0,38;6;10კვ) სალტებზე (ცენტრალიზებული კომპენსაცია).

მაკომპენსირებელ მოწყობილობას მიეკუთვნება აგრეთვე მამუნტებელი რეაქტორი (ნახ. 1.6) და რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები (ნახ. 1.7ა,ბ).



ნახ. 1.6



ნახ. 1.7

მაშუნტებელი რეაქტორი გამოიყენება ძირითადად ზემალალი ძაბვის (330კვ და მეტი) ქსელში, როგორც ხაზების მიერ გენერირებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარებელი. მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდე მოცემული კვანძის ძაბვის კვადრატის პროპორციულია. მაშუნტებელი რეაქტორი შეიძლება იყოს რეგულირებადი და არარეგულირებადი.

ქვესადგურის სალტეებზე ძაბვის დასაშვები გადახრის პირობებში რეგულირებადი მაშუნტებელი რეაქტორის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე იცვლება  $(0,8-1,1) U_{\sigma}^2 / X_h$  ფარგლებში, სადაც  $X_h$  რეაქტორის რეაქციული წინაღობაა.

რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროების დანიშნულებაა რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის ან მოხმარების მდორე რეგულირება, რაც მიიღწევა არარეგულირებად კონდენსატორთა ბატარეასთან მიმდევრობით (ნახ. 1.7 ა) ან პარალელურად (ნახ. 1.7 ბ) რეგულირებადი მაშუნტებელი რეაქტორის ჩართვით. რეგულირების სიმდოვრე მიიღწევა მართვის კვანძის გამოყენებით.

## თავი 2. სიმძლავრის დანაკარგები ელექტრულ ქსელებში. დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი

### 2.1 შესავალი

ენერგეტიკულ სისტემაში სათბობის ხარჯის ეკონომიის ერთ-ერთ ღონისძიებას წარმოადგენს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება.

ელექტრული ენერჯის დანაკარგების ანალიზისას მიღებულია განვასხვავოთ დანაკარგების შემდეგი სახეები [21] :

- დანაკარგების საანგარიშსწორებო სიდიდე ანუ *საანგარიშსწორებო დანაკარგები*, რომელიც წამოადგენს ყველა სახის წყაროს (სისტემის საკუთარი ელექტროსადგურები, სხვა უწყების ელექტროსადგურები და მეზობელი ელექტროსისტემა) მიერ მოცემულ (განსახილველ) სისტემაში შემოსულ და რეალიზებულ ელექტროენერჯიას შორის სხვაობას. ეს უკანასკნელი დადგენილი იქნება მომხმარებელთა მიერ დახარჯული ენერჯის საფასურის ამოღების მიხედვით.
- დანაკარგების საანგარიშო სიდიდე ანუ *ტექნიკური დანაკარგები*, რომელიც განისაზღვრება ქსელის მუშაობისას რეჟიმის პარამეტრის მიხედვით და განპირობებულია ელექტროენერჯის ხარჯით ქსელის ელემენტებში დენგამტარი ნაწილების გახურებაზე და ელექტრომაგნიტური ველის შექმნაზე;

- **კომერციული დანაკარგები,** რომელიც წარმოადგენს საანგარიშსწორებო და ტექნიკურ დანაკარგებს შორის სხვაობას. ეს დანაკარგები განპირობებულია, ერთის მხრივ, ტექნიკური დანაკარგების ანგარიშებში დაშვებული უზუსტობებით და, მეორეს მხრივ, ელექტროენერჯის არასრულყოფილი აღრიცხვის მექანიზმის არსებობით. კერძოდ: ელექტრომრიცხველთა მაჩვენებლების არაერთდროული და არასწორი აღრიცხვა; აღრიცხვისათვის გამოყენებული ხელსაწყოების ცდომილება; მოხმარებული ენერჯის საფასურის გადახდის უთანაბრობა; აღრიცხავი მოხმარებული ენერჯია; ენერჯის დატაცება და სხვა. ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირებისათვის არსებობს სხვადასხვა სახის ღონისძიება, რომლებიც პირობითად შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად – ორგანიზაციული და ტექნიკური ღონისძიებები.

- დანაკარგების შემცირების ორგანიზაციული ღონისძიება პრაქტიკულად არ მოითხოვს დამატებით კაპიტალურ ხარჯებს. აქ განიხილება ელექტრული ქსელისა და მთლიანად ელექტრული სისტემის მენეჯმენტის სრულყოფა და განვითარება. კერძოდ, ელექტრული ქსელების საექსპლოატაციო მომსახურების სრულყოფა და მათი მუშა სქემისა და მუშაობის რეჟიმის ოპტიმიზაცია, მოხმარებული ენერჯის აღრიცხვის მექანიზმის სრულყოფა, ენერჯის დატაცების საწინააღმდეგო ღონისძიებანი და ა.შ.
- ტექნიკური ღონისძიებანი მოითხოვენ დამატებით კაპიტალურ ხარჯებს, რომელიც გარკვეულ ნორმატიულ ვადაში მთლიანად

გამოსყიდული უნდა იქნეს დანაკარგების შემცირების შედეგად საექსპლოატაციო ხარჯებში მიღებული ეკონომიით.

ელექტრულ ქსელებში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების ამოცანა ენერგოსისტემის მუშაობის ეკონომიკურობის ამაღლების ზოგადი ამოცანის შემადგენელი ნაწილია.

ელექტრული ქსელების მთელი რიგი საპროექტო და საექსპლოატაციო ამოცანათა ამოსახსნელად საჭირო ხდება მათი დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშება, რომლის მიზანია ელექტრული ქსელის პარამეტრებისა და დატვირთვების შესახებ ინფორმაციის საფუძველზე ქსელის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების დადგენა.

გაანგარიშების საწყისი ინფორმაციას წარმოადგენს:

- ქსელის შეერთების სქემა;
- ქსელის ყველა კვანძის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების მნიშვნელობები, გარდა მახალანსირებელი კვანძისა;
- ძაბვის მნიშვნელობა ქსელის ერთ-ერთ კვანძში, რომელიც მიჩნეულია საყრდენ ძაბვად. ამ კვანძს საყრდენი ძაბვის კვანძს უწოდებენ.

ქსელის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრებს ანუ საძიებელ პარამეტრებს (საძიებელი ინფორმაცია) წარმოადგენს:

- ძაბვა ქსელის ყველა კვანძში;
- სიმძლავრეთა დანაკარგები მთლიანად ქსელში ანუ მის ცალკეულ უბანზე, როდესაც საჭიროა გამოვავლინოთ ქსელის გადატვირთული უბანი;
- დენი და სიმძლავრე ცალკეულ შტოში. დატვირთვის დენის მნიშვნელობა მოითხოვება რელეური დაცვის დანაყენების



შესარჩევად ან ცალკეული უბნის გადასამოწმებლად გახურებაზე დასაშვები დენის მიხედვით.

ქსელის მუშაობის რეჟიმის გასაანგარიშებლად, როგორც ცნობილია, გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდი, რომელიც გაანგარიშების პროცესის თვალსაზრისით შეიძლება იყოს პირდაპირი და იტერაციული.

გაანგარიშების პირდაპირი მეთოდის დროს საძიებელი სიდიდეები დადგენილი იქნება შესაბამისი განტოლებათა სისტემის უშუალო ამოხსნის გზით. გაანგარიშების იტერაციული მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში კი საძიებელი სიდიდეები განისაზღვრება მრავალჯერადი თანდათანობითი დაზუსტების გზით. ქსელის გართულებული სქემის პირობებში უპირატესობა გააჩნია იტერაციულ მეთოდს.

ქსელის კვანძებში დატვირთვის შესახებ ინფორმაცია შეიძლება მოცემული იქნეს სხვადასხვაგვარად. გაანგარიშების ცალკეული კვანძების დატვირთვის ერთობლიობა შეიძლება შეცვლილი იქნეს ელექტროენერჯის ეკვივალენტური მიმღებით, რომელიც ხასიათდება ამა თუ იმ თვისებით. გაანგარიშების საწყისს ეტაპზე ძაბვის საყრდენი კვანძის გარდა ყველა კვანძში უცნობია ძაბვის მოდული და არგუმენტი, რაც ეკვივალენტური დენმიმღების დადგენაში იწვევს გარკვეულ უზუსტობას.

ცალკეულ შემთხვევაში ელექტრული დატვირთვა შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს:

- ა) უცვლელი სიდიდის და ფაზის დატვირთვის დენით. დატვირთვის დენის ფაზა განისაზღვრება საყრდენი ძაბვის მიმართ. ამგვარი მიდგომა დასაშვებია ადგილობრივ ქსელებში,

სადაც კვანძების ძაბვათა ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე უმნიშვნელოა. რაიონულ და განსაკუთრებით მაღალი და ზემადალი ძაბვის ქსელებში აღნიშნულმა დაშვებამ გაანგარიშებაში შეიძლება გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი ცდომილება. ამ ქსელებში დატვირთვის დენის ფიქსირებული მნიშვნელობის მიღება დასაშვებია იტერაციული პროცესის ცალკეულ ეტაპზე მომდევნო ეტაპზე დაზუსტებით;

ბ) დატვირთვის უცვლელი სიმძლავრით წარმოდგენა, რომელიც დამოკიდებული არ არის მოცემული კვანძის ძაბვის სიდიდეზე. ამგვარი დაშვება მისაღებია თუ მოცემული კვანძი აღჭურვილია ძაბვის რეგულირების მოწყობილობით და დენმიმღების სალტეებზე შესაძლებელია, უზრუნველყოფილი იქნას ძაბვის სათანადო უცვლელი მნიშვნელობა. გადატვირთულ ქსელებში, სადაც მოსალოდნელია კვანძებში ძაბვის მკვეთრი გადახრები, უცვლელი სიდიდით დატვირთვის სიმძლავრის წარმოდგენამ შეიძლება გამოიწვიოს უხეში ცდომილება, განსაკუთრებით რეაქტიული სიმძლავრის რეჟიმის მიხედვით;

გ) დატვირთვის სიმძლავრით (ფარდობითი მნიშვნელობები), რომელიც დამოკიდებულია მოცემული კვანძის ძაბვის რეჟიმზე და განისაზღვრება დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლებით [57; 59];

$$P^* = 1 + 0,6(\Delta U^*) + 0,47(\Delta U^*)^2;$$

$$Q_{(10)}^* = 1 + 2,3\Delta U^* + 6,22(\Delta U^*)^2;$$

$$Q_{(110)}^* = 1 + 1,6\Delta U^* + 4,3(\Delta U^*)^2,$$

სადაც  $\Delta U^*$  – ძაბვის ნომინალურიდან გადახრის ფარდობითი მნიშვნელობა.

განგარიშებებში დატვირთვათა ასეთი სახით გათვალისწინება იძლევა უფრო ზუსტ შედეგებს, მაგრამ ართულებს თვითონ ამ განგარიშებებს, რომელთა შესრულება შესაძლებელია მხოლოდ იტერაციული მეთოდით;

დ) მუდმივი გამტარობის ( $G, B$ ) ან მუდმივი წინაღობის ( $R, X$ ) სახით, რომლებიც ჩართულია დატვირთვის მიერთების, კვანძში. ასეთი მიდგომა ითვალისწინებს ძაბვისაგან დატვირთვის კვადრატულ პროპორციულ დამოკიდებულებას:

$$P = U^2 G, \quad Q = U^2 B \quad \text{ან} \quad P = \frac{U^2}{R}, \quad Q = \frac{U^2}{X}$$

დატვირთვის ასეთი სახით წარმოდგენა ვერ უზრუნველყოფს განგარიშების მაღალ სიზუსტეს, რადგანაც დატვირთვის გამტარობა და წინაღობა თვითონ წარმოადგენს ძაბვის ფუნქციას.

## 2.2 განაწილების კოეფიციენტები და გავლენის წინააღობები

ქსელის მოცემული კვების ცენტრიდან მოცემული ხაზით კონკრეტული კვანძის დენური დატვირთვის დაფარვის წილი მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენს. ის დამოკიდებულია ქსელის შეერთების სქემაზე და მისი ელემენტების პარამეტრებზე. სწორედ ეს წილი წარმოადგენს მოცემული დატვირთვის განაწილების კოეფიციენტს მოცემული ხაზისთვის. ამ პრინციპზეა დაფუძნებული ელექტრულ წრედში დენგანაწილების ანგარიშის ზედდების მეთოდი, რომელიც წრფივი წრედებისათვის კირხჰოფის კანონების საფუძველზე მიღებულ განტოლებათა სისტემის წრფივობიდან გამომდინარეობს.

ძაბვის საყრდენი კვანძიდან ქსელის მოცემული  $f$  კვანძამდე ძაბვის ვარდნა

$$\underline{\Delta U}_f = \sum_0^f \sqrt{3} \underline{I}_i \underline{Z}_i, \quad (2.1)$$

სადაც;  $\underline{I}_i$ ,  $\underline{Z}_i$  – ქსელის  $i$  უბნის დატვირთვის დენი და წინაღობა:

$\sum_0^f$  – სიმბოლო, რომელიც აღნიშნავს ძაბვის ვარდნათა ალგებრულ ჯამს

საყრდენი კვანძიდან განსახილველ  $f$  კვანძამდე ნებისმიერი გზით.

განაწილების კოეფიციენტის განმარტებიდან გამომდინარე  $i$  უბანზე გამავალი დენი, რომელიც გამოწვეული  $k$  კვანძის დატვირთვის დენით განისაზღვრება ფორმულით

$$\underline{I}_{i,k} = \underline{I}_k \cdot \underline{\alpha}_{i,k} = \underline{I}_k (\alpha'_{i,k} + j\alpha''_{i,k}), \quad (2.2)$$

სადაც  $\alpha'_{i,k} = \alpha'_{ik} + j\alpha''_{ik}$  – განაწილების კოეფიციენტი.

ქსელის ყველა კვანძის დატვირთვებით გამოწვეული  $i$  უბნის დატვირთვის დენი

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^n \underline{I}_{i,k} = \sum_{k=1}^n \underline{I}_k (\alpha'_{i,k} + j\alpha''_{i,k}), \quad (2.3)$$

სადაც  $n$  – ქსელის კვანძების რაოდენობა მაბალინსერებელის გარდა.

სიმძლავრეთა ენაზე (2.2) და (2.3) მიიღებს სახეს

$$\underline{S}_{ik} = (P_k \alpha'_{i,k} + Q_k \alpha''_{i,k}) + j(P_k \alpha''_{i,k} - Q_k \alpha'_{i,k}) \quad (2.4)$$

$$\underline{S}_i = \sum_{k=1}^n [(P_k \alpha'_{i,k} + Q_k \alpha''_{i,k}) + j(P_k \alpha''_{i,k} - Q_k \alpha'_{i,k})] \quad (2.5)$$

(2.1) და (2.3) გამოსახულებათა გათვალისწინებით ძაბვის ვარდნა ძაბვის საყრდენი კვანძიდან  $f$  კვანძამდე

$$\underline{\Delta U}_f = \sum_0^f \left[ \sqrt{3} \sum_{k=1}^n \underline{I}_{i,k} \right] \cdot \underline{Z}_i = \sum_0^f \sum_{k=1}^n \sqrt{3} \underline{I}_{i,k} \cdot \underline{Z}_i = \sum_0^f \sum_{k=1}^n \underline{\Delta U}_{i,k}, \quad (2.6)$$

სადაც

$$\underline{\Delta U}_{i,k} = \sqrt{3} \underline{I}_{i,k} \underline{Z}_i \quad (2.7)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდნას  $i$  უბანზე, რომელიც გამოწვეულია  $K$  კვანძის დატვირთვით.

(2.2)-ის გათვალისწინებით (2.7) მიიღებს სახეს

$$\underline{\Delta U}_{i,k} = \sqrt{3} \underline{I}_k (\alpha'_{i,k} + j\alpha''_{i,k})(R_i + jX_i) = \sqrt{3} \underline{I}_k [(\alpha'_{i,k} R_i - \alpha''_{i,k} X_i) + j(\alpha'_{i,k} X_i + \alpha''_{i,k} R_i)]$$

შევასრულებთ რა აჯამვას  $0-f$  გზაზე მივიღებთ ძაბვის მნიშვნელობას  $f$  კვანძში, გამოწვეულს  $k$  დატვირთვით

$$\underline{\Delta U}_{f,k} = \sqrt{3} \underline{I}_k \left[ \sum_0^f (\alpha'_{i,k} R_i - \alpha''_{i,k} X_i) + j \sum_0^f (\alpha'_{i,k} X_i + \alpha''_{i,k} R_i) \right] \quad (2.8) \text{ და}$$

შესაბამისად (2.6) გამოსახულების თანახმად ძაბვის საყრდენი კვანძიდან  $f$  კვანძამდე ძაბვის ვარდნისათვის გვექნება

$$\underline{\Delta U}_f = \sum_{k=1}^n \sqrt{3} \underline{I}_k \left[ \sum_0^f (\alpha'_{i,k} R_i - \alpha''_{i,k} X_i) + j \sum_0^f (\alpha'_{i,k} X_i + \alpha''_{i,k} R_i) \right]. \quad (2.9)$$

ფრჩხილებში წარმოდგენილი გამოსახულებები წარმოადგენენ გავლენის წინააღობებს

$$\left. \begin{aligned} R_{f,k} &= \sum_0^f (\alpha'_{i,k} R_i - \alpha''_{i,k} X_i) \\ X_{f,k} &= \sum_0^f (\alpha'_{i,k} X_i + \alpha''_{i,k} R_i), \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

რომლებიც აღრიცხავენ  $k$  კვანძის დატვირთვის დენის გავლენას  $f$  კვანძის ძაბვის სიდიდეზე. ამასთან როცა  $k=f$  მაშინ გვაქვს  $f$  კვანძის საკუთარი წინააღობა, ხოლო  $k \neq f$  შემთხვევაში კი გვაქვს  $f$  და  $k$  კვანძების ურთიერთ წინააღობა. უნდა აღინიშნოს, რომ

$$R_{f,k} \leq R_{f,f} \quad \text{და} \quad X_{f,k} \leq X_{f,f} \quad \text{ხოლო} \quad Z_{f,k} = Z_{k,f}. \quad (2.11)$$

ამრიგად, ელექტრული ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინააღობათა მატრიცა კვადრატულ სიმეტრიული მატრიცაა, რომლის

დიაგონალური წევრები წარმოადგენენ კვანძების საკუთარ წინაღობას, ხოლო არადიაგონალური წევრები კი ურთიერთწინაღობას (სქემა 1).

სქემა 1 ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინაღობის მატრიცა

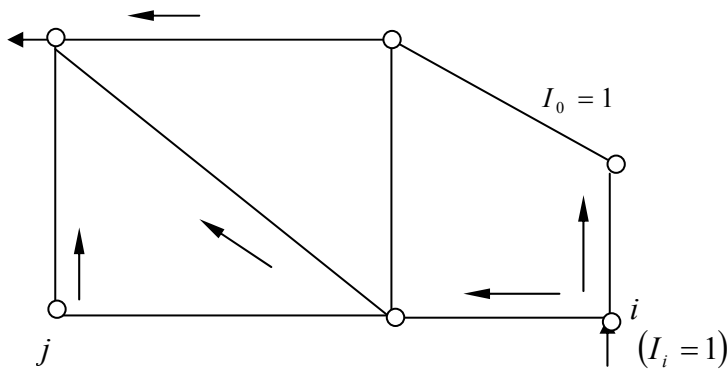
№ 1	1	2	.....	$f$	.....	n
1	$\underline{Z}_{1,1}$			$\underline{Z}_{1,f}$		$\underline{Z}_{1,n}$
2		$\underline{Z}_{2,2}$				
⋮						
$f$	$\underline{Z}_{f,1}$			$\underline{Z}_{f,f}$		$\underline{Z}_{f,n}$
⋮						
$n$	$\underline{Z}_{n,1}$			$\underline{Z}_{n,f}$		$\underline{Z}_{n,n}$

მაშასადამე ძაბვის ვარდნა კვების ცენტრიდან  $f$  კვანძამდე (2.9) გამოსახულების თანახმად ჩაიწერება შემდეგ სახეში.

$$\underline{\Delta U}_f = \sum_{k=1}^n \sqrt{3} \underline{I}_k (R_{f,k} + jX_{f,k}) \quad (2.12)$$

## 2.3 კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობათა განსაზღვრის მეთოდისა

ქსელის ნებისმიერი  $i$  კვანძის საკუთარი წინაღობა რიცხვობრივად  $i$  კვანძსა და მბალანსირებელ კვანძის პოტენციალთა შორის სხვაობის ტოლია, როცა ერთეულოვანი დენი ( $I_i = 1$ ) მიედინება  $i$  კვანძიდან მბალანსირებელი კვანძისაკენ და ქსელის დანარჩენ კვანძებში დატვირთვის დენები ნულის ტოლია (ნახ. 2.1)



ნახ. 2.1

$i$

და  $j$  კვანძების ურთიერთწინაღობა, დენების იმავე რეჟიმის პირობებში, წარმოადგენს  $j$  და მბალანსირებელ კვანძების პოტენციალთა სხვაობას.

ამრიგად

$$\left. \begin{array}{l} \underline{Z}_{i,i} = \underline{U}_i - U_0 \\ \underline{Z}_{i,j} = \underline{U}_j - U_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{როცა } I_i = 1 \text{ ა და } I_j = 0, \\ j = \overline{1, n} \quad j \neq i \end{array} \quad (2.13)$$

კვანძების საკუთარ და ურთიერთ წინაღობის დასადგენად მორიგეობით ქსელის თითოეულ კვანძში მივაწოდებთ ერთეულოვან დენს, რომელიც წრედს შეკრავს მახალანსირებელი კვანძის გავლით და დავადგენთ ამ დენის ქსელში განაწილების სურათს. ქსელის დანარჩენ კვანძებში ამ დროს დენები  $I_j = 0$ .

ნებისმიერად შერჩეული  $U_0$  ძაბვისას ქსელში  $I_i$  დენის განაწილების სურათის საშუალებით დავადგენთ ქსელის ყველა კვანძის პოტენციალს  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_i, \dots, \underline{U}_j, \dots, \underline{U}_n$  და (2.13) გამოსახულებათა გამოყენებით გამოვთვალოთ  $\underline{Z}_{ii}$  და  $\underline{Z}_{i,j}$  წინაღობებს.

ანგარიშების გამარტივების მიზნით იღებენ  $U_0 = 0$  და ამ შემთხვევაში კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინაღობა რიცხობრივად შესაბამისი კვანძის პოტენციალის ტოლია

$$\left. \begin{array}{l} \underline{Z}_{ii} = \underline{U}_i \\ \underline{Z}_{ij} = \underline{U}_j \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{როცა } I_i = 1 \text{ ა და } I_j = 0, \\ U_0 = 0 \quad j = \overline{1, n} \quad j \neq i \end{array} \quad (2.14)$$

#### 2.4. სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში

ელექტრულ ქსელში აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები წარმოადგენს ქსელის ცალკეული ელემენტის გრძივ და განივ პარამეტრებში დანაკარგების ჯამს

$$\Delta P = \sum_i \Delta P_i = \sum_i \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_6^2} R_i + U_6^2 G_i \right), \text{ მგვტ}$$

სადაც  $P_i, Q_i$  – ქსელის  $i$  ელემენტის გრძივ წინაღობაში გამავალი სიმძლავრე



მგვტ, მგვარ;  $R_i, G_i$  – ამავე ელემენტის აქტიური წინაღობა და აქტიური გამტარობა, ომი, სიმენსი;

$U_6$  – ამავე ელემენტის მაღალი ნომინალური ძაბვა, კვ.

ელემენტის განივ გამტარობაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები (დანაკარგები ხაზში გვირგვინის მოვლენაზე და დანაკარგები ტრანსფორმატორების ფოლადში) პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული დატვირთვის დენზე (სიმძლავრეზე) და ანგარიშების დროს შეგვიძლია მუდმივად ჩავთვალოთ.

გრძივ წინაღობაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პირდაპირ კვადრატულ პროპორციულია ამ წინაღობაში გამავალი დენისა (სიმძლავრისა), რომლებიც (2.3) და (2.5) გამოსახულებათა თანახმად ცალსახად განისაზღვრება ქსელის კვანძების დატვირთვის დენების (სიმძლავრეების) საშუალებით.

ქსელის რეჟიმის ოპტიმიზაციის ამოცანათა განხილვისას საჭირო ხდება ქსელის ცალკეული კვანძისათვის დავადგინოთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი (§ 2.5), ანუ როგორც იტყვიან დავადგინოთ ნებისმიერი  $k$  კვანძის დატვირთვის ცვლილების გავლენა ქსელში დანაკარგების სიდიდეზე. ამ მიზნით საჭიროა დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება განსაზღვრული იქნეს არა შტოებში გამავალი დენების (სიმძლავრეების), არამედ კვანძების დატვირთვების საშუალებით.

სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება ჩავწეროთ ქსელში სიმძლავრის სრული ბალანსის სახით\*

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=0}^m \underline{S}_{\text{გენ},f} - \sum_{f=m+1}^n \underline{S}_{\text{ლატ},f}, \quad (2.15)$$

სადაც  $S_{\text{გენ. } f}$  – ყველა ენერგოწყაროს მიერ ქსელში გაცემული სიმძლავრე;

$S_{\text{ლატგ. } f}$  – ყველა მომხმარებლის დატვირთვა სიმარტივისათვის (2.15) შემდეგნაირად ჩავწერთ

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=0}^n \underline{S}_f, \quad (2.16)$$

სადაც  $\underline{S}_f$  – გენერაციის და მოხმარების კვანძის სიმძლავრეა, რომელიც აიღება “პლუს” ნიშნით, როცა  $f$  წარმოადგენს გენერაციის კვანძს და “მინუს” ნიშნით, როდესაც  $f$  მოხმარების კვანძია.

ვიციტ რომ  $\underline{S}_f = \sqrt{3}U_f I_f^*$ , მივიღებთ

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=0}^n \sqrt{3}U_f I_f^* \quad (2.17)$$

თავის მხრივ ძაბვა

$$\underline{U}_f = U_0 + \underline{\Delta U}_f \quad (2.18)$$

და გვაქვს

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

მიღებული გამოსახულების პირველ წევრში თანამამრავლის სახით შედის ქსელის ყველა კვანძის (მაბალანსირებული კვანძის ჩათვლით) დენების ალგებრული ჯამი, რაც კირხჰოფის პირველი კანონის თანახმად ნულის ტოლია.

---

\*) მაბალანსირებულ კვანძს მინიჭებული აქვს ინდექსი “0”

ამრიგად

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

რადგანაც  $\underline{\Delta U}_{f=0} = 0$  ვღებულობთ

$$\underline{\Delta S} = \sqrt{3} \sum_{f=1}^n \underline{\Delta U}_f \underline{I}_f^* \quad (2.19)$$

ანუ (2.12) გათვალისწინებით ქსელში სიმძლავრის დანაკარგებისათვის გვაქვს

$$\underline{\Delta S} = 3 \cdot \sum_{f=1}^n \sum_{K=1}^n \underline{I}_K (R_{f,K} + jX_{f,K}) \cdot \underline{I}_f^* \quad (2.20)$$

ელექტრული ქსელების რეჟიმების გაანგარიშების დროს უფრო მოხერხებულია კვანძების დენური დატვირთვები გამოვსახოთ შესაბამისი სიმძლავრეებით

$$\underline{I}_K = \frac{S_K^*}{\sqrt{3}U_K^*} \quad \text{და} \quad \underline{I}_f = \frac{S_f^*}{\sqrt{3}U_f^*},$$

მაშინ (2.20) მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{K=1}^n \frac{S_k^* \cdot S_f}{U_K^* \cdot U_f} \underline{Z}_{f,K}$$

ანუ

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k - jQ_k}{U_k} \cdot \frac{P_f + jQ_f}{U_f} \cdot \underline{Z}_{f,k} \cdot e^{j\varphi_{kf}}, \quad (2.21)$$

სადაც  $\varphi_{U_{kf}} = \varphi_{U_k} - \varphi_{U_f} - k$  და  $f$  კვანძების ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე.

ცხადია, რომ

$$\varphi_{U_{kf}} = -\varphi_{U_{fk}} \quad (2.22)$$

ალგებრული გარდაქმნების შემდეგ (2.21) მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{K=1}^n \frac{(P_K P_f + Q_K Q_f) + j(P_K Q_f - P_f Q_K)}{U_K U_f} \cdot (\cos \varphi_{u_{kf}} + j \sin \varphi_{u_{kf}}) \cdot \underline{Z}_{f,k}$$

ანუ

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\underline{Z}_{f,k}}{U_k U_f} \left\{ [(P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (P_k Q_f - P_f Q_k) \sin \varphi_{u_{kf}}] + \right. \\ \left. + j[(P_k P_f + Q_k Q_f) \sin \varphi_{u_{kf}} + (P_k Q_f - P_f Q_k) \cos \varphi_{u_{kf}}] \right\}.$$

ამ გამოსახულების მეორე დიდი ფრჩხილი ორმაგი აჯამვის გამო ნულის ტოლია, რადგანაც მისი ყოველი წევრი  $A_{kf}$  და  $A_{fk}$  წევრები ერთმანეთს აკომპენსირებენ:

$$A_{kf} + A_{fk} = (P_k P_f + Q_k Q_f) \sin \varphi_{u_{kf}} + (P_k P_f - P_f Q_k) \cos \varphi_{u_{kf}} + \\ + (P_f P_k + Q_f Q_k) \cdot \sin \varphi_{u_{fk}} + (P_f Q_k - P_k Q_f) \cos \varphi_{u_{fk}}$$

(2.22)-ის თანახმად

$$\sin \varphi_{u_{fk}} = -\sin \varphi_{u_{kf}} \quad \text{და} \quad \cos \varphi_{u_{fk}} = \cos \varphi_{u_{kf}},$$

ამიტომ ვღებულობთ

$$A_{k,f} + A_{f,k} = 0$$

და, შესაბამისად, ქსელში დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\underline{Z}_{f,k}}{U_k U_f} \left[ (P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (P_k Q_f - P_f Q_k) \sin \varphi_{u_{kf}} \right]$$

ანუ, ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულებას ექნება შემდეგი სახე

$$\Delta P = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{R_{f,k}}{U_k U_f} \left[ (P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (P_k Q_f - P_f Q_k) \sin \varphi_{u_{kf}} \right], \quad (2.23)$$

ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება კი იქნება ასეთი სახის

$$\Delta Q = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{X_{f,k}}{U_k U_f} \left[ (P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (P_k Q_f - P_f Q_k) \sin \varphi_{u_{kf}} \right]. \quad (2.24)$$

თუ კვანძების რეაქტიული დატვირთვებს გამოვსახავთ მათი კოეფიციენტებით

$$Q_k = P_k \operatorname{tg} \varphi_k \quad \text{და} \quad Q_f = P_f \operatorname{tg} \varphi_f,$$

მივიღებთ:

$$\Delta P = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k P_f}{U_k U_f} \left[ (1 + \operatorname{tg} \varphi_k \operatorname{tg} \varphi_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (\operatorname{tg} \varphi_f - \operatorname{tg} \varphi_k) \sin \varphi_{u_{kf}} \right]$$

და

$$\Delta Q = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k P_f X_{f,k}}{U_k U_f} \left[ (1 + \operatorname{tg} \varphi_k \operatorname{tg} \varphi_f) \cos \varphi_{u_{kf}} - (\operatorname{tg} \varphi_f - \operatorname{tg} \varphi_k) \sin \varphi_{u_{kf}} \right]$$

ამ გამოსახულებათა დიდი ფრჩხილების მეორე წევრები პირველ წევრებთან შედარებით შეიძლება უგულვებელყოთ შემდეგ გარემოებათა გამო:

1. ძვრის კუთხე ძაბვის ვექტორებს შორის შედარებით მცირეა და ამიტომ ყოველთვის

$$\cos \varphi_{u_{kf}} > \sin \varphi_{u_{kf}};$$

2. კვანძებში რეაქტიული დატვირთვების კოეფიციენტები თითქმის თანაზომადი სიდიდეებია და ამიტომ

$$\left| \frac{1 + \operatorname{tg} \varphi_k \operatorname{tg} \varphi_f}{\operatorname{tg} \varphi_f - \operatorname{tg} \varphi_k} \right| = \left| \frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi_f - \varphi_k)} \right| \gg 1;$$

3. სხვაობა  $\operatorname{tg} \varphi_f - \operatorname{tg} \varphi_k$  სხვადასხვა კვანძებთან მიმართებაში შეიძლება აღმოჩნდეს, როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი, რის გამოც ზემოთ აღნიშნული მეორე წევრების ცალკეული შემდგენები გარკვეულ წილად ერთმანეთს აკომპენსირებენ კიდეც.

ამრიგად ქსელში დანაკარგებისათვის მივიღეთ

$$\Delta P = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{R_{f,k}}{U_k U_f} (P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.25)$$

და

$$\Delta Q = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{X_{f,k}}{U_k U_f} (P_k P_f + Q_k Q_f) \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.26)$$

ანუ გვაქვს:

$$\Delta P_p = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k P_f R_{fk}}{U_k U_f} \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.27)$$

– აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვებით;

$$\Delta P_Q = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{Q_k Q_f R_{f,k}}{U_k U_f} \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.28)$$

– აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით;

$$\Delta Q_p = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k P_f X_{f,k}}{U_k U_f} \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.29)$$

– რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვებით;

$$\Delta Q_Q = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{Q_k Q_f X_{fk}}{U_k U_f} \cos \varphi_{u_{kf}} \quad (2.30)$$

– რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები, გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით.

როგორც პრაქტიკული დაკვირვებების ანალიზი გვიჩვენებს ანგარიშებში დასაშვებია მივიღოთ, რომ  $\cos \varphi_{u_{kf}} \approx 1$  და  $U_k \approx U_f \approx U_6$

მაშინ (2.27)-(2.30) გამოსახულება ჩაიწერება ამგვარად;

$$\Delta P_p = \frac{1}{U_6^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f R_{f,k} \quad (2.31)$$

$$\Delta P_Q = \frac{1}{U_6^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f R_{f,k} \quad (2.32)$$

$$\Delta Q_P = \frac{1}{U_6^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f X_{f,k} \quad (2.33)$$

$$\Delta Q_Q = \frac{1}{U_6^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f X_{f,k} \quad (2.34)$$

(2.31-2.34) გამოსახულებები საშუალებას გვაძლევს საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტით განვსაზღვროთ ქსელში დანაკარგები. უფრო მაღალი სიზუსტისთვის საჭიროა ვისარგებლოთ (2.23-2.24) გამოსახულებებით.

## 2.5. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი

ელექტრულ ქსელში დანაკარგების ოპტიმიზაციის ღონისძიებათა შერჩევის ერთერთ მნიშვნელოვან კრიტერიუმს წარმოადგენს დანაკარგების მინიმიზაცია. (2.31) და (2.32) გამოსახულებების თანახმად ქსელში დანაკარგები დამოკიდებულია ქსელის კვანძების დატვირთვაზე და ამ კვანძების საკუთარ და ურთიერთ წინაღობაზე.

ამკარაა, რომ ნებისმიერი სამომხმარებლო კვანძის რეაქტიული დატვირთვის შემცირება (კომპენსაცია) გამოიწვევს ქსელის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებას. ამასთან დანაკარგების შემცირების სისწრაფე ქსელის კვანძების საკუთარ და ურთიერთ წინაღობაზეა დამოკიდებული.

ქსელის  $f$  კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის მიზანშეწონილობა შეფასებული უნდა იქნას იმ სიდიდით, რომელიც მოცემულ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის შეცვლისას გვიჩვენებს ქსელში დანაკარგების შემცირების სისწრაფეს. ეს სიდიდე

წარმოადგენს მოცემული კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობით ნაზარდს რეაქტიული დატვირთვის მიხედვით

$$\sigma_{f(Q)} = \frac{\partial \Delta P_Q}{\partial Q_f} \quad (2.35)$$

(2.32)-ის თანახმად გვაქვს

$$\sigma_{f(Q)} = \frac{2}{U_6^2} \sum_{k=1}^n R_{f,k} Q_k, \quad (2.36)$$

და შესაბამისად (2.32) შეიძლება ამგვარადაც ჩავწეროთ

$$\Delta P_Q = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^n \sigma_{f(Q)} Q_f \quad (2.37)$$

ამ გამოსახულების ანალოგიურად შეიძლება ვწეროთ

$$\Delta P_P = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^n \sigma_{f(P)} \cdot P_f, \quad (2.38)$$

სადაც  $\sigma_{f(P)}$  წარმოადგენს  $f$  კვანძის მიმართ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობით ნაზარდს აქტიური დატვირთვის მიხედვით

$$\sigma_{f(P)} = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_f}. \quad (2.39)$$

(2.37) და (2.38) გამოსახულებათა საფუძველზე ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება შეიძლება ამგვარად ჩავწეროთ

$$\Delta P = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^n (\sigma_{f(P)} \cdot P_f + \sigma_{f(Q)} Q_f) \quad (2.40)$$

დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდის ფიზიკური არსის დასადგენად (2.35)

წარმოვადგინოთ მცირე ნაზარდების საშუალებით\*



$$\sigma_f = \frac{\Delta(\Delta P_\rho)}{\Delta Q_f}, \quad (2.41)$$

აქ:  $\Delta(P_\rho)$  – ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ნაზრდი.

$\Delta Q_f - f$  კვანძში რეაქტიული დატვირთვის ნაზრდი.

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ თუ  $\Delta Q_f = 1$  მაშინ  $\sigma_f = \Delta(\Delta P_\rho)$ .

ე.ი. მოცემული კვანძისათვის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი რიცხობრივად ქსელში დანაკარგების ნაზრდის ტოლია, როცა მოცემულ კვანძში რეაქტიული დატვირთვა იზრდება ერთი ერთეულით.

(2.38) გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ: თუ  $\sigma > 0$ , მაშინ  $f$  კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ( $\Delta Q_f > 0$ ) გამოიწვევს ქსელში დანაკარგების გაზრდას ანუ  $\Delta(\Delta P_\rho) > 0$ , თუ  $\sigma_f < 0$  მაშინ იგივე კომპენსაცია გამოიწვევს დანაკარგების შემცირებას ანუ  $\Delta(\Delta P_\rho) < 0$ .

მაშასადამე რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის მიზანშეწონილობა უნდა ვეძებოთ იმ კვანძების მიხედვით, სადაც აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი უარყოფითია

$$\sigma_f < 0 \quad (2.42)$$

(2.36)-ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ქსელის ერთ რომელიმე კვანძში რომ-ლისთვისაც ადგილი აქვს (2.42) უტოლობას, რეაქტიული დატვირთვის კომპენ-საცია გამოიწვევს დანაკარგების ფარდობით ნაზრდის ზრდას (აბსოლუტური სიდი-დის შემცირებას) როგორც თვით ამ კვანძის მიმართ, ასევე სხვა კვანძების მიმართაც. თუ არ გავითვალისწინებთ იმ დანახარჯებს, რაც თან ახლავს მაკომ

პენსირებელი დანადგარის დაყენებას, მაშინ რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით ეფექტურია მანამ, სანამ ქსელის ყველა კვანძისთვის დანაკარგების ფარდობითი

ნაზრდი არ გახდება ნულის ტოლი\*.

პრაქტიკულად, მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება მოითხოვს მნიშვნელოვან კაპიტალურ და საექსპლოატაციო ხარჯებს და ამა თუ იმ კვანძისთვის დანადგარების ფარდობითი ნაზრდის ნულამდე გაზრდა ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია. აქედან გამომდინარე, ცხადია, რომ მოცემული კონკრეტული ქსელის შემთხვევაში იარსებებს დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ცალსახად განსაზღვრული რაღაც ზღვრული სიდიდე, რომლის შემდეგ დატვირთვის შემდგომი კომპენსაცია არაეკონომიკურია (ნახ.2.2) ამ სიდიდეს ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური სიდიდე ვუწოდოთ

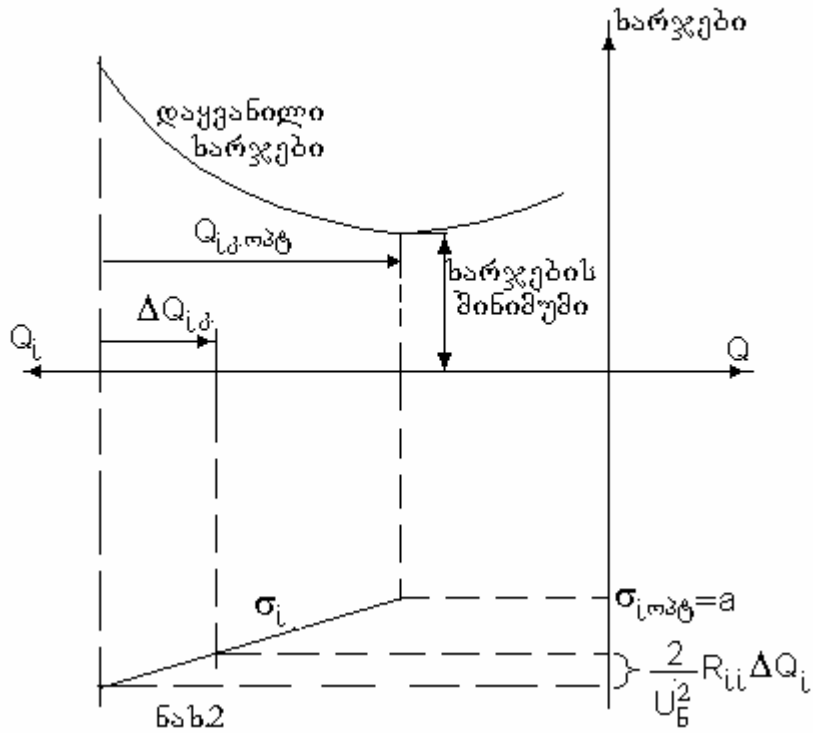
$$\sigma_{\text{ოპტ}} = a \quad (2.43)$$

$a$ -ს საანგარიშო გამოსახულება დადგენილია 4.5 პარაგრაფში.

- ეს ნიშნავს, რომ მთელი ქსელისთვის განხორციელებულია რეაქტიული სიმძლავრის სრული კომპენსაცია და ქსელის შტოებში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადები ნულის ტოლია.

---

\*აქ და მომდევნო გამოსახულებებში  $\sigma$ -ს ინდექსი “ $Q$ ” გამოტოვებულია



ნახ. 2.2

განვიხილოთ ქსელის რომელიმე  $i$  და  $j$  კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციისას ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებისა და ამ კვანძების მიმართ დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ცვლილების ხასიათი. ანალიზის გამარტივების მიზნით დავუშვათ, რომ

$$R_{ii} > R_{jj} \tag{2.44}$$

(2.32) გამოსახულების თანახმად დანაკარგების სიდიდე ნებისმიერი კვანძის დატვირთვაზე პირდაპირ კვადრატულ დამოკიდებულებაშია

$$\Delta P(Q_i) = \frac{1}{U_6^2} \left[ R_{i,i} Q_i^2 + 2Q_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_{ik} Q_k \right] \tag{2.45}$$

და

$$\Delta P(Q_j) = \frac{1}{U_6^2} \left[ R_{j,j} Q_j^2 + 2Q_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n R_{jk} Q_k \right]. \quad (2.46)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ როცა  $R_{i,i} > R_{j,j}$ , მაშინ უმრავლეს შემთხვევაში ადგილი აქვს აგრეთვე შემდეგ უტოლობას

$$R_{i,k} > R_{j,k}. \quad (2.47)$$

აქედან გამომდინარე,  $i$  და  $j$  კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის ერთი და იგივე სიდიდით კომპენსაციისას, ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები უფრო მეტად მცირდება იმ კვანძის შემთხვევაში, რომლის საკუთარი წინააღმდეგ უფრო მეტია (ნახ.2.3)

(2.45) და (2.46) გამოსახულებათა თანახმად განსახილველი კვანძების მიმართ დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი (2.35) დან გამომდინარე, გამოითვლება ფორმულით

$$\sigma_i = \frac{2}{U_6^2} \left[ R_{i,i} Q_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_{i,k} Q_k \right] \quad (2.48)$$

და

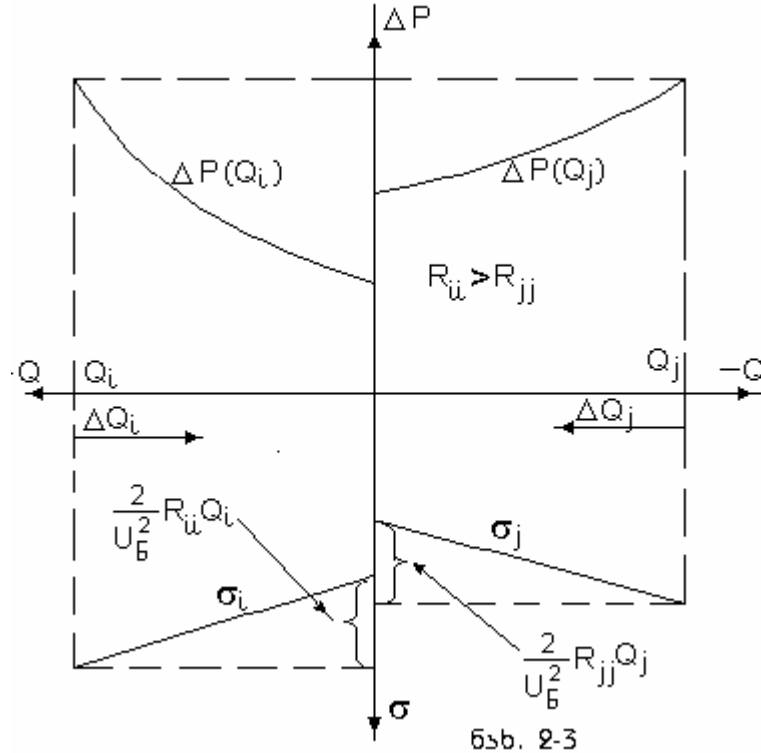
$$\sigma_j = \frac{2}{U_6^2} \left[ R_{j,j} Q_j + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n R_{j,k} Q_k \right] \quad (2.49)$$

ადვილათ შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ (2.44) და (2.47) უტოლობათა პირობებში ადგილი აქვს აგრეთვე უტოლობას.

$$|\sigma_i| > |\sigma_j| \quad (2.50)$$

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე  $i$  და  $j$  კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისას ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებისა და ამ კვანძების მიმართ დანაკარგების ფარდობითი

ნაზრდის ცვლილების ხასიათი შეიძლება ვაჩვენოთ 2.3 ნახაზზე წარმოდგენილი გრაფიკის სახით.



(2.48) და (2.49) გამოსახულებათა საფუძველზე ქსელის კვანძის მიმართ დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი შეიძლება წარმოვადგინოთ ორი შესაკრების სახით, რომელთაგანაც ერთი განპირობებულია თვით ამ კვანძის დატვირთვებითა და საკუთარი წინააღობით

$$\sigma'_i = \frac{2}{U_6^2} R_{i,i} Q_i, \quad (2.51)$$

ხოლო მეორე კი განპირობებულია ქსელის დანარჩენი კვანძების დატვირთვებითა და ამ კვანძებისა და განსახილველი კვანძის ურთიერთწინააღობებით

$$\sigma_i'' = \frac{2}{U_6^2} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_{i,k} Q_k \quad (2.52)$$

რადგანაც ქსელის უმრავლესი და განსაკუთრებით ელექტრულად უშორესი კვანძისთვის, ადგილი აქვს უტოლობას

$$R_{i,k} < R_{i,i} \quad (2.53)$$

ამიტომ, მოცემულ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის შეცვლა უფრო მეტად შეცვლის დანაკარგების ფარდობით ნაზრდს თვით ამ კვანძის მიმართ, ვიდრე სხვა რომელიმე კვანძის მიმართ.

მაშასადამე ქმედების ეფექტურობის თვალსაზრისით ეკონომიკურად უფრო მიზანშეწონილია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია უპირველესად განახორციელდეს ელექტრულად უშორეს კვანძში, რომელიც დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის უფრო დიდი აბსოლიტური მნიშვნელობით ხასიათდება.

### თ ა ვ ი 3

## რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის თანამედროვე მდგომარეობა

### 3.1 პრობლემის არსი სისტემური მიდგომის თვალსაზრისით

სამამულო ენერგეტიკის ფუნქციონირების თანამედროვე ეტაპზე აუცილებელია ენერგოდამზოგი ტექნოლოგიებისა და ელექტრული სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგების შემცირების სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებაზე გადასვლა. ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების ყველაზე უფრო ეფექტურ ხერხს წარმოადგენს, ერთის მხრივ, ელექტროსადგურებს შორის აქტიურ და რეაქტიულ დატვირთვათა ოპტიმალური განაწილება და, მეორე მხრივ, მომხმარებლის რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია, რაც იმავდროულად მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს ელექტრული ქსელის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევა ნიშნავს მისი ტიპის, ნომინალური სიმძლავრისა და ქსელში დაყენების ადგილის განსაზღვრას. ამ ამოცანის ამოხსნისას წარმოიშობა დამატებითი სიმნელეები, რაც დაკავშირებულია განუსაზღვრელობის სხვადასხვა სახესთან. კერძოდ: ქსელის განვითარებისა და მისი მუშაობის პროგნოზირება; ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი: სხვადასხვა სახის არადეტერმინირებული საწყისი ინფორმაცია და სხვ [29].

ელექტროენერგეტიკის სამეცნიერო-ტექნიკური კომპლექსის განუყოფელ ნაწილს წარმოადგენს რეაქტიული დატვირთვის რაციონალური კომპენსაცია, რადგანაც ელექტროსისტემაში რეაქტიული

სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან გამომდინარე საჭიროა რეაქტიული დატვირთვის თითქმის ერთი მესამედი გენერირდებოდეს მომხმარებელთა სიახლოვეს დაყენებული მაკომპენსირებელი დანადგარებით [29].

რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემა 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. მაგ. 0,4კვ ძაბვის ხაზის ბოლოში მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება, აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით, მნიშვნელოვნად უფრო მეტ ეფექტს იძლევა მაღალი (35-110კვ) ქსელში, ვიდრე თვით 10/0,4 კვ ძაბვის ქსელში [29]. სწორედ ამიტომაც რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემის გადაწყვეტისას ქსელის მარტივ ნაწილებად დაყოფის პრინციპის გამოყენების დროს ამოხსნის შედეგები ყოველთვის ამა თუ იმ სიდიდის ცდომილებით ხასიათდება.

რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემას მრავალრიცხოვანი გამოკვლევები მიეძღვნა როგორც ყოფილ საბჭოთა კავშირში, ასევე მის ფარგლებს გარეთ. ეს განპირობებულია იმით, რომ ამ პრობლემის რაციონალური გადაწყვეტის პირობებში შედარებით იოლად მიიღწევა დიდი ტექნიკურ-ეკონომიკური ეფექტი.



შეიძლება ითქვას, რომ აღნიშნულ სფეროში მრავალწლიანი გამოკვლევები მიმართული იყო დასმული ამოცანის განზომილების შემცირებისა და ცალკეული ქვესისტემების საინფორმაციო დაშორიშორების გადალახვაზე, რაც განპირობებულია ამ ქვესისტემების უწყებრივი დაქვემდებარებით და ქსელის მუშაობის რეჟიმების მიხედვით საწყისი საანგარიშო ინფორმაციის შეგროვების სხვადასხვაგვარი შესაძლებლობით.

აღნიშნული მიმართულებით კვლევის ყველა ამჟამად არსებული რეზულტატები პირობითად შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად [29]. პირველს, საკმარისად ფართო ჯგუფს, მიეკუთვნება ცალკეული ქვესისტემების ეკვივალენტირების მეთოდები, ხოლო მეორე ჯგუფს მიაკუთვნებენ პარციალური გაანგარიშების მეთოდს [49], რომელიც პრინციპულად განსხვავებული მიდგომაა.

[17]–ში რეკომენდირებულია გაერთიანებული ენერგოსისტემის სისტემა-

წარმომქმნელი ქსელის ეკვივალენტირება ორი ხერხით: ა) ვითვალისწინებთ რა, ზემალაღი ძაბვის ხაზებით რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემის შესაძლებლობას, ამ ხაზების ძირითად ქსელთან მიერთების კვანძში მოცემულად ვთვლით  $P(t)+jQ(t)$  გრაფიკს, რომელიც განსაზღვრული იქნება დამოუკიდებელი ანგარიშებით; ბ) 110-330კვ ძაბვის სისტემათაშორისო კავშირები, ენერგოგაერთიანებიდან რაიონული ელექტრული ქსელის გამოყოფის მიზნით, შემოთავაზებულია გავხსნათ და ამ კავშირებზე  $P(t)+jQ(t)$  გადადინების გრაფიკი განისაზღვროს შემდეგნაირად - ყოველი რაიონული ქსელი, ენერგოსისტემასთან დაკავშირებული კვანძის მიხედვით, შეიცვალოს

კვანძების ეკვივალენტური რიცხვით. ამ შემთხვევაში მოსაზღვრე კვანძის მიმართ რაიონული ელექტრული ქსელის მოდელი წარმოდგენილი იქნება კვადრატული პოლინომის სახით\*

$$3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i,j} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^n b_i Q_i, \quad (3.1)$$

სადაც  $a_{ij}, b_i$  – აპროქსიმაციის კოეფიციენტები, რომლებიც ექსპერიმენტების დაგეგმვის ცნობილი მეთოდის დახმარებით მიღებული მონაცემების საფუძველზე შეიძლება განისაზღვროს უმცირესი კვადრატების მეთოდით. 110კვ – მდე (ჩათვლით) ძაბვის მანაწილებელი ღია ქსელის მოდელი შეიძლება მივიღოთ ანალოგიურად. რადგანაც ყოველი ასეთი ქსელი რაიონულ ელექტრულ ქსელთან დაკავშირებულია  $n=1$  კვანძით, (3.1) სახის დამოკიდებულება მიიღება უშუალოდ მოცემული ქსელის კვანძების მიხედვით ჯამური შემავალი რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის ამოცანის ამოხსნისას და ზემოთ აღნიშნულ დამოკიდებულებას ექნება სახე

$$3 = \alpha Q^2 + B Q_1, \quad (3.2)$$

სადაც,  $Q$  – სიმძლავრე, რომელიც ძირითადი ქვესისტემიდან გადაედინება მანაწილებელ ქსელში.

თუ ხარჯებს გამოვსახავთ მაკომპენსირებელი დანადგარებით სიმძლავრის მიხედვით, მაშინ კოეფიციენტები განისაზღვრება ასე

$$a_k = a, \quad b_k = -(b + 2\alpha Q_o),$$

სადაც  $Q_o$  – საწყისი მნიშვნელობა სიმძლავრის, რომელიც გადაეცემა მოცემული სასაზღვრო კვანძის გავლით.

---

• ამ თავში აღნიშვნები და ინდექსები შენარჩუნებულია იმავე სახით, როგორც თვით სამეცნიერო-ტექნიკურ ლიტერატურაში.

აღნიშნული ეკვივალენტების გათვალისწინებით 110-500კვ ძაბვის ენერგოსისტემაში შემავალი ყოველი მანაწილებელი ქსელის რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმიზაციის შემდეგ განისაზღვრება ჯამური შემავალი რეაქტიული სიმძლავრე  $Q = Q_0$ . ამის შემდეგ ისმება დამოუკიდებელი ამოცანა მოცემული მანაწილებელი ქსელის ცალკეულ კვანძებს შორის  $Q_0$  სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების შესახებ.

ოპტიმალურობის კრიტერიუმად ასეთ შემთხვევაში შეიძლება იყოს დაყვანილი ხარჯების მინიმუმი  $\min J$  ან აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმუმი  $\min \Delta P$ .

რამდენადმე განსხვავებული მიმართულებით შესრულდა კვლევები მოსკოვის ენერგეტიკის ინსტიტუტის ელექტრული სისტემების კათედრაზე. აქ (3.2) სახის დამოკიდებულების მოდელი შეცვლილია ენერგოსისტემის საანგარიშო სქემაში ჩართული გარკვეული სიდიდის ეკვივალენტური წინაღობით  $Z_{\text{აკვ}} = P_{\text{აკვ}} + jX_{\text{აკვ}}$  რომლის საშუალებით ენერგო სისტემის მუშაობის დამყარებული რეჟიმის საფუძველზე შეიძლება გამოითვალოს მის ბოლოში ჩართული  $Q_0$ -ს სიდიდე.

ქალაქებისა და სასოფლო სამეურნეო დანიშნულების 6, 10 კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელები ხასიათდებიან შედარებით ნაკლებად სრული და ნაკლებად ზუსტი ინფორმაციით. ეს ინფორმაცია კიდევაც რომ იქნეს მოპოვებული საკმარისი სიზუსტითა და მოცულობით, მისი ცენტრალიზებული დამუშავება მაინც პრობლემატურია.

ამიტომ [16; 17; 37]-ში რეკომენდირებულია აღნიშნული ქსელი შეიცვალოს ეკვივალენტური აქტიური წინაღობით, რომელიც გამოითვლება სიმძლავრის ცნობილი დანაკარგების მიხედვით

$$R_3 = \frac{\Delta P\% \cdot U^2}{P(1 + tg^2 \varphi)} \cdot 10^{-2}, \quad (3.3)$$

სადაც  $P$ –განსახილველი მანაწილებელი ქსელის აქტიური დატვირთვა.  $\Delta P\%$  ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები %-ებში;  $tg \varphi$ –რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტი.

თუ ქსელში დანაკარგები ცნობილი არ არის, მაშინ შეიძლება ვისარგებლოთ მისი ტიპური მნიშვნელობებით: სამრეწველო ქსელებისათვის -3,8%, სასოფლო სამეურნეო ქსელებისათვის -7,6%.

[49]-ის ავტორთა აზრით 6-35კვ ძაბვის ქსელებში შესაძლებელია უფრო მარტივი ეკვივალენტობა. კერძოდ,  $Z_3$  შეიძლება მიღებული იქნეს. სქემის ხის შტოების წინააღმდეგობით-პარალელური შერთების გზით.

ეკვივალენტობის პარციალური მეთოდი [49] ვრცელდება 6-10კვ ძაბვის შედარებით მოკლე რადიალურ და მაგისტრალურ ხაზებზე, რაც უფრო დამახასიათებელია სამრეწველო ქსელებისათვის.

პარციალური მეთოდი გულისხმობს რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის ლოკალიზაციას. კერძოდ, განიხილება მაღალი 6,10კვ ВБК და დაბალი 0,38 კვ НБК მაკომპენსირებელი დანადგარები. ამასთან დაბალი ძაბვის მაკომპენსირებელი დანადგარების ხვედრითი ღირებულება მეტია, ვიდრე მაღალი ძაბვისა.

ცხადია, ამოცანის ასეთი ლოკალიზაცია შესაძლებელია, მაშინ თუ მთელი ქსელის კომპლექსური ანგარიშისას НБК-ს ჯამური სიმძლავრე აღმოჩნდება ნაკლები, ვიდრე ВБК-ს სიმძლავრე, რომელიც გამოთვლილია 0,38 კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელის გათვალისწინების გარეშე. უფრო ძვირი НБК გამართლებული უნდა იქნეს მანაწილებელ ქსელში დანაკარგების დამატებითი შემცირებით.

როგორც გამოკვლევები გვიჩვენებს პრაქტიკაში მანაწილებელი ქსელებისათვის ყოველთვის სრულდება შემდეგი სახის უტოლობა [52]

$$1 + \frac{\sigma_{\varrho_1}}{\sigma_{\varrho_2}} \leq \frac{3_{HBK}}{3_{BBK}} \quad (3.4)$$

სადაც,  $\sigma_{\varrho_1}$  – დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდი მკვებავ ქსელში – მაბალანსირებელი

კვანძიდან მთავარი დამწვევი ქვესადგურის 6-10კვ ძაბვის სალტებამდე.

$\sigma_{\varrho_2}$  – იგივე მანაწილებელ ქსელში – დამწვევი ქვესადგურის 6-10კვ ძაბვის

სალტებიდან 0,38 კვ ძაბვის სალტებამდე.

$3_{HBK}$ ,  $3_{BBK}$  შესაბამისად HBK -ს და BBK-ს დაყვანილი ხარჯები.

### 3.2 რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის არსებული მიდგომები

ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის საკითხებს ეძღვნება მთელი რიგი მეცნიერული ნაშრომები [11, 12, 22, 25, 30, 42, 51 და სხვა].

არსებულ სამეცნიერო-ტექნიკურ ლიტერატურაში განიხილება რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის დასმის სხვადასხვა ვარიანტი. ყველაზე უფრო გავრცელებულ ვარიანტში მიზნის ფუნქცია ფორმულირდება დაყვანილი ხარჯების სახით და განიხილება ამ ფუნქციის მინიმიზაციის საკითხი. ამოცანის დასმის სხვა ვარიანტში მოცმულად მიიღება მაკომპენსირებელი დანადგარების ჯამური

სიმძლავრე და ამ შემთხვევაში ამოცანა განიხილავს ქსელის ცალკეულ კვანძებს შორის ამ სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების საკითხს.

ამოცანის დასმის ნებისმიერ ვარიანტში, მისი ამოხსნის პროცესი სრულდება ოპტიმიზაციის ამა თუ იმ მეთოდის გამოყენებით.

[3]-ში ამოცანის ამოხსნა განიხილება იმ დაშვებით, რომ ტექნიკური თუ სხვა ინჟინრული მოსაზრებების საფუძველზე მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების ადგილები მოცემულია. კვანძების აქტიური და რეაქტიული დატვირთვები მოცემულია საფეხუროვანი გრაფიკების სახით. მიზნის ფუნქციას წარმოადგენს დაყვანილი ხარჯები, რომელიც ითვალისწინებს ხარჯებს რეაქტიული სიმძლავრის არსებული და ახალი წყაროების აგებასა და ექსპლუატაციაზე და, აგრეთვე, ხარჯებს ქსელში ენერჯის დანაკარგებზე. ამოცანის ამოხსნა განიხილება კოორდინატული დაშვების სვლის მეთოდით. მატრიცულ ფორმაში მიზნის ფუნქცია ჩაწერილია შემდეგ სახეში

$$z = \rho^t \cdot \left\| \begin{matrix} Q_{u.p.m} \\ Q_k \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} Q_{u.p.m} \\ Q_k \end{matrix} \right\|^t + c \left\| \begin{matrix} Q_{u.p.m} \\ Q_k \end{matrix} \right\|, \quad (3.5)$$

სადაც:

- $Q_{u.p.m}$  – რეაქტიული სიმძლავრის არსებული რეგულირებადი წყაროების სიმძლავრე;
- $Q_k$  – საძიებელი დამატებითი მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრე;
- $\rho$  – ვექტორი–სვეტი, რომლის ელემენტები ახასიათებს მაკომპენსირებელი დანადგარის ერთეულოვანი სიმძლავრის დაყვანილ ხარჯებს;

- C-პროპორციულობის კოეფიციენტების კვადრატულ სიმეტრიული მატრიცა, რომელთა განსაზღვრისათვის საჭიროა ვიცოდეთ: ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები; 1 კვტსთ დაკარგული ენერჯიის ღირებულება, დანაკარგების დრო; ქსელის ნომინალური ძაბვა.

კვადრატული პროგრამირების მათემატიკურ ამოცანაზე დაყრდნობით [26]-ში შემოთავაზებულია მატრიცულ-გამოთვლითი მეთოდი, რომლის იდეა მდგომარეობს მასში, რომ მაკომპენსირებელი დანადგარებიანი ელექტრული სისტემის რეჟიმის ამსახველი განტოლებების რთული სისტემის ამოხსნის პროცედურა შეცვლილია მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრის ოპტიმალური მნიშვნელობების გამოთვლით მზა მატრიცული ფორმულების გამოყენებით.

მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური ჯამური სიმძლავრის განსაზღვრისათვის აიგება დამოკიდებულება

$$z_{\min} = f(Q_k), \quad (3.6)$$

სადაც,  $z_{\min}$  – მოცემული ჯამური  $Q_k$  სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შესაძლო მინიმალური დაყვანილი ხარჯები.

აღნიშნულ მეთოდში საწყისს ინფორმაციად აღებულია არსებული წყაროების რეაქტიული სიმძლავრისა და კვანძების რეაქტიული დატვირთვების საშუალო წლიური მნიშვნელობები.

მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური განლაგების ამოცანის ამოხსნა გრადიენტის მეთოდით აღწერილია [11]-ში. აქ ეკონომიკური გადაწყვეტა მოიძებნება ვარიანტების გაანგარიშებისა და

შემდგომი ტექნიკურ-ეკონომიკური შედარების გზით. ამ შემთხვევაში მიზნის ფუნქცია ფორმულირდება შემდეგ სახეში:

$$Z = \sum_{i=1}^m I_i(P_i) + (p + E_6) \sum_{j=1}^n K_j(Q_{kj}) \rightarrow \min, \quad (3.7)$$

სადაც,  $I_i - i$ -ურ კვანძში ელექტროენერჯის წარმოებაზე დანახარჯები, რომელიც

ამავე კვანძში გენერირებული აქტიური  $P_i$  სიმძლავრის ფუნქციაა;

$m$  – გენერაციის კვანძების რაოდენობა;

$K_j - j$ -ურ კვანძში მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე;

$n$  – კვანძების რიცხვი, სადაც განიხილება მაკომპენსირებელი დანადგარის

დაყენება;

$p$  – მაკომპენსირებელი დანადგარების ამორტიზაციისა და მიმდინარე

რემონტზე ყოველწლიური დანარიცხების ფარდობითი მნიშვნელობა;

$E_6$  – კაპიტალური ხარჯების ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტი.

მიზნის ფუნქციის გრადიენტი გამოითვლება ფორმულით.

$$\Delta Z = \Delta u + E_6 \cdot \partial Q_k / \partial Y, \quad (3.8)$$

სადაც,  $E_6$  – მაკომპენსირებელი დანადგარის კაპიტალური ხარჯების ნაზრდის

ვექტორი (მატრიცის ელემენტები), რომელიც შეესაბამება

$$Q_k = \parallel Q_{k1}, Q_{k2} \dots Q_{kn} \parallel$$



ვექტორს;

$Y$  – დამოუკიდებელი ცვლადების ვექტორი.

გრადიენტი

$$\Delta I = \sum_{i=1}^m \frac{\partial I_i}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial Y} - E_p \frac{\partial P}{\partial Y}, \quad (3.9)$$

სადაც,  $E_p = \left\| \frac{\partial I_1}{\partial P_1}, \frac{\partial I_2}{\partial P_2}, \dots, \frac{\partial I_m}{\partial P_m} \right\|$  – ელექტრული სადგურების სიმძლავრის

ფარდობითი ნაზარდის ვექტორი, რომელიც შეესაბამება  $P = \|P_1, P_2, \dots, P_m\|$  ვექტორს.

ზემოთ აღნიშნული მეთოდების ღირსება მდგომარეობს მასში, რომ შესაძლებელია ამოცანის ამოხსნისათვის მათემატიკური მოდელის სრული ფორმულირება [51]. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ მრავალკვანძიანი რთული ქსელის მქონე ენერგოსისტემის შემთხვევაში საჭიროა გამომთვლელი ციფრული მანქანის მახსოვრობის დიდი მოცულობა. გარდა ამისა, ამოხსნის აღნიშნული ალგორითმის გამოყენებისას ყოველთვის წარმოიშობა სიმძლავრეები, რაც დაკავშირებულია განსახილველი ამოცანის თავისებურებების სრულყოფილ გათვალისწინებასთან.

გარდა აღნიშნული მეთოდისა, მთელ რიგ სამეცნიერ-ტექნიკურ ლიტერატურაში განიხილება სპეციალური მეთოდები, რომლებიც დაფუძნებულია განსახილველი ამოცანის ტექნოლოგიურ თავისებურებებზე.

ერთ-ერთ პირველს და შედარებით წარმატებულ სპეციალურ მეთოდს წარმოადგენს ხარჯების პოტენციალთა მეთოდი [34,60,61]. აქ ამოცანის ამოხსნისას გამოიყენება ენერგოსისტემის პირობითი სქემა, რომელიც შეიცავს ქსელის ელემენტების მხოლოდ აქტიურ წინააღობებს

და კვანძების საანგარიშო რეაქტიულ დატვირთვებს. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრე და ქსელში მათი მიზანშეწონილი განლაგების ადგილები. იმავდროულად შესაძლებელია დავადგინოთ რეაქტიული სიმძლავრის არსებული წყაროების ოპტიმალური დატვირთვა.

ამ მეთოდის შემთხვევაში მიზნის ფუნქციას წარმოადგენს დაყანილი ხარჯები, რომელიც შეიცავს: ხარჯებს რეაქტიული სიმძლავრის გენერირებაზე ელექტროსადგურებში  $z_r$ , ხარჯებს ენერჯის გადაცემაზე ქსელში  $z_c$  და ხარჯებს მაკომპენსირებელ დანადგარებზე  $z_k$

$$z = z_r + z_c + z_k. \quad (3.10)$$

ანგარიშების პროცესში შემოყვანილია ხარჯების პოტენციალების ცნებები:

– ქსელის მოცემულ კვანძში რეაქტიულ სიმძლავრის გადაცემის ხარჯების პოტენციალი

$$\Psi_i^c = -\frac{\partial z_c}{\partial Q_i} = -\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} \tau \beta; \quad (3.11)$$

– არსებული წყაროების მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერირებასთან დაკავშირებული გაწეული ხარჯების პოტენციალი

$$\Psi_i^r = \frac{\partial z_r}{\partial Q_i} = \Delta P_{i \text{ } iMakc} T_{i \text{ } iMakc} \beta; \quad (3.12)$$

– მაკომპენსირებელი დანადგარების მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციაზე გაწეული ხარჯების პოტენციალი

$$\Psi_i^k = \frac{\partial z_k}{\partial Q_i} = K_{yi} (E_H + p_i) + \Delta P_{\text{დი}} T_{\text{დი} \text{ } iMakc} \beta \quad (3.13)$$

(3.11) – (3.13) გამოსახულებებში:

$\Delta P$  – ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მაქსიმალური დატვირთვების

რეჟიმში;

$\tau$  – დანაკარგების დრო;

$\beta - 1$  კვტსთ დაკარგული ენერჯის ღირებულება;

$Q_i$  –  $i$ -ური კვანძის არსებული წყაროს რეაქტიული სიმძლავრე;

$\Delta P_i$  – რეაქტიული სიმძლავრის არსებულ წყაროში აქტიური სიმძლავრის

ხვედრითი დანაკარგები;

$\Delta P_{\Delta i}$  – რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროებში აქტიური სიმძლავრის

ხვედრითი დანაკარგები;

$T_{imак}$ ,  $T_{\Delta imак}$  – რეაქტიული სიმძლავრის არსებულ და დამატებით წყაროებში

სიმძლავრის დანაკარგების დრო;

$K_{yi}$  –  $i$ -ურ კვანძში დაყენებული მაკომპენსირებელი დანადგარის ხვედრითი

კაპიტალური ხარჯები;

$E_6$  – კაპიტალური ხარჯების ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტი;

$p_i$  –  $i$ -ური კვანძის მაკომპენსირებელი დანადგარის ამორტიზაციისა და მიმდინარე

რემონტის ყოველწლიური დანარიცხების ფარდობითი სიდიდე.

აღნიშნული მეთოდის ღირსება მდგომარეობს მასში, რომ შედარებით გამარტივებულია ამოცანის ამოხსნის პროცედურა. მეთოდის ნაკლს მიეკუთვნება ის, რომ მოდელში ჩადებულია ქსელის

ელემენტების მხოლოდ აქტიური წინაღობების და კვანძების მხოლოდ რეაქტიული საანგარიშო დატვირთვები. აღნიშნულის გამო არ ხერხდება ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინება, რასაც შეუძლია გავლენა მოახდინოს მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური სიმძლავრის სიდიდეზე.

[51]-ში ავტორების მიერ წარმოდგენილია კიდევ ერთი სპეციალური მეთოდი – კრიტერიალური მეთოდი. ამ მეთოდით ანგარიშები სრულდება მკვებავი ქსელის მთლიანი სქემის გათვალისწინებით, რომელიც ითვალისწინებს ელემენტების აქტიურ და რეაქტიულ წინაღობებს და დატვირთვის აქტიურ და რეაქტიულ შემდგენებს.

აღნიშნული მეთოდი და მისი შესაბამისი ალგორითმი ითვალისწინებს დანახარჯებს მაკომპენსირებელ დანადგარებზე და ქსელში დანაკარგებზე და აგრეთვე ძაბვის არასაკმარისი ხარისხით გამოწვეულ ზარალთან დაკავშირებულ ხარჯებს. მეთოდის იდეა მდგომარეობს ეკონომიკური ანალიზის საფუძველზე სპეციალური პრაქტიკული კრიტერიუმის გამოყენებაში, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ არა მარტო მაკომპენსირებელი დანადგარის სიმძლავრე და დაყენების ადგილი, არამედ მათი დაყენების რაციონალური რიგითობა. აღნიშნული მეთოდი გამოიყენება მაკომპენსირებელი დანადგარების პროექტირებისას.

სამეცნიერო ლიტერატურაში განხილული მეთოდები მიმართულია იქეთ, რომ მკვებავ და მანაწილებელ ქსელებში მაკომპენსირებელი დანადგარების განლაგების ოპტიმიზაცია გარკვეულწილად განხილული იქნეს ურთიერთდამოუკიდებლად, მაგრამ ურთიერთკავშირში.

შემოთავაზებულ მეთოდებით განიხილება: 1. მოცემული მანაწილებელი ქსელში მოცემული ჯამური სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების ეკონომიკური განაწილება. 2. მანაწილებელ ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარების ჯამური სიმძლავრისა და მათი განლაგების ეკონომიკური მიზანშეწონილობის განსაზღვრა.

პირველ შემთხვევაში მაკომპენსირებელი დანადგარის ჯამური სიმძლავრე დადგინდება რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან ან შეიძლება დადგინდეს მთელი სისტემისათვის ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე.

მეორე შემთხვევაში ამოცანა მდგომარეობს მანაწილებელ ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრისა და განლაგების განსაზღვრაში მკვებავი ქსელის ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე გავლენის გათვალისწინებით [12,29]. ამ მიზნით ამოცანაში მკვებავი ქსელი გათვალისწინებულია გარკვეული სიდიდის ეკვივალენტური წინაღობით. ამ მეთოდის ნაკლი მდგომარეობს მრავალკონტურიანი შერეული მკვებავი ქსელისათვის ეკვივალენტური წინაღობის გამოთვლის სირთულეში.

რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის თავისებური მიდგომა განიხილება [22]-ში. აქ ავტორი მანაწილებელ ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარის ჯამური სიმძლავრის და მათი განლაგების განსაზღვრასთან ერთად განიხილავს სადენთა განივკვეთების შერჩევას. აქაც მკვებავი ქსელის ეკვივალენტური წინაღობა განისაზღვრება მიახლოებით.

მეორე მნიშვნელოვანი საკითხი, რომელიც განიხილება სამეცნიერო ლიტერატურაში, წარმოადგენს რეგულირებად

კონდენსატორთა ბატარიის რაციონალური შერჩევა. რიგ ნაშრომებში [10,11,14,26 და სხვ.] მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრის განსაზღვრის ამოცანის ამოხსნისას ძაბვის რეგულირების მოთხოვნები გათვალისწინებულია საკმარისად სრულად. ამასთან საწყისი ინფორმაციის სახით მოცემულია მაკომპენსირებელი დანადგარების ჯამური სიმძლავრე. ძაბვის რეგულირების რაციონალური რეჟიმების შერჩევის პრინციპები საკმარისად სრულად აღწერილია [4]-ში.

## თ ა ვ ი 4

### ელექტრული სისტემის იერარქიულობა და რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა

#### 4.1. ელექტრული სისტემის იერარქიულობა

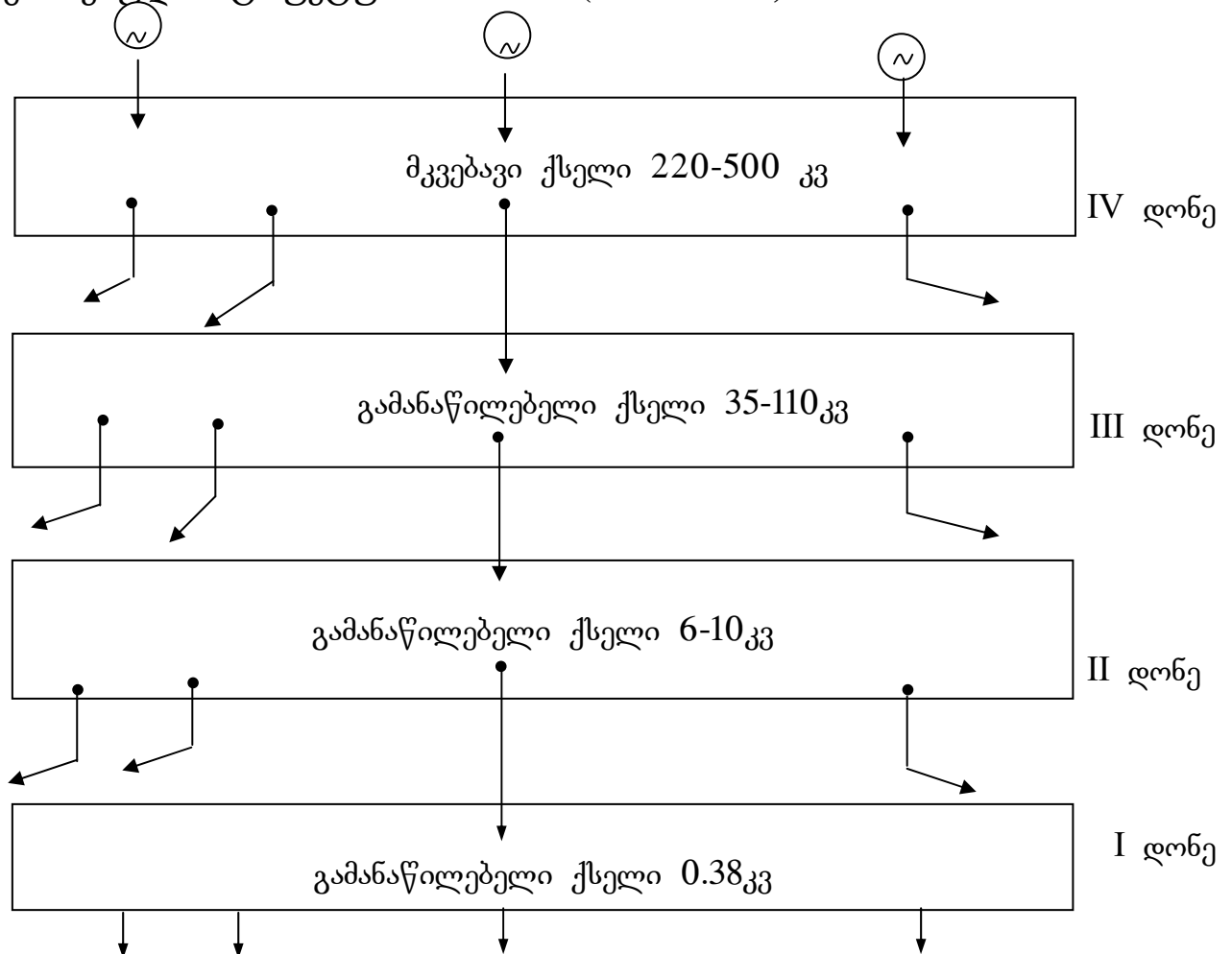
ელექტრული სისტემის მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები განისაზღვრება, როგორც მკვებავი, ასევე მანაწილებელი ელექტრული ქსელების მუშაობის ანალოგიური მაჩვენებლებით. ცალკეული ქსელის მუშაობის რეჟიმი, ზოგადად არ შეიძლება განხილული იქნება სისტემაში შემავალი სხვა ქსელების მუშაობის რეჟიმებისაგან განცალკევებით, რადგანაც ისინი ურთიერთკავშირშია და ნებისმიერი სახის ამოცანის ამოხსნისას უნდა ვისარგებლოთ სისტემური მიდგომის პრინციპით, რაც როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გულისხმობს ელექტრული სისტემის იერარქიული სტრუქტურული წყობისა და ამ სტრუქტურული ქვეგანაყოფების ცალკეულ კვანძებსა და დონეებს შორის ელექტრული კავშირების გათვალისწინებას.

ენერგოსისტემებისათვის საუკეთესოდ მიიჩნევა მუშაობის ის რეჟიმი, როცა საკმარისად დიდი პერიოდის განმავლობაში ენერჯის გადაცემით გამოწვეული ჯამური დანახარჯები იქნება მინიმალური, რომლის დროსაც ასევე მინიმალურია ენერჯის გადაცემის თვითღირებულებაც. მუშაობაში მყოფი ელექტროგადაცემის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელთა პირობებში ელექტრული ქსელის მუშაობის ეკონომიკურობა მიღწეული იქნება ქსელის ოპტიმალური დანაკარგების უზრუნველყოფით. გლობალური ხასიათის ამოცანის ამოხსნისას გამოყენებული უნდა იქნეს სისტემური მიდგომის პრინციპი, რაც

უზრუნველყოფს სისტემის მუშაობის სახასიათო პარამეტრების გათვალისწინებას მთლიანობაში.

წინამდებარე დისერტაციაში დასმულია რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანა, რომელიც განიხილება სისტემის ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის მიხედვით შედგენილი ქსელის ჩანაცვლების ერთიანი სქემის გათვალისწინებით და გამოკვლეულია ამ ამოცანის დეკომპოზიციის შესაძლებლობა, რაც საშუალებას გვაძლევს განვიხილოთ იქნას ის ცალკეული შედარებით მარტივი ლოკალური ამოცანების სახით.

ელექტრული სისტემა ქსელის ნომინალური ძაბვის მიხედვით შეიძლება წარმოვადგინოთ ოთხი სხვადასხვა დონის ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის სახით (ნახაზი. 4.1).





## ნახ. 4.1

- I დონე – 0.38 კვ. ძაბვის მანაწილებელი ქსელი.
- II დონე – 6-10 კვ. ძაბვის მანაწილებელი ქსელი.
- III დონე – 35-110 კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელი.
- IV დონე – 220-500 კვ ძაბვის მკვებავი ქსელი.

I, II, III დონის ყველა მანაწილებელი ქსელი წარმოდგენილია ავტონომიური ქსელის სახით და მათ შორის განივი ურთიერთკავშირი არ განიხილება. ამასთან  $N$  დონის ავტონომიურ ქსელს ელექტრული კავშირი აქვს მასზე უფრო მაღალი  $N+1$  დონის ქსელის მხოლოდ ერთ კვანძთან.

მკვებავი ქსელი წარმოადგენს 220-500 კვ ძაბვის რთული შეკრულ სისტემაწარმომქმნელ ქსელს. გენერაციის ძირითადი წყაროები განთავსებულია ამ ქსელის ცალკეულ კვანძებში და, შესაბამისად, მიეკუთვნებიან იერარქიის IV დონეს. ამ წყაროებიდან ნებისმიერი, მისი დადგმული სიმძლავრიდან გამომდინარე, შეიძლება განხილული იქნეს როგორც მახალანსირებელი. III ან კიდევ უფრო დაბალი დონის მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის განხილვისას რეკომენდირებულია და მიზანშეწონილია სრულდებოდეს რეაქტიული დატვირთვის რეგიონული ბალანსის პრინციპი. მიუხედავად ამისა III (ან კიდევ უფრო დაბალი) დონის მანაწილებელი ავტონომიურ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია გარკვეული ხარისხით გავლენას ახდენს მკვებავ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებაზე და აქედან გამომდინარე დანაკარგების ცვლილების შეფასების თვალსაზრისით გლობალური ამოცანის ამოხსნისას საჭიროა შეფასებული და გათვალისწინებული იქნეს აღნიშნული გავლენა.

რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური სიმძლავრის შერჩევის ამოცანის სირთულე განპირობებულია დიდი ენერგეტიკული სისტემის მახასიათებელი თვისებებით. კერძოდ მის სტრუქტურულ ქვეგანაყოფებს შორის კავშირებითა და ურთიერთ რეჟიმული გავლენით.

ოპტიმიზაციის გლობალური ამოცანის განხილვისას მხედველობაში მიიღება იერარქიის დონის კავშირი ერთ  $N+1$  დონესთან და ყველა  $N-1$  დონეებთან. ჰორიზონტალურ დონეებს შორის კავშირი გათვალისწინებულია მათი საერთო დონის ქსელის შიდა განივი კავშირების გზით.

ოპტიმიზაციის გლობალური ამოცანის ასეთი პრინციპით ამოხსნისას, როგორც მოცემულ, ასევე მის ზედა დონის ქსელებში გათვალისწინებული იქნება მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენებით მიღებული ეკონომიკური ეფექტი. ამასთან მხედველობაში მიღებული უნდა იქნეს ის გარემოებაც, რომ ქსელის კვანძური პარამეტრებით სარგებლობისას ანგარიშების შესრულების ხანრძლივობა იზრდება თითქმის კვანძების რაოდენობს კუბის პროპორციულად [2,7].

სხვადასხვა იერარქიული დონეებიდან მიღებული საწყისი ინფორმაციის არასრულყოფილება და არასაკმარისი სიზუსტე, ასევე მომხმარებელთა დატვირთვისა და გენერირებული სიმძლავრეების დროთა განმავლობაში ზრდა განაპირობებს ანგარიშით მიღებულ და რეალურ ეკონომიკურ ეფექტებს შორის მნიშვნელოვან განსხვავებას. თუმცა, სხვა ერთდაიგივე პირობებში ამა თუ იმ ამოცანის ამოხსნისას სისტემური მიდგომის თვალსაზრისით ნებისმიერი სრულყოფა ყოველთვის იძლევა გარკვეულ ეკონომიკურ ეფექტს [55].

#### 4.2 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანის დასმა

აღნიშნოთ, რომ მაკომპენსირებელ დანადგართა დეფიციტის გამო ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის შედეგები შეუძლებელია ერთდროულად რეალიზებული იქნას მოცემული ენერგოსისტემის ყველა მანაწილებელ ქსელში [4,9] და გარდა ამისა, გამომთვლელი მანქანების შესაძლებლობათა შეზღუდულობის გამო ანგარიშების ჩატარება მკვებავი და ყველა მანაწილებელი ქსელის მიხედვით ამოცანის გლობალური დასმის პირობებში პრაქტიკულად შეუძლებელია [იგივე].

აღნიშნულთან დაკავშირებით გლობალურად დასმულ ამოცანაში გათვალისწინებული იქნება მკვებავი ქსელი, მის ქვემოთ ვერტიკალურ სტრუქტურაში მდებარე III, II და I დონეების ავტონომიური (ლოკალური) ქსელები და ამოხსნის მეტი სიზუსტის მისაღებად დამატებით იქნება გათვალისწინებული მკვებავი ქსელის სხვა კვანძებში მიერთებული ავტონომიურ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის  $\beta$  ხარისხი (პარ. 5.2).

ელექტრული ქსელის განვითარების პროექტირებისას საჭიროა განხილული იქნას არსებული და ახლად დასაყენებელი მაკომპენსირებელ დანადგართა ყველაზე უფრო სახასიათო რეჟიმები მათი რეგულირების აუცილებელ დიაპაზონთა გამოვლენის მიზნით [51].

ნებისმიერი მეთოდი, რომლის დანიშნულებაცაა მაკომპენსირებელი დანადგარების განლაგება და ოპტიმალური სიმძლავრის შერჩევა, სხვა

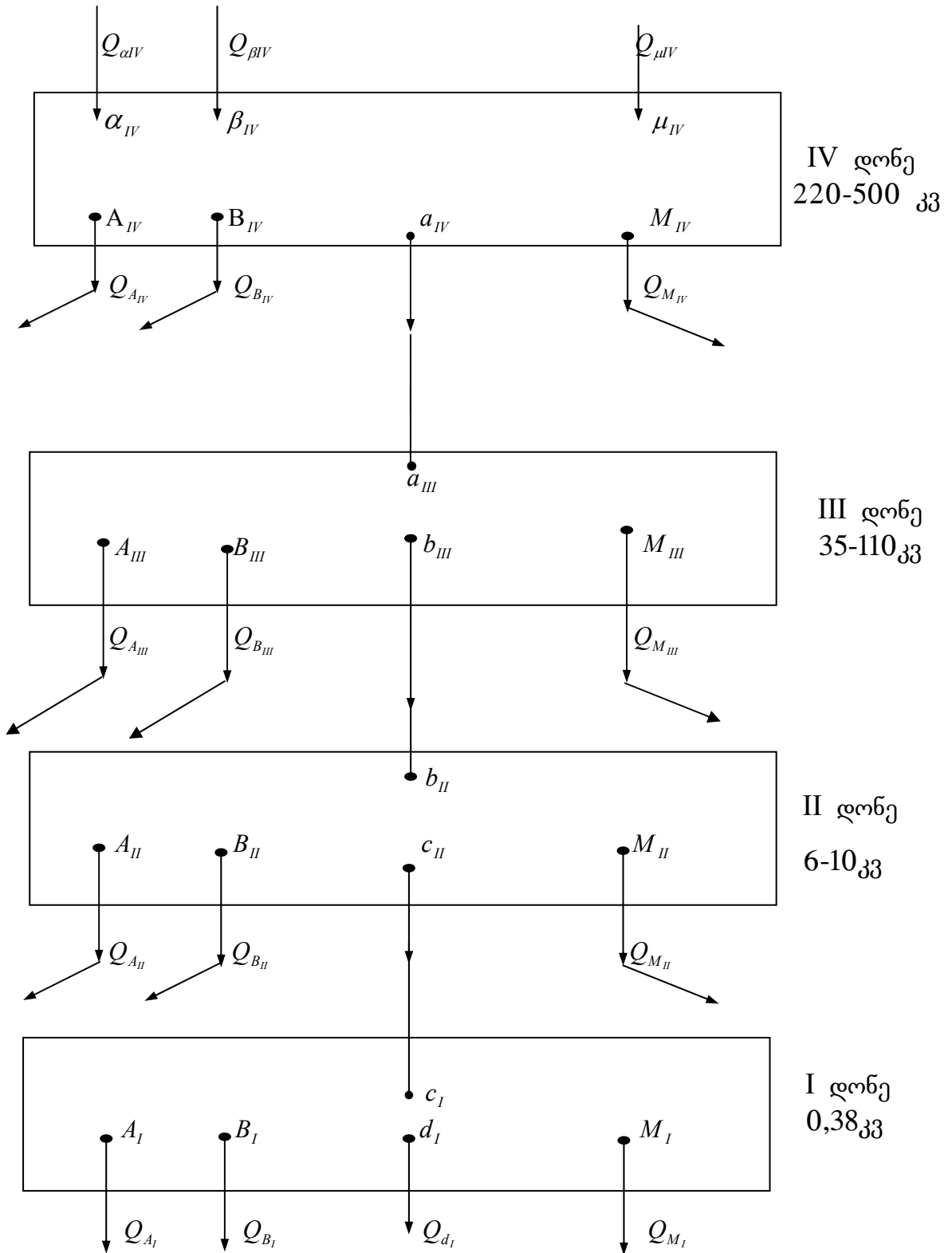
თანაბარ პირობებში დამატებით უნდა უზრუნველყოფდეს შემდეგ მოთხოვნებს:

- საჭირო საწყისი ინფორმაციის მოცულობის შემცირება;
- გლობალური ამოცანის ამოხსნის სიზუსტე;
- ოპტიმიზაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემის მოქნილობა და ადაპტიურობა, რაც იერარქიულ დონეებზე რეჟიმული ცვლილებების ოპერატიული გათვალისწინების შესაძლებლობის საშუალებას მოგვცემს.

რადგანაც ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი  $\sigma_p$  და  $\sigma_\rho$  დამოკიდებულია შესაბამისი კვანძების აქტიურ და რეაქტიულ დატვირთვებსა და გენერაციაზე (პარ. 2.4), ამიტომ მაკომპენსირებელ დანადგართა განლაგებისა და ოპტიმალურ სიმძლავრის შერჩევის მათემატიკური მოდელის შესადგენად საკმარისია იერარქიული დონეების კვანძებში საწყის ინფორმაციად აღებული იქნეს დატვირთვასა და გენერაციის მხოლოდ რეაქტიული მდგენელები ელექტრული ქსელის იერარქიული სტრუქტურის სქემაზე (ნახ.

4.2) გვაქვს შემდეგი აღნიშვნები

- $\alpha_{IV}, \beta_{IV}, \dots, \mu_{IV}$ -IV დონის კვების წყაროების კვანძები შესაბამისი გენერაციებით,  $(Q_{\alpha_{IV}}, Q_{\beta_{IV}}, \dots, Q_{\mu_{IV}})$  რომელთაგანაც ერთერთი განიხილება, როგორც მახალანსირებელი კვანძი:
- $A_{IV}, B_{IV}, \dots, M_{IV}$ -IV დონის სამომხმარებლო კვანძები, სადაც ნაჩვენებია მომხმარებელთა რეაქტიული დატვირთვები  $Q_{A_{IV}}, Q_{B_{IV}}, \dots, Q_{M_{IV}}$ ;



ნახ. 4.2 ელექტრული ქსელის იერარქიული სტრუქტურა

- $A_{III}, B_{III}, \dots, M_{III}$  -III დონის სამომხმარებლო კვანძები შესაბამისი რეაქტიული დატვირთვებით  $Q_{A_{III}}, Q_{B_{III}}, \dots, Q_{M_{III}}$ ;
- $A_{II}, B_{II}, \dots, M_{II}$  -II დონის სამომხმარებლო კვანძები შესაბამისი რეაქტიული დატვირთვებით  $Q_{A_{II}}, Q_{B_{II}}, \dots, Q_{M_{II}}$ ;
- $A_I, B_I, \dots, M_I$  -I დონის სამომხმარებლო კვანძები შესაბამისი რეაქტიული დატვირთვებით  $Q_{A_I}, Q_{B_I}, \dots, Q_{M_I}$

კავშირი იერარქიულ დონეებს შორის ხორციელდება შესაბამისად  $a_{IV} - a_{III}$ ,  $b_{III} - b_{II}$  და  $c_{II} - c_I$  კავშირებით.

ქსელის იერარქიული სტრუქტურის გათვალისწინებით რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა შეიძლება დასმული იქნეს სხვადასხვა სახით, იმისდა მიხედვით, თუ ქსელის რომელი დონის კვანძებში გვსურს მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება და მოცემულია თუ საძიებელია კვების წყაროების რეაქტიული გენერაცია (ცხრ. 4.1).

ცხრ.4.1 ოპტიმიზაციის ამოცანათა კლასიფიკაცია სტრუქტურული დონეების მიხედვით

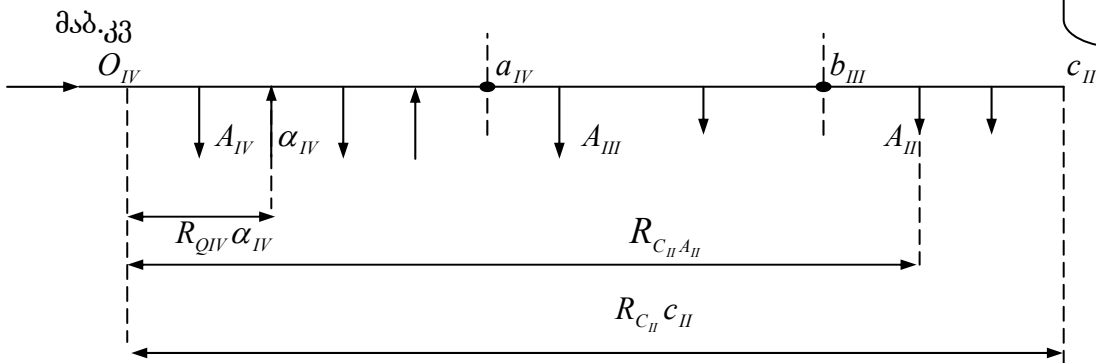
იერარქიის დონე	კვანძები, სადაც გათვალისწინებულია მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება	კვების წყაროების რეაქტიული გენერაცია	ამოცანის ინდექსი
I	$A_I, B_I, \dots, M_I$	საძიებელია	IA
		მოცემულია	IB
II	$A_{II}, B_{II}, \dots, M_{II}$	საძიებელია	IIA
		მოცემულია	IIIB
III	$A_{III}, B_{III}, \dots, M_{III}$	საძიებელია	IIIA
		მოცემულია	IIIB
IV	$A_{IV}, B_{IV}, \dots, M_{IV}$	საძიებელია	IVA

		მოცემულია	IVB
--	--	-----------	-----

იერარქიული სტრუქტურის საფუძველზე დასმული ნებისმიერი სახის ამოცანა სქემატურად შეიძლება წარმოვადგინოთ რადიალური-მაგისტრალური ქსელის სახით, სადაც დატვირთვისა და გენარაციის კვანძები განლაგებული იქნებიან კვანძური წინააღობების მიხედვით (ნახ. 4.3).

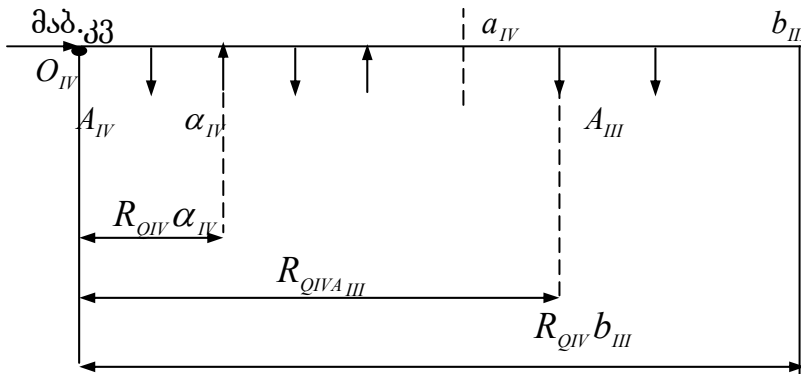
ა) IA, IB სახის ამოცანა

ქსელის იერარქიული სტრუქტურის I ოონი



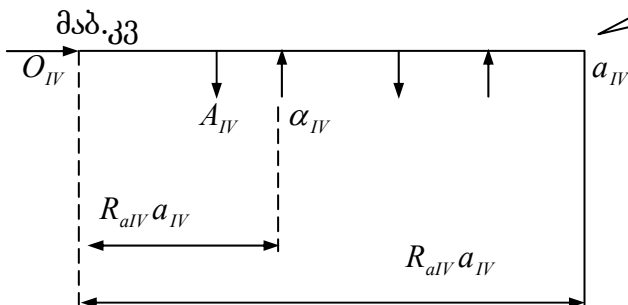
ბ) IIA, IIB სახის ამოცანა

ქსელის იერარქიული სტრუქტურის II



გ) III A, III B სახის ამოცანა

ქსელის იერარქიული



დ) IV A, IV B სახის ამოცანა



ნახ. 4.3

დასმული რვა სხვადასხვა სახის ამოცანიდან ყველაზე უფრო გლობალური ხასიათისაა I სახის ამოცანა, რადგანაც ამ ამოცანის ამოხსნისას, მთელი ქსელის ვერტიკალური იერარქიის გასწვრივ ყველა დონეზე, დადგენილი იქნება მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალური სიმძლავრეთა მნიშვნელობები და ამასთან განისაზღვრება გენერაციის წყაროების ოპტიმალური რეაქტიული დატვირთვები.

#### 4.3 ოპტიმიზაციის ამოცანის მათემატიკური მოდელი

ენერგეტიკის სისტემის ოპტიმალური რეჟიმის განსაზღვრის მეთოდები ეფუძნება დაყვანილი ხარჯების მინიმუმის მოძებნას. რეჟიმის მაქსიმალური ეკონომიკურობის უზრუნველსაყოფად არსებობს მთელი რიგი საშუალებები, როგორცაა:

- ელექტროსადგურებს შორის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების განაწილება;
- რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია;
- მუშაობაში ჩართული აგრეგატთა ოპტიმალური რიცხვის დადგენა;
- ელექტროსისტემაში სიმძლავრის ოპერატიული რეზერვის ოპტიმალური შერჩევა;
- სისტემის ოპტიმალური სქემის შერჩევა;
- სიხშირისა და ძაბვის ოპტიმალური რეგულირება.

მათემატიკური თვალსაზრისით ოპტიმიზაციის ამოცანა დაიყვანება მრავალი ცვლადის ფუნქციის მინიმუმის მოძიების



ამოცანამდე. ეს ცვლადები არ არიან დამოუკიდებელი, არამედ გააჩნიათ მთელი რიგი შეზღუდვები და ურთიერთ კავშირები.

ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესის ამსახველი სრული მათემატიკური მოდელი ზოგადად მოიცავს განტოლებათა ხუთ ჯგუფს:

1. მიზნის (ეფექტურობის) ფუნქცია;
2. კავშირის განტოლებები;
3. შეზღუდვის განტოლებები;
4. ოპტიმალური მართვის განტოლებები;
5. ადაპტაციის განტოლებები.

მიზნის ფუნქცია გვიჩვენებს დასმული მიზნისადმი ამა თუ იმ ამონახსნის შესაბამისობის ხარისხს, რაც მათემატიკური თვალსაზრისით ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$F(x_i) \Rightarrow \min \quad (4.1)$$

კავშირის განტოლებები აღწერენ სისტემის ტექნოლოგიურ პროცესს და გვიჩვენებს საძიებელი პარამეტრების კავშირს სისტემის მდგომარეობის დანარჩენ პარამეტრებთან. ასეთი პარამეტრი ზოგადად განიხილება როგორც პროცესის, ობიექტის, ელემენტის მახასიათებელი პარამეტრი. თუ დროის განმავლობაში ეს მახასიათებელი არ იცვლება მაშინ ობიექტი განიხილება, როგორც სტაციონარული. ობიექტის არასტაციონარობა ართულებს მათემატიკურ მოდელირებას.

შეზღუდვა შეიძლება მოცემული იქნეს, როგორც ტოლობის ასევე უტოლობის სახით:

$$W(x_i) = 0 \quad (4.2)$$

და

$$x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max} \quad (4.3)$$

ასევე შეზღუდვა შეიძლება იყოს ორგანიზაციული ხასიათის. მაგალითად, დირექტიული გადაწყვეტილება, რომელსაც კანონის ძალა აქვს და სავალდებულოა შესასრულებლად. ანალოგიურად შეიძლება გაგვაჩნდეს სოციალურ-შრომითი ხასიათის შეზღუდვები [40].

**ოპტიმალური მართვის განტოლება** წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ძირითად შედეგს. მართვის კანონის მოძიება შეადგენს სისტემის ფუნქციონირების ოპტიმიზაციის საბოლოო ეტაპს, რომლისთვისაც გამოიყენება ოპტიმიზაციის მეთოდები.

**ადაპტაციის განტოლებები** მართვის ავტომატური სისტემაში, სისტემის მუშაობის საწყისი განუსაზღვრელობის პირობებში, ეს არის შეგუებადი სისტემა, რომელიც გულისხმობს სისტემის პარამეტრების, სტრუქტურის და ძირითად მიმდინარე ინფორმაციაზე მართვადი ზემოქმედებების ცვლილების პროცესს სისტემის ოპტიმალური მდგომარეობის მიღწევის მიზნით.

ელექტრული ქსელების მიმართებაში ადაპტაცია ნიშნავს სამართავი ობიექტის მუშაობის პირობებისადმი ალგორითმთა არსებული ურთიერთდაკავშირებული სისტემის საუკეთესო გადაწყობას. ენერგეტიკის ობიექტის მუშაობისას განტოლებათა ადაპტაციური სისტემა ითვალისწინებს მუშაობის მიზნებისა და მისი მახასიათებლების ცვლილებას.

ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნისას ფართოდ გამოიყენება ლაგრანჟის განუსაზღვრელ მამრავლთა მეთოდი, რომლის დროსაც (4.1) მიზნობრივი ფუნქციის მინიმუმის მოძიების ნაცვლად განიხილება

ლაგრანჟის ფუნქციის მინიმუმის მოძიება, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე

$$L = F + \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t W_t \quad (4.4)$$

სადაც:  $\lambda_t$  – მუდმივი მამრავლებია, რომელთაც ლაგრანჟის განუსაზღვრელ

მამრავლებს უწოდებენ;

$W_t$  – (3.2) სახის შეზღუდვის განტოლება;

$n_t$  – შეზღუდვის განტოლებათა რაოდენობა.

საძიებელი ცვლადების მიმართ ლაგრანჟის ფუნქციის კერძო წარმოებულთა ნულთან გატოლებით მივიღებთ ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემას

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1} &= \frac{\partial F}{\partial x_1} + \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t \frac{\partial W_t}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} &= \frac{\partial F}{\partial x_2} + \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t \frac{\partial W_t}{\partial x_2} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} &= \frac{\partial F}{\partial x_n} + \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t \frac{\partial W_t}{\partial x_n} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

(4.5) სახის  $n$  რაოდენობისა და (4.2) სახის  $n_t$  რაოდენობის კავშირის განტოლებებით შევადგენთ  $(n + n_t)$  რაოდენობის განტოლებათა სისტემას, სადაც უცნობთა საერთო რაოდენობა ასევე  $(n + n_t)$ -ს ტოლია, მათ შორის  $n$  რაოდენობის საძიებელი ცვლადი  $x_1, x_2, \dots, x_n$  და  $n_t$  რაოდენობის ლაგრანჟის მამრავლი  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_t}$ .

განტოლებათა ამ სისტემის ამოხსნისას გათვალისწინებული უნდა იქნას (4.3) სახის უტოლობათა სისტემა.

#### 4.4 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის დასმა

ზემოთ ჩამოყალიბებული ალგორითმის ჭრილში, სისტემის იერარქიული სტრუქტურის ყველა დონის გათვალისწინებით, შეგვიძლია ჩავწეროთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის მათემატიკური მოდელის განტოლებები:

1. **მიზნობრივი ფუნქცია**, იგი მოიცავს მეურნეობის დაყვანილ ხარჯებს, რომლის შემადგენლობაში შედის:

- მაკომპენსირებელი დანადგარის ამორტიზაციაზე, რემონტსა და მომსახურებაზე ხარჯები და აგრეთვე ხარჯები პირველდაწყებითი კაპიტალდაბანდების ყოველწლიური დანარიცხების სახით;
- ხარჯები ქსელში დანაკარგების დასაფარავად საჭირო საგენერატორო სიმძლავრის პირველდაწყებითი კაპიტალდაბანდების ყოველწლიური დანარიცხების სახით;
- მაკომპენსირებელ დანადგარებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებით გამოწვეული ხარჯები;
- ქსელში აქტიური ენერჯის დანაკარგებით გამოწვეული ხარჯები;

აღნიშნულიდან გამომდინარე ყველაზე უფრო ოპტიმალური ამოცანის (I სახის ამოცანა) შემთხვევაში მიზნობრივი ფუნქცია შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით;

$$\begin{aligned}
 Z = & (E_6 + \alpha_3) \sum_{f=1}^{ng} K_{0,3} Q_{f3} + (E_6 + \alpha_2) \sum_{f=ng+1}^n K_{0,2} \Delta P_{\vartheta f} + \Delta P_3 \% \times \\
 & \times 10^{-2} C_0 T_0 \sum_{f=1}^{ng} Q_{f3} + \Delta P(Q) \cdot \tau C_0 \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

სადაც  $f$  – კვანძის ნომერი  $f=1,2,\dots,n_{\vartheta}$  სადაც განიხილება  $Q_{3j}$  სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების ოპტიმალობა

და  $f = n_{\text{ფ}}+1, n_{\text{ფ}}+2, \dots, n_{\text{ფ}}+n_{\text{ზ}}$ , სადაც განიხილება ახალი საგენერატორო სიმძლავრეთა დადგმა ქსელში დანაკარგების დასაფარავად:

$n_{\text{ფ}}$  – დატვირთვის კვანძების საერთო რაოდენობა;

$n_{\text{ზ}}$  – ელექტროსადგურთა საერთო რაოდენობა;

$n = n_{\text{ფ}} + n_{\text{ზ}}$  – ქსელში კვანძების საერთო რაოდენობა;

$E_{\text{ფ}}$  – პირველდაწყებითი კაპიტალური ხარჯების გამოსყიდვის ეფექტურობის

ნორმატიული კოეფიციენტი;

$\alpha_{\text{პ}}$  – მაკომპენსირებელი დანადგარის ამორტიზაციაზე, რემონტსა და მომსახურებაზე

ხარჯების ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\alpha_{\text{პ}} = 0,05 - 0,08;$$

$\alpha_{\text{ზ}}$  – იგივე სინქრონული გენერატორებისთვის

$$\alpha_{\text{ზ}} \approx 0,08 - 0,10;$$

$K_{0,\text{პ}}$  – მაკომპენსირებელი დანადგარის ხვედრითი ღირებულება

$$K_{0,\text{პ}} \approx 20000 - 25000 \text{ ლარი/მგვარ};$$

$K_{0,\text{ზ}i}$  – ახლადპროექტირებული ელექტროსადგურის დადგმული სიმძლავრის

ხვედრითი ღირებულება.

$$K_{0,\text{ზ}} \approx 1,5 - 2,0 \text{ მლნ ლარი/მგვტ};$$

$\Delta P_{\text{zi}}$  – ელექტროსადგურის დამატებითი დადგმული სიმძლავრე;

$C_0$  – ენერჯის ტარიფი იმ ძაბვის ქსელში, სადაც განიხილება

მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების ოპტიმალობა:

$$C_0 = 80 - 100 \text{ ლარი/მგვტსთ (0,38 კვ ძაბვის ქსელში);}$$

$$C_0 = 60 \text{ ლარი/მგვტსთ (6-10 კვ ძაბვის ქსელში);}$$

$C_0 = 40$  ლარი/მგვტსთ (35-220 კვ ძაბვის ქსელში);

$\Delta P_{\text{ჯ}} \%$  – მაკომპენსირებელ დანადგარებში სიმძლავრის დანაკარგების

პროცენტული მნიშვნელობა

$\Delta P_{\text{ჯ}} \% = 0,3 - 0,5$  (კონდენსატორთა ბატარეების შემთხვევაში);

$\Delta P_{\text{ჯ}} \% = 2,5 - 3,0$  (სინქრონული კომპენსატორების შემთხვევაში);

$T_0$  – მაკომპენსირებელი დანადგარის ჩართული მდგომარეობის

ხანგრძლივობა წელიწადში

$T_0 = 6000 - 7000$  სთ/წელი;

$\tau$  – მაქსიმალური დანაკარგების დრო წელიწადში

$\tau \cong 2500 - 3000$  სთ/წელი.

უნდა აღინიშნოს, რომ სიდიდე  $K_{0,3}$  მხედველობაში მიიღება ქსელის განვითარების პროექტირების დროს, როცა პერსპექტივაშია ახალი საგენერატორო სიმძლავრეების დადგმის საკითხი. არსებულ ქსელში ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნისას ვიღებთ  $K_{0,3} = 0$ , თუ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების დასაფარავად საკმარისია სისტემაში არსებული და მომუშავე დადგმული საგენერატორო სიმძლავრე.

ამოცანის უფრო მკაცრად დასმის შემთხვევაში მიზნის ფუნქცია უნდა შეიცავდეს აგრეთვე [26;52]:

- მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენებით ქსელის ელემენტების გამტარუნარიანობის გაზრდის ეფექტს;
- ზარალის შემცირებას ძაბვის დასაშვებზე მეტად გადახრის თავიდან აცილების შედეგად;

- ქსელის კვანძებში ძაბვის ნომინალურის მახლობლობაში შენარჩუნების შედეგად ოპტიმიზაციის ამოცანათა ამოხსნისას ცდომილების შემცირების ეფექტს.

2. კავშირის განტოლება. იგი წარმოადგენს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებსა და მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრეთ შორის კავშირს, რომელიც გამოსახება ფორმულით (პარ 2.4)

$$\Delta P_{\varrho} = \frac{1}{U_{\varrho}^2} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n (\varrho_f + \varrho_{f3}) (\varrho_k + \varrho_{k3}) R_{f,k} \quad (4.7)$$

სადაც  $\varrho_f, \varrho_k - f$  და  $K$  კვანძების რეაქტიული დატვირთვები, რომლებიც

შეთანხმების თანახმად (პარ. 2.4) აიღება “მინუსი” ნიშნით;

$\varrho_{f,3}, \varrho_{k,3}$  – მაკომპენსირებელ დანადგართა საძიებელი სიმძლავრე იმავე

კვანძებში.

თუ მოცემული კვანძი ელექტროსადგურის კვანძია, მაშინ  $\varrho_3$ -ს ქვეშ იგულისხმება ამ სადგურის გენერატორთა ჯამური დატვირთვა, რომელიც ზოგადად განსაზღვრას ექვემდებარება და აიღება “პლუს” ნიშნით.

3. შეზღუდვის განტოლებები და უტოლობები. შეზღუდვის განტოლება ჩაიწერება ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის სახით.

$$W_{\varrho} = \sum_{f=1}^{ng} (\varrho_f + \varrho_{f3}) + \sum_{f=ng+1}^n \varrho_{3f} + \Delta Q = 0, \quad (4.8)$$

სადაც  $\Delta Q$  – ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი.

შეზღუდვის უტოლობები ჩაიწერება საძიებელი სიდიდეებისადმი ორმხრივი უტოლობის სახით.

$$\left. \begin{aligned} Q_{f3 \min} &\leq Q_{f3} \leq Q_{f3 \max} \\ Q_{\delta f \min} &\leq Q_{\delta f} \leq Q_{\delta f \max} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

კონდენსატორთა ბატარეების შემთხვევაში  $Q_{i3 \min} = 0$ .

#### 4.5 რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემა

(4.4) გამოსახულების თანახმად (4.6)–(4.8) გამოსახულებათა საფუძველზე შევადგინოთ ლაგრანჟის განტოლება

$$\begin{aligned} L = & (E_6 + \alpha_3) \sum_{f=1}^{n_g} K_{0,3} Q_{\delta j} + (E_6 + \alpha_3) \sum_{f=n_g+1}^n K_{0,3} \Delta P_{\delta j} + \Delta P_{\delta} \% \cdot 10^{-2} C_0 T_0 \sum_{f=1}^{n_g} Q_{\delta j} + \\ & + \Delta P(Q) \tau G_0 + \lambda \left[ \sum_{f=1}^{n_g} (Q_f + Q_{f\delta}) + \sum_{f=n+1}^n Q_{\delta j} + \Delta Q \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

საინჟინრო გაანგარიშებებში დასაშვებია მივიჩნიოთ, რომ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები არ არის დამოკიდებული რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციასა და ამ დატვირთვის სადგურებს შორის განაწილებაზე. ე.ი. ვღებულობთ

$$\Delta Q = const. \quad (4.11)$$

განვიხილოთ (4.10) გამოსახულების კერძო წარმოებულები  $Q_{f3}$  და  $Q_{\delta f}$  ცვლადების მიმართ, რომლებიც ფუნქციის მინიმუმის პირობის თანახმად ნულის ტოლია:



$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial Q_{f_3}} &= (E_6 + \alpha_3)K_{0_3} + \Delta P_3 \% \cdot 10^{-2} C_0 T_0 + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f_3}} + \lambda = 0, f = 1, 2 \dots n_g \\ \text{და} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{f_f}} &= (E_6 + \alpha_3)K_{0_{\sigma f}} \frac{\partial \Delta P_{\sigma f}}{\partial Q_{\sigma f}} + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\sigma f}} + \lambda = 0, f = n_g + 1, n_g + 2 \dots n \end{aligned} \right\} (4.12)$$

ანუ, თუ მიღებულ განტოლებათა სისტემას განვიხილავთ ელექტრული სისტემის არსებული ქსელის მიმართ ( $\Delta P_{\sigma f} = 0$ ) გვექნება

$$\left. \begin{aligned} (E_\sigma + \alpha_3)K_{0_{\sigma}} + \Delta P_3 \% C_0 T_0 \cdot 10^{-2} + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f_3}} + \lambda &= 0 \\ \text{და} \\ \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\sigma f}} + \lambda &= 0 \end{aligned} \right\} (4.13)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$(E_6 + \alpha_3)K_{0_{\sigma}} + \Delta P_3 \% C_0 T_0 \cdot 10^{-2} = M \quad (4.14)$$

მაშინ (4.13) განტოლებათა სისტემა ასე ჩაიწერება:

$$\left. \begin{aligned}
 M + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{1\delta}} + \lambda &= 0 \\
 M + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{2\delta}} + \lambda &= 0 \\
 \dots\dots\dots \\
 M + \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{n_{\text{გ}}\delta}} + \lambda &= 0 \\
 \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\delta 1}} + \lambda &= 0 \\
 \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\delta 2}} + \lambda &= 0 \\
 \dots\dots\dots \\
 \tau C_0 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\delta n_{\text{გ}}}} + \lambda &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

მაბალანსირებულ კვანძად ავირჩიოთ ელექტროსადგური  $n_{\text{გ}}$  ნომრით, მაშინ

$$\frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{\delta n_{\text{გ}}}} = 0$$

და ვღებულობთ

$$\lambda = 0.$$

აქედან გამომდინარე ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემას აქვს სახე:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f\delta}} &= -\frac{M}{\tau C_0} \quad f = 1, 2, \dots, n_{\text{გ}} \\
 \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f\delta}} &= 0 \quad f = n_{\text{გ}} + 1, \quad n_{\text{გ}} = 2 \\
 \sum_{f=1}^n (Q_f + Q_{f\delta}) + \sum_{f=n_{\text{გ}}+1}^n Q_{f\delta} + \Delta Q &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

იმ შემთხვევაში, როცა ელექტროსადგურის რეაქტიული დატვირთვები მოცემულია (I სახის ამოცანა), მაშინ ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემას ექნება სახე

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f,\delta}} = a \quad f = 1, 2 \dots n_g \\ \sum_{f=1}^{n_g} (Q_f + Q_{f,\delta}) + \sum_{f=n_g+1}^n Q_{f,\delta} + \Delta Q = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

სადაც

$$a = -\frac{M}{\tau C_o}$$

(4.14)-ის გათვალისწინებით, გვაქვს

$$a = \frac{(E_{\delta} + \alpha_{\delta}) K_{0,\delta} + \Delta P_{\delta} \% \cdot T_0 C_0 \cdot 10^{-2}}{\tau C_0}, \quad (4.18)$$

(4.16) და (4.17) განტოლებათა სისტემა (2.35) და (2.36) გამოსახულების თანახმად შეგვიძლია ჩავწეროთ სახეში

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{U_6^2} \sum_{k=1}^{n-1} R_{f,k} (Q_K + Q_{K,\delta}) = \delta \quad f = 1, 2 \dots n_g \\ \frac{2}{U_6^2} \sum_{K=1}^{n-1} R_{f,K} Q_{K,\delta} = 0 \quad f = n_g + 1, \quad n_g + 2 \quad n - 1 \\ \sum_{K=1}^{n_g} (Q_K + Q_{K,\delta}) + \sum_{K=n_g+1}^n Q_{K,\delta} + \Delta Q = 0 \end{aligned} \right\}$$

(4.19)

და, როცა ელექტროსადგურების დატვირთვა მოცემულია,

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{U_6^2} \sum_{K=1}^{n-1} R_{f,K} (Q_K + Q_{K,\delta}) = \delta \quad f = 1, 2 \dots n_g \\ \sum_{K=1}^{n_g} (Q_K + Q_{K,\delta}) + \sum_{K=n_g+1}^n Q_{K,\delta} + \Delta Q = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომში განიხილება (4.20) სახის განტოლებათ სისტემა (I B სახის ამოცანა). ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ ელექტროსადგურის რეაქტიული დატვირთვები წინასწარ განსაზღვრულია, მათდამი სხვა ტექნიკური მოთხოვნების გათვალისწინებით.

#### 4.6. a პარამეტრის ფიზიკური არსი და მისი გავლენა რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხზე

როგორც ადრე ავლნიშნეთ (თავი 2 გამოსახულება 2.43), პარამეტრი a (გამოსახულება 4.18) წარმოადგენს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის იმ მაქსიმალურ სიდიდეს, რომლის მეტად ფარდობითი ნაზრდის გაზრდა ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია და ამ a პარამეტრს დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური მნიშვნელობა ვუწოდეთ.

(4.17) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლება გვიჩვენებს, რომ ქსელის თითოეულ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია უნდა განხორციელდეს იმ ხარისხით, რომ ამ კვანძისათვის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი გაუტოლდეს მის ოპტიმალურ მნიშვნელობას.

(4.18) გამოსახულების თანახმად a პარამეტრის რიცხვით მნიშვნელობაზე გავლენას ახდენს ქსელის და მაკომპენსირებელი დანადგარის მთელი რიგი ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლები. კერძოდ: მაკომპენსირებელი დანადგარის ხვედრითი ღირებულება ( $K_0$ ); საექსპლოატაციო ხარჯების ნორმა ( $\alpha_3$ ), აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების სიდიდე თვით ამ დანადგარში ( $\Delta P_3\%$ ); ქსელში

მაქსიმალური კარგების დრო ( $\tau$ ); ელექტრული ენერჯის ტარიფი ( $C_0$ ).

(4.18) გამოსახულება გადავწეროთ შემდეგ სახეში

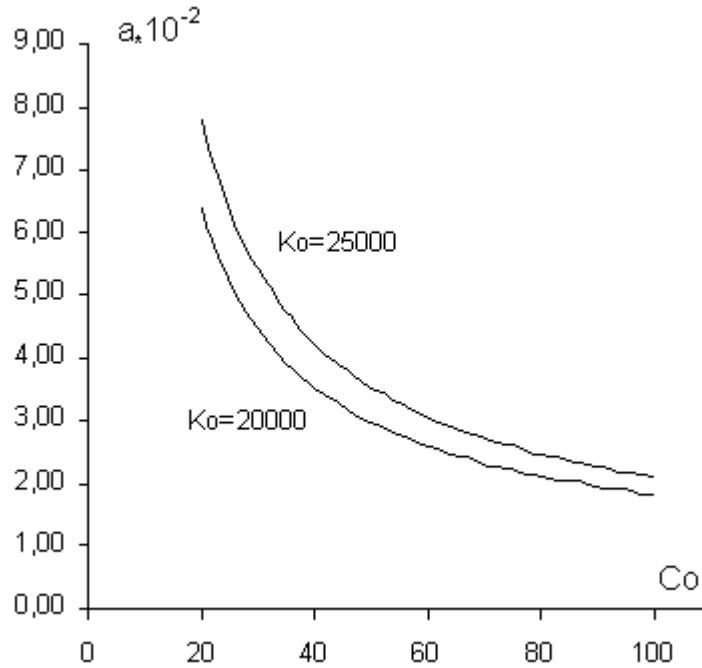
$$a = \frac{V}{\tau} \left[ \frac{(E_6 + \alpha)K_0}{C_0} + \Delta P_3 \% T_0 \cdot 10^{-2} \right] \quad (4.21)$$

ამ გამოსახულების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია ვიმსჯელოთ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხზე, კერძოდ:

1. იმ ქსელებში, სადაც მაქსიმალური დანაკარგების დრო ( $\tau$ ) მაღალია, დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური მნიშვნელობა აბსოლუტური სიდიდით დაბალია, ანუ ახლოსაა ნულთან. ე.ი. ამ შემთხვევაში საჭიროა ქსელში მაქსიმალურად განვახორციელოთ რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია, ანუ ქსელში კომპენსაციის ხარისხი უნდა იყოს მაღალი:
2. თვით მაკომპენსირებელ დანადგარებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების სიდიდე ( $\Delta P_3\%$ ) შემზღუდავ ფაქტორად მოქმედებს რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხზე. კერძოდ, როცა ეს დანაკარგები მაღალია, მაშინ  $a$  დიდია აბსოლუტური სიდიდით და შესაბამისად დაბალია კომპენსაციის ხარისხი.
3. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხზე შემზღუდავ ფაქტორად მოქმედებს, აგრეთვე მაკომპენსირებელი დანადგარის ხვედრითი ღირებულება ( $K_0$ ). მისი მაღალი მნიშვნელობა იწვევს კომპენსაციის ხარისხის შემცირებას;
4. ელექტრული ენერჯის ტარიფის ( $C_0$ ) მაღალი მნიშვნელობისას დაბალია  $a$ -ს აბსოლუტური სიდიდე, რაც მიუთითებს მასზე, რომ

როცა მაღალია  $C_0$ , მით მაღალია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი.

ქვემოთ (ნახ. 4.4, ცხრილი 4.2) მოცემულია  $a = f(K_0, C_0)$  დამოკიდებულების გრაფიკი და ცხრილური მნიშვნელობები, როცა  $(E_6 + \alpha_3) = 0,17$ ;  $\Delta P_3\% = 0,3$ ;  $T_0 = 7000$ სთ და  $\tau = 3000$ სთ



ნახ 4.4

ცხრ. 4.2

$C_0$ ლარი/მგვტსთ	$a \cdot 10^{-2}$	
	$K_0 = 20000$	$K_0 = 25000$
20	6,40	7,82
40	3,55	4,26
60	2,60	3,18
80	2,12	2,48
100	1,84	2,13
120	1,65	1,89
140	1,51	1,72

## თ ა ვ ი 5

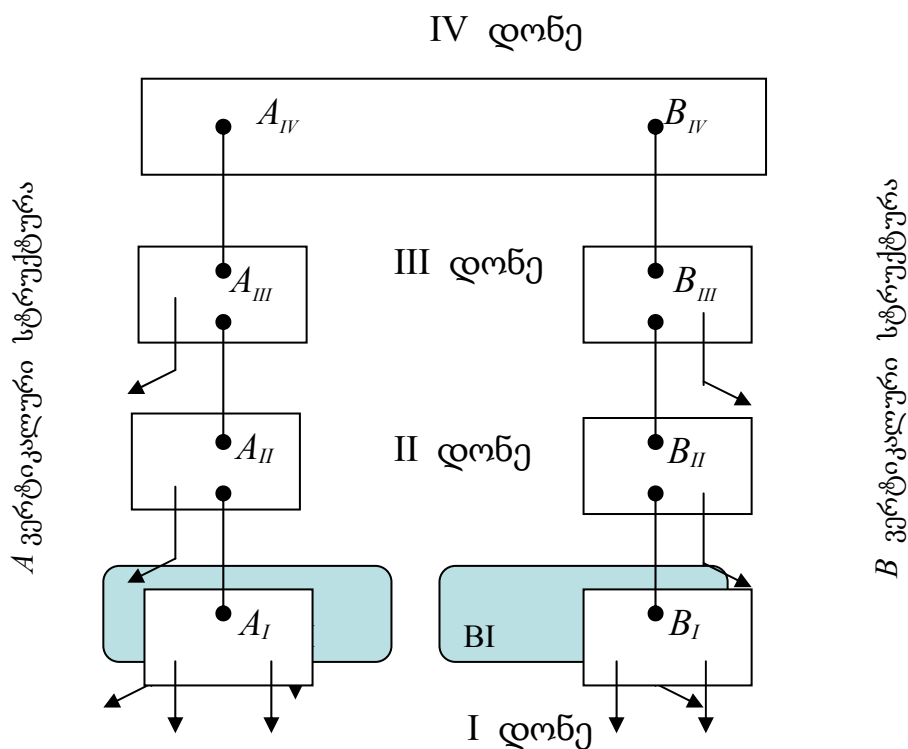
### ქსელის სქემის ეკვივალენტირება და რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია

#### 5.1 რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გლობალური ამოცანის გამარტივების საფუძვლები

თანამედროვე ენერგოსისტემაში, რომლებიც შეიცავენ რამდენიმე ასეულ შტოსა და კვანძს. ამა თუ იმ სახის ამოცანის დასმა და მისი ამოხსნა რთულდება საჭირო საწყისი ინფორმაციის დიდი მოცულობისა და მათი მოპოვების სირთულის გამო. ინფორმაციის ხარისხი ხასიათდება საკმარისობით, დროულობით, სიზუსტითა და არსებითობით. დიდი რაოდენობის ინფორმაციის შეგროვების პროცესში მისი ხარისხი რამდენადმე ეცემა და შესაბამისად, დასმული ამოცანის ამონახსნიც მოკლებულია სათანადო სიზუსტეს. აქედან გამომდინარე, გარდაუვალი ცდომილების თავიდან აცილების მიზნით, მთელ რიგ შემთხვევებში უფრო მიზანშეწონილია დავეყრდნოთ შედარებით ადვილად მოსაპოვებელ და აუცილებელი მინიმალური რაოდენობის ინფორმაციას, რომელთა საფუძველზე ჩამოყალიბებული მათემატიკური მოდელი საშუალებას მოგვცემს გავამარტივოთ დასმული ამოცანა და ამასთან მაქსიმალურად უზრუნველვყოთ მიზნის ფუნქციის საკმარისი სიზუსტით ფორმირება [16]

როგორც ადრე აღვნიშნეთ (§ 3.1) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულადაც მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს.

ენერგოსისტემის იერარქიული სტრუქტურა წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილია ოთხი ვერტიკალური დონის სახით (ნახ. 4.1), სადაც უმაღლეს IV დონედ განიხილება 220-500კვ ძაბვის მკვებავი შეკრული ქსელი. ამ ქსელის საშუალებით მყარდება ელექტრული კავშირი ნებისმიერ  $A$  და  $B$  ვერტიკალური სტრუქტურის კვანძებს შორის (ნახ 5.1).



ნახ. 5.1

ქსელის კვანძების საკუთარ და ურთიერთწინააღმდეგობათა განმარტების თანახმად ნებისმიერი კონფიგურაციის შეკრული ქსელისათვის ყოველთვის სრულდება პირობა (§2.2)

$$R_{ff} > R_{fk},$$

ანუ 5.1 ნახაზზე წარმოდგენილი სქემისათვის გვაქვს

$$R_{AIV AIV} > R_{AIV BIV}, \quad (5.1)$$



რაც უფრო დაბლა გადავდივართ ვერტიკალური იერარქიის გასწვრივ, მით უფრო იზრდება კვანძების საკუთარი წინაღობა, ხოლო ამ ვერტიკალის კვანძების და მეორე ვერტიკალური იერარქიის კვანძების ურთიერთწინაღობა კი იგივე (უცვლელი) რჩება. აქედან გამომდინარე

$$R_{AIAI} > R_{AIIAII} > R_{AIIIAIII} > R_{AIV AIV} > R_{AIVBIV} \quad (5.2)$$

და

$$R_{AIBIV} = R_{AIBIII} = R_{AIBII} = R_{AIBI} = R_{AIVBIV} \quad (5.3)$$

ამრიგად, მოცემული ვერტიკალური იერარქიის გასწვრივ ( $A$  ვერტიკალი) რაც უფრო დაბალი დონის კვანძებს განვიხილავთ, მით უფრო ნაკლებად არსებითია მეორე ვერტიკალური იერარქიის ( $B$  ვერტიკალი) კვანძების დატვირთვების გავლენა განსახილველი  $A$  ვერტიკალის კვანძების დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდეზე.

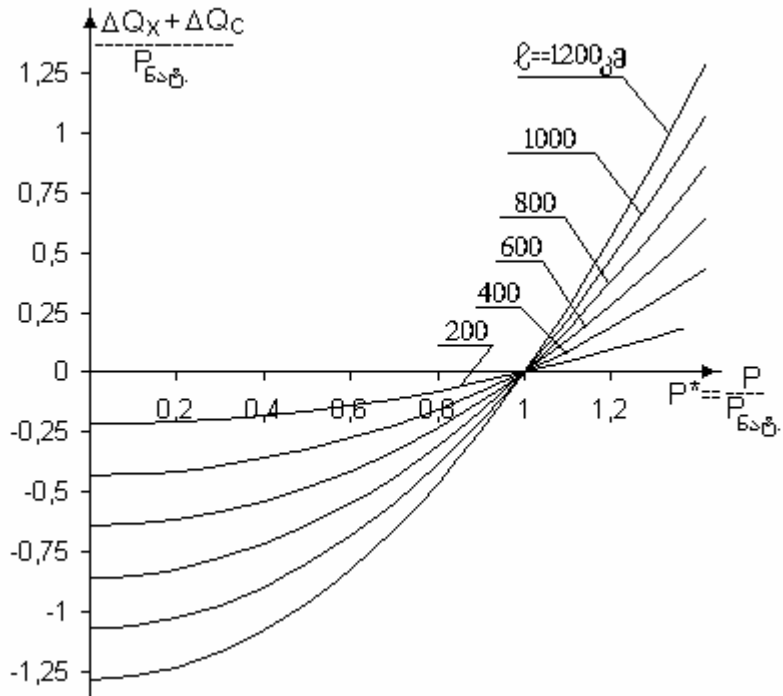
აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემის (4.20) შედგენისას მთელი ქსელის ყველა დონის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები დაყვანილ უნდა იქნეს ერთ ბაზისურ ძაბვაზე. ამიტომ ერთ ბაზისურ ძაბვაზე გადასვლისას უფრო დაბალი დონის ელემენტების წინაღობები რამდენჯერმე აღემატება უფრო მაღალი ძაბვის დონეთა ელემენტების წინაღობებს. აღნიშნულიდან გამომდინარე (5.2) სახის უტოლობა კიდევ უფრო ძლიერდება და შედეგად გვაქვს, რომ იერარქიის მეორე ვერტიკალის გავლენა განსახილველი ვერტიკალის ამოცანის ამოხსნის შედეგებზე კიდევ უფრო ნაკლებად არსებითი ხდება.

მაშასადამე, განსახილველ იერარქიულ ვერტიკალში დასმული ამოცანის განხილვისას, ამოხსნის შედეგები საინჟინრო გაანგარიშებისათვის დასაშვებ ფარგლებს გარეთ რომ არ აღმოჩნდეს, საკმარისი იქნება იერარქიის მეორე ვერტიკალის ინფორმაციის მხოლოდ მიახლოებით გათვალისწინება.

ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის IV დონე როგორც აღვნიშნეთ, წარმოადგენს მაღალი ძაბვის ქსელს, რომლის გადაცემის ხაზები ხასიათდებიან მნიშვნელოვანი სიდიდის რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციით

$$\Delta Q_c = U_n^2 B. \quad (5.4)$$

ზემაღალი ძაბვის ხაზების ძირითადი დანიშნულებაა აქტიური სიმძლავრის გადაცემა. ამ ხაზებით რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა არ იგეგმება. პრაქტიკულად, უმრავლეს შემთხვევაში აღნიშნული ძაბვის ხაზები, ელექტრული სისტემის სხვადასხვა რეჟიმებში, განსაკუთრებით, მინიმალური დატვირთვების რეჟიმებში, დატვირთულნი არიან თავიანთ ნატურალურ სიმძლავრეზე ნაკლები ტვირთით  $P < P_{\text{ნატ}}$ . ასეთ რეჟიმებში ხაზები რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია ქარბობს მის რეაქტიულ წინაღობაში დაკარგულ რეაქტიულ სიმძლავრეს (ნახ. 5.2) და შედეგად, აღნიშნული ძაბვის ქსელებში ან იერარქიის IV დონეზე, პრაქტიკულად, ყოველთვის გვაქვს ქარბი რეაქტიული სიმძლავრე, რომელთა კომპენსაციისათვის ამ ქსელის კვანძებში დაყენებული უნდა იქნეს მაშუნტებელი რეაქტორები (ნახ. 1.6, 1.7)



ნახ. 5.2

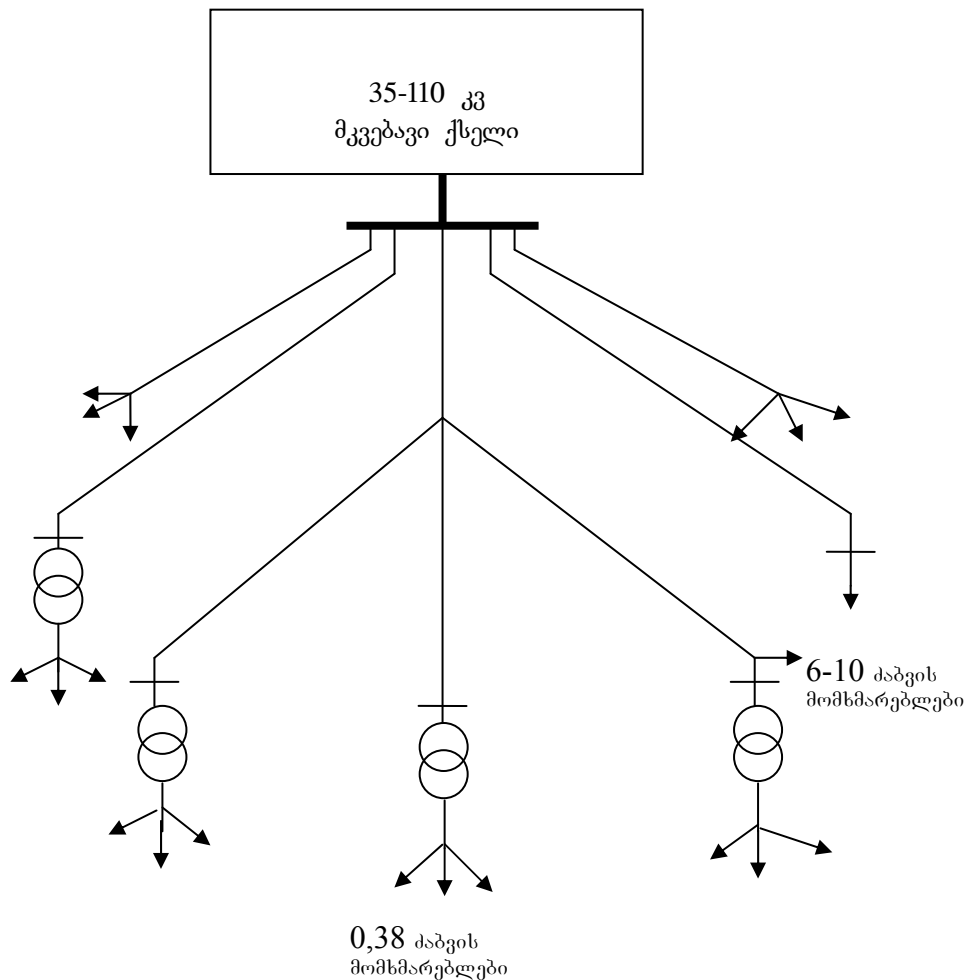
აქედან გამომდინარე გვაქვს საკმარისი საფუძველი ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის დასმისას მაბალანსირებელ კვანძად განვიხილოთ მოცემული ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის IV დონესთან დამაკავშირებელი კვანძი.

ვერტიკალური იერარქიის I დონე ეს არის 0,38 კვ ძაბვის დამოუკიდებელი ღია ქსელი. 6-10/0,38 კვ ძაბვის სატრანსფორმატორო ქვესადგურის დაბალი ძაბვის (0,38კვ) სალტეებიდან იკვებება ძირითადად ერთფაზა მომხმარებლები, ხოლო მაღალი ძაბვის (6-10კვ) სალტეებიდან კი პრაქტიკულად სამფაზა მომხმარებლები. ამ ქვესადგურებზე შესაძლებელია მაკომპენსირებელი დანადგარები დაყენებული იქნეს როგორც 6-10კვ ძაბვის სალტეზე ВБК, ასევე 0,38 კვ ძაბვის სალტეზე НБК [47].

როგორც ანგარიშების შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, 0,38 კვ ძაბვის ერთფაზა

რადიალური ხაზების ბოლოს მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების დამატებითი ეკონომიკური ეფექტი იმდენად უმნიშვნელოა, რომ ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმისას ამ ხაზების გაუთვალისწინებლობა ამოხსნის პრაქტიკულ შედეგებზე გავლენას ვერ ახდენს.

ყველა ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის დასმისას შესაძლებელია განვიხილოთ ვერტიკალური იერარქიის მხოლოდ II და III დონე (ნახ. 5.3), ამასთან საინჟინრო გაანგარიშებისათვის საკმარისი სიზუსტით შენარჩუნებულ იქნება მოცემული ამოცანის დასმის სისტემური მიდგომის პრინციპი.



ნახ. 5.3

5.2 რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი და მაკომპენსირებელი დანადგარებით ქსელის აღჭურვილობის კოეფიციენტი

უმარტივეს რადიალურ ქსელში (ნახ. 5.4) აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდეგ გამოითვლება ფორმულებით:

$$\Delta P = \frac{P^2 + U^2}{U_0^2} R \text{ კომპენსაციამდე}$$

და

$$\Delta P' = \frac{P^2 + (Q + Q_0)^2}{U_0^2} R \text{ - კომპენსაციის შემდეგ*}$$

ანუ

$$\Delta P' = \frac{P^2 + (Q + Q_0)^2}{P^2 + Q^2} \cdot \Delta P \tag{5.5}$$

მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების პირობებში დაყვანილი ხარჯების (4.6) საანგარიშო გამოსახულებას ექნება სახე

$$3 = (E_0 + \alpha_3) K_{0,3} \cdot Q_0 + \Delta P_0 \% \cdot 10^{-2} Q_0 T_0 C_0 + \Delta P' \tau C_0 \tag{5.6}$$



ნახ. 5.4

და, შესაბამისად (4.17)-ის პირველი განტოლების თანახმად მივიღებთ

$$\frac{\partial \Delta P'}{\partial Q_0} = a ,$$

სადაც,  $\alpha$  განისაზღვრება (4.18)-ით.

(5.5)-ის თანახმად

$$\frac{\partial \Delta P'}{\partial Q_s} = 2(Q + Q_s) \frac{\Delta P}{P^2 + Q^2}$$

და გვაქვს

$$2(Q + Q_s) \frac{\Delta P}{P^2 + Q^2} = a$$

აქედან,

$$Q_s = -Q + \frac{a(P^2 + Q^2)}{\Delta P} = -Q + \frac{aP^2(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\Delta P}. \quad (5.7)$$

გავითვალისწინოთ (2.16) გამოსახულების ჩაწერისას მიღებული შეთანხმება და რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციამდე ქსელში არსებული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ჩავწეროთ მისი პროცენტული მნიშვნელობით

$$\Delta P = -\Delta P\% \cdot 10^{-2} P \quad (5.8)$$

შესაბამისად (5.7) მიიღებს სახეს

$$Q_s = -Q - \frac{50aP(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\Delta P\%} \quad (5.9)$$

მიღებული ტოლობის ორივე მხარე გავყოთ  $(-Q)$ -ზე გვექნება

$$\beta = 1 + \frac{50aP(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)}{Q\Delta P\%}$$

ანუ

$$\beta = 1 + \frac{50a(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi \cdot \Delta P\%}, \quad (5.10)$$

სადაც სიდიდეს

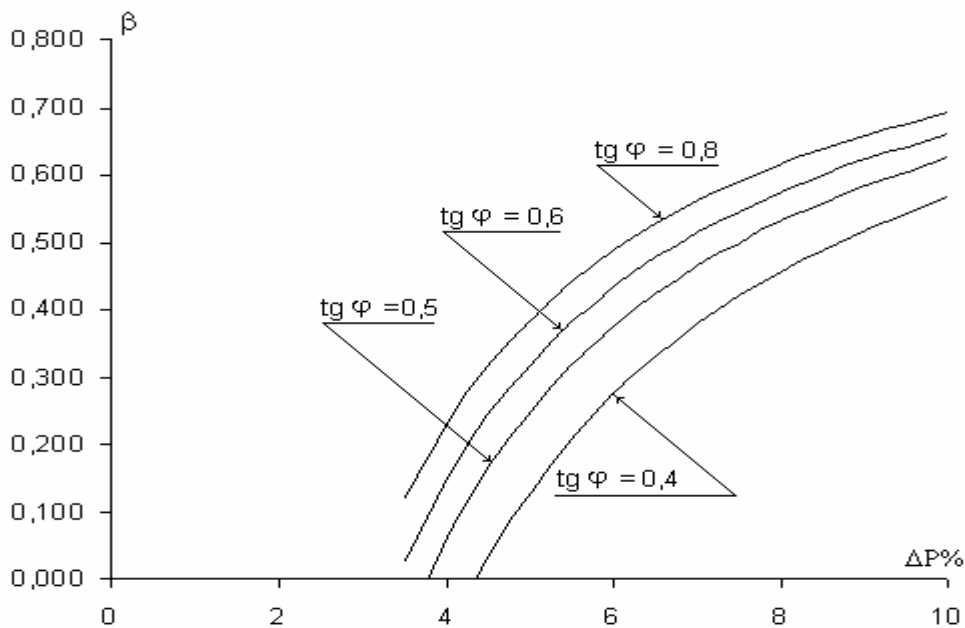
---

\*) ამ გამოსახულების ჩაწერისას გათვალისწინებულია (2.16) გამოსახულების ფორმირებისას მიღებული შეთანხმება

$$\beta = \frac{Q_d}{-Q} \quad (5.11)$$

უწოდებენ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხს.

როგორც ვხედავთ განსახილველ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხი (5.10) დამოკიდებულია ამ ქსელის მუშაობის რეჟიმის საწყის (კომპენსაციამდე) პარამეტრებზე. კერძოდ, აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებსა და რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტზე (ნახ. 5.5, ცხრ. 5.1).



ნახ. 5.5

ცხრილი 5.1.  $\beta$  კოეფიციენტის მნიშვნელობები ( $\alpha = -3 \cdot 10^{-2}$ )

$\Delta P\%$ $tg\varphi$	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	8,0	10,0
0,4	–	–	0,033	0,130	0,275	0,456	0,565
0,5	–	0,063	0,167	0,250	0,375	0,531	0,625
0,6	0,029	0,15	0,244	0,320	0,433	0,575	0,660
0,7	0,088	0,202	0,290	0,361	0,469	0,601	0,681
0,8	0,121	0,231	0,317	0,385	0,488	0,616	0,693
0,9	0,138	0,246	0,330	0,397	0,497	0,623	0,698

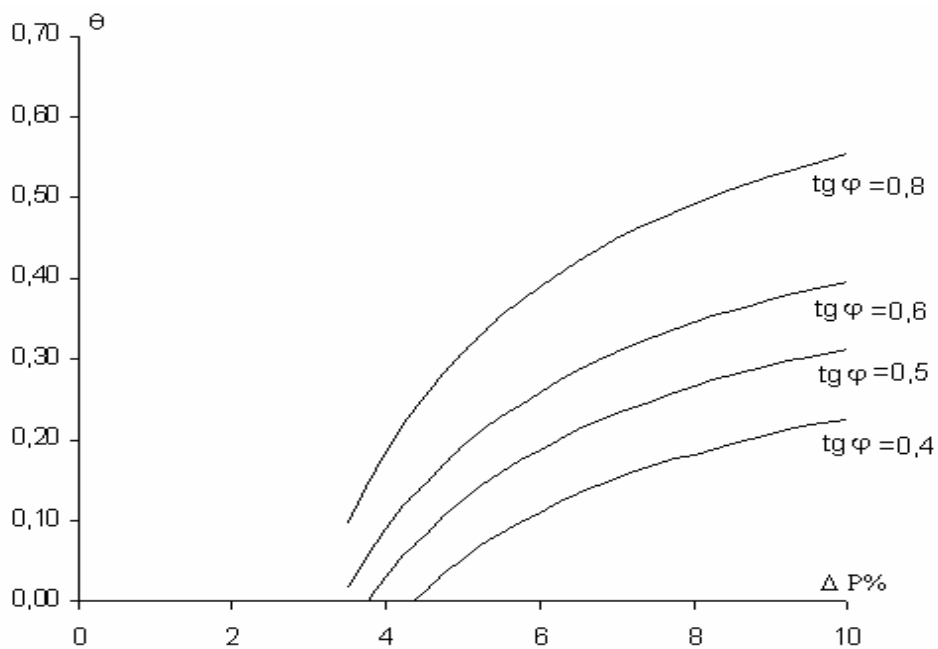
(5.9) გამოსახულების ორივე მხარე გავყოთ  $(-P)$ -ზე, გვაქვს

$$\theta = tg\varphi + \frac{50a(1 + tg^2\varphi)}{\Delta P\%}, \quad (5.12)$$

სადაც სიდიდეს,

$$\theta = \frac{Q_i}{-P} \quad (5.13)$$

უწოდებენ მაკომპენსირებელი დანადგარებით ქსელის აღჭურვილობის ოპტიმალურ კოეფიციენტს (ნახ. 5.6, ცხრ. 5.2)



ნახ.5.6



ცხრილი 5.2.  $\theta$  კოეფიციენტების მნიშვნელობები ( $a = -3 \cdot 10^{-2}$ )

$\Delta P\%$ $tg\varphi$	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	8,0	10,0
0,4	–	–	0,0132	0,052	0,110	0,182	0,226
0,5	–	0,032	0,084	0,125	0,188	0,266	0,313
0,6	0,017	0,09	0,146	0,192	0,260	0,345	0,396
0,7	0,062	0,141	0,203	0,253	0,328	0,421	0,477
0,8	0,097	0,185	0,254	0,308	0,390	0,493	0,554
0,9	0,124	0,221	0,297	0,357	0,447	0,561	0,628

მრავალრიცხოვანი ანგარიშები გვიჩვენებს, რომ ეკონომიკურად მიზანშეწონილია მაკომპენსირებელი დანადგარებით ქსელის აღჭურვილობის კოეფიციენტი აღწევდეს 0,45-0,50 კვარ/კვტ-ს [16;21;36;51;57]. როგორც წინამდებარე ანგარიშები გვიჩვენებს მაკომპენსირებელი დანადგარებით აღჭურვილობის კოეფიციენტის ასეთი მაღალი მნიშვნელობა ეკონომიკურად მიზანშეწონილია მაშინ, როცა ქსელის რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტი  $tg\varphi = 0,7 - 0,8$  და ამ დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები შეადგენს 6-10%-ს. უფრო ნაკლები საწყისი პარამეტრებისას აღჭურვილობის კოეფიციენტი შესამჩნევად ეცემა (ნახ.5.6, ცხრ.5.2).

(5.11) და (5.13) გამოსახულებათა შედარებიდან ვწერთ

$$\beta = \frac{\theta}{tg\varphi} \tag{5.14}$$

ადვილად დავრწმუნდებით, რომ მაკომპენსირებელი დანადგარებით ქსელის აღჭურვილობის კოეფიციენტი

$$\theta = tg\varphi - tg\varphi_{\text{ობტ}}, \tag{5.15}$$

სადაც  $tg\varphi_{\text{ობ}}$  რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტის მინიმალური მნიშვნელობაა, რომლის დროსაც ქსელში არსებული დანაკარგების პირობებში, რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია.

როთულ შეკრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემას (4.20) აქვს სახე:

$$\frac{2}{U_6^2} \sum_{K=1}^n R_{f,K} (Q_K + Q_{3_K}) = a, \quad f = 1, 2, \dots, n \quad (5.16)$$

სადაც  $n$  - ქსელში სამომხმარებლო კვანძების საერთო რაოდენობა.

(5.16) გადავწეროთ შემდეგი სახით

$$\frac{2}{U_6^2} \left[ \sum_{K=1}^n Q_{3_K} R_{f,K} + \sum_{K=1}^n Q_K R_{f,K} \right] = a$$

ანუ

$$\frac{2}{U_6^2} Q_f \cdot R_{f,f} + \frac{2}{U_6^2} \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq f}}^n Q_{3_K} R_{f,K} + \frac{2}{U_6^2} Q_f R_{f,f} + \frac{2}{U_6^2} \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq f}}^n Q_K R_{f,K} = a,$$

რომელიც (5.11) და (5.13) გამოსახულებათა გათვალისწინებით ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\frac{2Q_f R_{ff}}{U_6^2} (1 - \beta_f) + \frac{2}{U_6^2} \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq f}}^n Q_K \cdot R_{f,K} \left( 1 - \frac{\Theta_K}{tg\varphi_K} \right) = a. \quad (5.17)$$

საინჟინრო გაანგარიშებისთვის დასაშვები სიზუსტით შეგვიძლია მივიღოთ, რომ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტის გასაშუალოებული მნიშვნელობა  $tg\varphi_K \approx tg\varphi_o \approx 0,65 - 0,75$ , ხოლო მაკომპენსირებელი დანადგარებით

ქსელის აღჭურვილობის კოეფიციენტის გასაშუალოებული მნიშვნელობა  $\theta_K - \theta_o \approx 0,25 - 0,35$  [16].

აღნიშნულიდან გამომდინარე (5.17) ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\frac{2Q_f R_{ff}}{U_6^2} (1 - \beta_f) + \frac{2}{U_6^2} \left(1 - \frac{\theta_o}{\text{tg}\varphi_o}\right) \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq f}}^n Q_K R_{fK} = a \quad (5.18)$$

ანუ (2.48) და (2.49) გამოსახულებათა ანალოგიით, ვწერთ

$$\sigma'_f (1 - \beta_f) + \left(1 - \frac{\theta_o}{\text{tg}\varphi_o}\right) \sigma''_f = a$$

აქედან

$$\beta_f = \frac{\sigma'_f - a}{\sigma'_f} + \frac{\sigma''_f}{\sigma'_f} \left(1 - \frac{\theta_o}{\text{tg}\varphi_o}\right). \quad (5.19)$$

მიღებული გამოსახულება საშუალებას გვაძლევს შევავასოდ შეკრული ქსელის მოცემულ  $f$  კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი ქსელის დანარჩენ ნაწილში მაკომპენსირებელი დანადგარებით აღჭურვილობის კოეფიციენტის გათვალისწინებით:

1. აღნიშნული გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მისი მეორე წევრი ყოველთვის დადებითი სიდიდეა, რადგანაც  $\theta_o \leq \text{tg}\varphi_o$ , და თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს, როცა  $\theta_o = 0$ . ე.ი. როცა ქსელის დანარჩენ ნაწილში მაკომპენსირებელი დანადგარებით აღჭურვილობის კოეფიციენტი ნულის ტოლია. მოცემულ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი აშკარად ამაღლებულია ამოცანის სისტემური მიდგომით ამოხსნისას მიღებულ ოპტიმალურ მნიშვნელობასთან შედარებით;
2. იმ შემთხვევაში, როცა ქსელის დანარჩენ ნაწილში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია ( $\Theta_o=0$ ), მაშინ

$$\beta_f = \frac{\sigma_f - a}{\sigma'_f}, \quad (5.20)$$

რაც მიგვითითებს მასზე, რომ მოცემულ კვანძში მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება ეკონომიურად მიზანშეწონილია თუ,  $|\sigma_f| > |a|$  და, შესაბამისად,

$$Q_{3f} = -\frac{\sigma_f - a}{\sigma'_f} \cdot Q_f; \quad (5.21)$$

3. ქსელის დანარჩენ კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ამცირებს მოცემულ  $f$  კვანძში კომპენსაციის ხარისხს, რადგანაც ამ შემთხვევაში ერთის მხრივ იზრდება  $\theta_o$ , ხოლო მეორეს მხრივ კომპენსაცია იცირდება  $\sigma''_f$ .

(5.19) გამოსახულება შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით

$$Q_{3f} = -Q_f + \frac{aU_6^2}{2R_{ff}} - \left(1 - \frac{\theta_o}{\text{tg}\varphi_o}\right) \frac{\sigma''_f U_6^2}{2R_{ff}}. \quad (5.22)$$

რადგანაც  $\sigma''_f < 0$ , (5.22) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ განსახილველ  $f$  კვანძში რეაქტიული დატვირთვის მოსალოდნელი კომპენსაციის ხარისხი მით მეტია, რაც მეტია ქსელის დანარჩენი კვანძების რეაქტიული დატვირთვებისა და  $f$  კვანძის მიმართ მათი ურთიერთწინააღმდეგობათა მნიშვნელობები. ეს ხარისხი იცირდება დანარჩენ კვანძებში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების შედეგად;

4.  $f$  კვანძში ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდე, სხვა დანარჩენ პირობებში, გაიზრდება იმავე სიდიდით, რა სიდიდითაც გაიზრდება კვანძში რეაქტიული დატვირთვა;

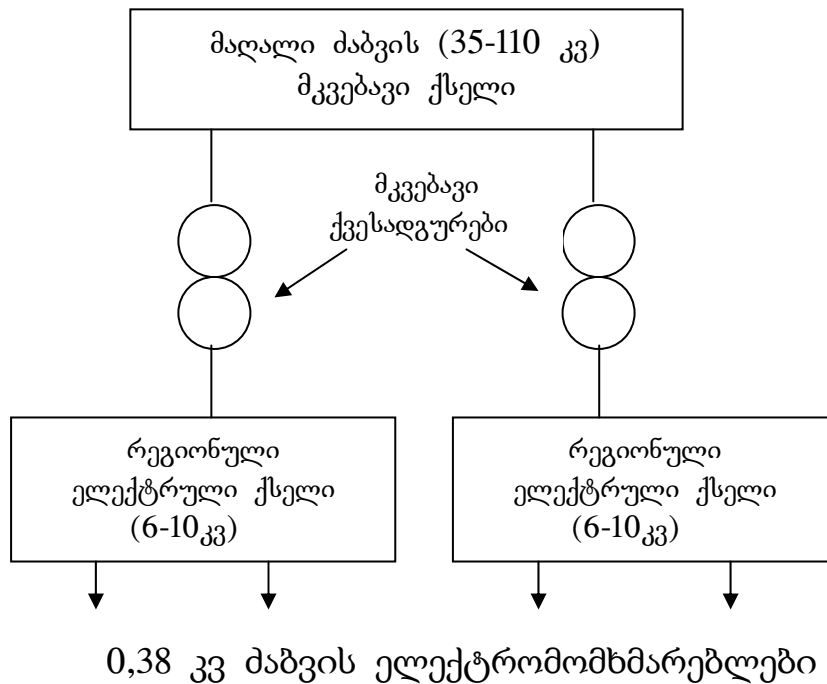
5.  $f$  კვანძში ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდე იცირდება ამ კვანძის საკუთარი წინააღმდეგობის გაზრდასთან ერთად

$$Q_{3f} = -Q_f + \frac{U_6^2}{2R_{ff}} \left[ a - \left(1 - \frac{\theta_o}{\text{tg}\varphi_o}\right) \cdot \sigma''_f \right]. \quad (5.23)$$



### 5.3 რეგიონულ ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია

რეგიონული ელექტრული ქსელი ემსახურება მაღალი ძაბვის (35-110კვ) მკვებავი ელექტრული ქსელიდან დაბალი ძაბვის (6-10 კვ) სატრანსფორმატორო ქვესადგურებამდე ელექტრული ენერჯის ტრანსპორტირებას (ნახ. 5.7)



ნახ. 5.7

სისტემური მიდგომის პრინციპის თანახმად ერთი რომელიმე რეგიონული ელექტრული ქსელის რეჟიმის ოპტიმიზაციის ესა თუ ის ამოცანა განხილული უნდა იქნეს ყველა რეგიონულ ელექტრულ ქსელებს შორის ელექტრული კავშირის ანუ ურთიერთგავლენის წინააღმდეგობით. როგორც ეს ადრე (თავი 4) აღვნიშნეთ, მოცემულ რეგიონულ ქსელში ზემოთ აღნიშნული ხასიათის ამოცანის ამოხსნისთვის ტერიტორიულად და ადმინისტრაციულად დაშორებული სხვა რეგიონული ქსელების შესახებ ყველა საწყისი სათანადო ხარისხის

ინფორმაციის მოპოვება ელექტრული სისტემის მასშტაბურობის გამო მოუხერხებელია და ზოგჯერ პრაქტიკულად შეუძლებელი. ამასთან განსახილველ რეგიონულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნისას სხვა რეგიონულ ქსელებში ანალოგიური ამოცანის ამოხსნის შედეგების გაუთვალისწინებლობა იწვევს ოპტიმალურთან შედარებით კომპენსაციის ხარისხის ამაღლებას (5.22).

როგორც ვიცით რეგიონულ ქსელებს შორის ურთიერთკავშირი ხორციელდება ამ ქსელების კვანძების დამაკავშირებელი იერარქიული ვერტიკალური სტრუქტურის ერთი დონით უფრო მაღალი ელექტრული ქსელის გავლით.

ზოგადად რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის (4.20) სახის განტოლებათა სისტემა 5.7 ნახაზზე წარმოდგენილი ელექტრული ქსელებისთვის შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_{\Delta j} \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=K+1}^n R_{ij} Q_{\Delta j} + \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j + \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=K+1}^n R_{ij} Q_j = a \quad (5.24)$$

აქ:  $i, j = 1, 2, \dots, K$  განსახილველი რეგიონული ქსელის (დაბალი ძაბვის მანაწილებელი ქსელის) კვანძების ნომრები, ამასთან  $K$  ამ ქსელის მაღალი ძაბვის ქსელთან მიერთების კვანძის ნომერი, ხოლო  $i, j = K + 1, K + 2, \dots, n$  მაღალი ძაბვის მკვებავი ქსელის კვანძების ნომრები.

ამ კვანძებთან მიერთებული დანარჩენი რეგიონული ქსელის ჯამური დატვირთვა განიხილება, როგორც ამ კვანძის ჯამური რეზულტიური დატვირთვა.

რეგიონული ქსელის მაღალი ძაბვის ქსელთან დამაკავშირებელი კვანძის ნომერი ავლნიშნოთ  $m$ - ით,  $m \in (K + 1, K + 2, \dots, n)$ .

მივიღოთ, რომ  $K + 1, K + 2 \dots n$  კვანძებში განხორციელებულია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია  $\beta_o = \frac{\theta_o}{tg\varphi_o}$  ხარისხით, მაშინ

(5.24) მიიღებს სახეს:

$$\frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_{\Delta j} + \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j + (1 - \beta_o) \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=K+1}^n R_{ij} Q_j = a \quad (5.25)$$

სიდიდე

$$\frac{2}{U_6^2} \sum_{j=K+1}^n R_{ij} Q_j = \sigma_K'' \quad (5.26)$$

წარმოადგენს დაბალი ქსელის განსახილველი რეგიონული მაღალი ძაბვის მკვებავ ქსელთან მიერთების  $K$  კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობით ნაზრდს, განპირობებულს მკვებავი ქსელის სხვა დანარჩენი ქსელების რეზულტიური დატვირთვებით, რომელიც შედარებით მარტივად დადგინდება მხოლოდ მკვებავი ქსელის პარამეტრების საშუალებით.

შესაბამისად გვაქვს:

$$\frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_{\Delta j} + \frac{2}{U_6^2} \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j + (1 - \beta_o) \sigma_K'' = a$$

ანუ

$$\sum_{j=1}^K R_{ij} Q_{\Delta j} = - \sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j - [(1 - \beta) \sigma_K'' - a] \frac{U_6^2}{2}. \quad (5.27)$$

მიღებული გამოსახულება წარმოადგენს განსახილველ რეგიონულ ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის გამარტივებულ მათემატიკურ მოდელს.



$\beta$  კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა სხვადასხვა სახასიათო პარამეტრების მქონე რეგიონული ქსელებისთვის, ზოგადად სხვადასხვა სიზუსტით შეგვიძლია დავადგინოთ 5.1 ცხრილის მიხედვით.

მაღალი ძაბვის მკვებავი ქსელის პარამეტრის საშუალებით განვსაზღვრავთ განსახილველი რეგიონული ქსელისათვის  $R_{K,K}$  საკუთარ წინალობას და შესაბამისად  $\sigma'$  -ს

$$\sigma' = \frac{2R_{K,K}Q_{K\Sigma}}{U_6^2}, \quad (5.28)$$

სადაც  $Q_{K\Sigma}$  - განსახილველ რეგიონული ქსელის ჯამური რეაქტიული დატვირთვა.

ამავე მაღალი ძაბვის მკვებავი ქსელის მონაცემების მიხედვით განვსაზღვრავთ  $\sigma_K$ -ს და შესაბამისად დავადგენთ

$$\sigma''_K = \sigma_K - \sigma'_K. \quad (5.29)$$

(5.27) განტოლებათა სისტემაში შემავალი  $R_{i,j}$  საკუთარი და ურთიერთ წინალობები გამოთვლილი უნდა იქნეს მაღალი ძაბვის მკვებავ ქსელში აღებული მაბალანსირებელი კვანძის მიმართ

$$R_{i,j} = R_{K,K} + R'_{i,j} \quad i, j = 1, 2, \dots, K \quad (5.30)$$

სადაც  $R'_{i,j}$  - დაბალი ძაბვის რეგიონული ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინალობა, გამოთვლილი  $K$  კვანძის მიმართ.

(5.27) გამარტივებული მათემატიკური მოდელი საშუალებას გვაძლევს საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტით ამოვხსნათ განსახილველ რეგიონულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა, ამოხსნისათვის საჭირო საწყისი არადეტერმინირებული ინფორმაციის პირობებშიც კი.

5.4. რიცხვითი მაგალითი (5.27) სახის მათემატიკური მოდელისადმი

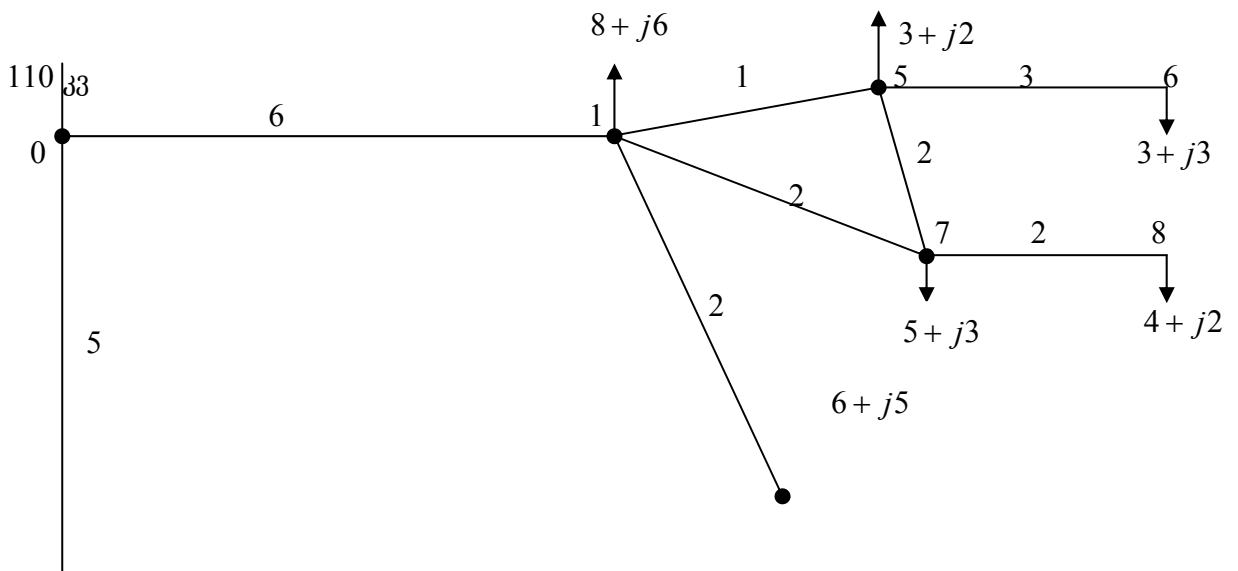
ქვემოთ 5.8 ნახაზზე მოცემული ელექტრული ქსელისთვის ამოვხსნათ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა სისტემური მიდგომის პრინციპითა და (5.27) გამოსახულების გამოყენების საფუძველზე. ჩავატაროთ შედარებითი ანალიზი.

მოცემული ელექტრული ქსელი შეიცავს 110 კვ ძაბვის მკვებავ ქსელს 0-1-2-3-4-0 შეკრული კონტურის სახით და 35 კვ ძაბვის ოთხ რეგიონულ ქსელს, რომლებიც მკვებავ ქსელთან მიერთებულნი არიან შესაბამისად “1”, “2” “3” და “4” კვანძებში.

ანგარიშების გამარტივების მიზნით რეგიონული ქსელების ელექტრული პარამეტრები ( $R$  აქტიური წინააღობები) დაყვანილია 110კვ ბაზისურ ძაბვაზე და ამიტომ ზემოთ აღნიშნული კვანძებში მადაბლებელი ტრანსფორმატორები ნაჩვენებია არ არის.

ნახაზზე კვანძებში ნაჩვენებია აქტიური და რეაქტიული დატვირთვები (მგვტ, მგვარ), ხოლო უბნებზე კი მათი აქტიური წინააღობები (ომი).

ქსელის ჯამური დატვირთვა  $\sum P = 88$  მგვტ და  $\sum Q = 57$  მგვარ. აქედან გამომდინარე  $\text{tg}\varphi_{\text{საშ.შეწ.}} = 0,648$ . მოცემული ქსელის კვანძების (მათი საერთო რაოდენობა შეადგენს 17-ს მბალანსირებელი კვანძის გარდა) საკუთარი და ურთიერ





ცხრ. 5.4. განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ეტაპები

კვანძის ნომერი	I ამოხსნა	II ამოხსნა	III ამოხსნა	IV ამოხსნა
1	-14.181	0	0	0
2	5.21	1.730	-0.409	0
3	2.994	-1.837	0	0
4	-16.2	0	0	0
5	2	-4.538	0	0
6	3.0	3.0	1.418	1.389
7	3.0	-0.269	0	0
8	2.0	2.0	0.657	0.615
9	3.0	3.0	3.0	2.841
10	2.0	2.0	2.0	2.
11	4.0	4.0	4.0	3.894
12	2.0	2.0	0.535	0.496
13	2.0	2.0	2.0	2.0
14	3.0	3.0	3.0	3.0
15	2.0	-1.626	0	0
16	3.0	-1.835	0	0
17	4.0	4.0	1.701	1.692

როგორც 5.4 ცხრილიდან ჩანს 17 განტოლებიანი სისტემის ამოხსნამ მოითხოვა ოთხი ეტაპი. მაკომპენსირებელი დანადგარების ჯამური სიმძლავრე შეადგენს  $\sum Q_j = 17,93$  მგვარ. ე.ი. ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი (5.11)

$$\beta = \frac{17,93}{57} = 0,315$$

ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოვთვალეთ (2.37) და (2.38) ფორმულებით მივიღეთ

$$\Delta P_p = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^{17} \sigma_{f(p)} P_f = 2,014 \text{ მგვტ}$$

და

$$\Delta P_{\varrho} = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^{17} \sigma_{f(\varrho)} Q_f = 0,840 \text{ მგვტ.}$$

ე.ი ჯამური კარგვები ქსელში შეადგენს

$$\Delta P = 2,854 \text{ მგვტ}$$

ანუ პროცენტებში

$$\Delta P \% = \frac{2.854}{88} \cdot 100 = 3,243.$$

რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი გამოვთვალოთ (5.10) გამოსახულების მიხედვით, გვაქვს

$$\beta = 1 + \frac{50 \cdot (-2 \cdot 10^{-2}) (1 + 0,648^2)}{0,648 \cdot 3,243} = 0,324.$$

როგორც ვხედავთ კომპენსაციის ხარისხი, გამოთვლილი ზუსტი (5.11) და ეკვივალენტირების (5.10) მეთოდებით, პრაქტიკულად ერთნაირია (განსხვავება შეადგენს  $\approx 2,78\%$ -ს)

რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნა ჩავატაროთ მოცემული ქსელის ცალკეული რეგიონების მიხედვით (5.27) მათემატიკური მოდელის გამოყენებით. ამ მოდელის გამოყენებისას ცალკეული რეგიონებისთვის წინასწარ შევარჩიოთ  $\beta_0$ .

მრავალრიცხოვანი ანგარიშები გვიჩვენებს, რომ ამ კოეფიციენტის მნიშვნელობა მახალანსირებელ კვანძთან ელექტრულად ახლომდებარე რეგიონისთვის მაღალია, ხოლო შორსმდებარესთვის კი – დაბალი.

აქ ჩატარებულმა ანგარიშმა გვიჩვენა, რომ მთელი ქსელისთვის  $\beta$  კოეფიციენტის საშუალო შეწონილი მნიშვნელობა შეადგენს 0,315-ს, აქედან გამომდინარე მოცემული ქსელის “1» და “4” რეგიონებისთვის  $\beta$ . ავიღოთ 0,45-0,50 ფარგლებში, ხოლო “2” და “3” რეგიონებისთვის კი 0,25-0,30 ფარგლებში.

**რეგიონი “1”**

$\sigma_1$  განვსაზღვროთ (5.29) და (5.28) გამოსახულების მიხედვით

$$\sigma_1'' = \sigma_1 - \sigma_1' = -2,762 \cdot 10^{-2} - \frac{2 \cdot 4,2(-16)}{12100} = -1,651 \cdot 10^{-2}$$

(5.27) გამოსახულების თანახმად

$$[(1 - \beta)\sigma_{11}'' - a] \frac{U_6^2}{2} = [(1 - 0,48)(-1,651 \cdot 10^{-2}) + 2 \cdot 10^{-2}] \cdot \frac{12100}{2} = 69,06$$

(5.27) და (5.30) გამოსახულებათა გათვალისწინებით შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა.

$$\begin{aligned} 4.2Q_{\delta 1} + 4.2Q_{\delta 5} + 4.2Q_{\delta 6} + 4.2Q_{\delta 7} + 4.2Q_{\delta 8} &= 1.86 \\ 4.2Q_{\delta 1} + 5.0Q_{\delta 5} + 5.0Q_{\delta 6} + 4.6Q_{\delta 7} + 4.6Q_{\delta 8} &= 4.14 \\ 4.2Q_{\delta 1} + 5.0Q_{\delta 5} + 8.0Q_{\delta 6} + 4.6Q_{\delta 7} + 4.6Q_{\delta 8} &= 13.14 \\ 4.2Q_{\delta 1} + 4.6Q_{\delta 5} + 4.6Q_{\delta 6} + 5.4Q_{\delta 7} + 5.4Q_{\delta 8} &= 6.14 \\ 4.2Q_{\delta 1} + 4.6Q_{\delta 5} + 4.6Q_{\delta 6} + 5.4Q_{\delta 7} + 7.4Q_{\delta 8} &= 10.14 \end{aligned}$$

ამოხსნის შემდეგ მივიღებთ;

$$Q_{\delta 1} = 0; \quad Q_{\delta 5} = 0; \quad Q_{\delta 6} = 1,331; \quad Q_{\delta 7} = 0 \quad Q_{\delta 8} = 0,543;$$

**რეგიონი “2”**

$$\sigma_2'' = -3.154 \cdot 10^{-2} - \frac{2 \cdot 4.8(-14)}{12100} = -2.04 \cdot 10^{-2}$$

$$[(1 - \beta_0)\sigma_{22}'' - a] \frac{U_6^2}{2} = [(1 - 0.25)(-2.04 \cdot 10^{-2}) + 2 \cdot 10^{-2}] \cdot \frac{12100}{2} = 28.44$$

განტოლებათა სისტემას აქვს სახე

$$\begin{aligned} 4.8Q_{\delta 2} + 4.8Q_{\delta 9} + 4.8Q_{\delta 10} + 4.8Q_{\delta 11} &= 38.76 \\ 4.8Q_{\delta 2} + 6.4Q_{\delta 9} + 6.0Q_{\delta 10} + 5.4Q_{\delta 11} &= 48.36 \\ 4.8Q_{\delta 2} + 6.0Q_{\delta 9} + 7.2Q_{\delta 10} + 6.0Q_{\delta 11} &= 51.96 \\ 4.8Q_{\delta 2} + 5.4Q_{\delta 9} + 6.0Q_{\delta 10} + 6.9Q_{\delta 11} &= 51.36 \end{aligned}$$

ამოხსნის შედეგად მივიღებთ

$$Q_{\delta 2} = 0; \quad Q_{\delta 9} = 2.59; \quad Q_{\delta 10} = 2.01; \quad Q_{\delta 11} = 3.70$$

## რეგიონი “3”

$$\sigma_3'' = -3.012 \cdot 10^{-2} - \frac{2 \cdot 4.8 \cdot (-10)}{12100} = -2.219 \cdot 10^{-2}$$

$$[(1 - \beta)\sigma_3'' - a] \frac{U_6^2}{2} = [(1 - 0.28) \cdot (-2.219 \cdot 10^{-2}) + 2 \cdot 10^{-2}] \frac{12100}{2} = 24.34$$

განტოლებათა სისტემა

$$4.8Q_{k3} + 4.8Q_{k12} + 4.8Q_{k13} + 4.8Q_{k14} = 23.66$$

$$4.8Q_{k3} + 6.8Q_{k12} + 6.8Q_{k13} + 6.8Q_{k14} = 37.66$$

$$4.8Q_{k3} + 6.8Q_{k12} + 8.8Q_{k13} + 6.8Q_{k14} = 41.66$$

$$4.8Q_{k3} + 6.8Q_{k12} + 6.8Q_{k13} + 9.8Q_{k14} = 46.66$$

ამოხსნის შედეგად მივიღებთ

$$Q_{k3} = 0; \quad Q_{k12} = 0.54 \quad Q_{k13} = 2.0 \quad Q_{k14} = 3.0$$

## რეგიონი “4”

$$\sigma_{44}'' = -2.409 \cdot 10^{-2} - \frac{2 \cdot 3.75 \cdot (-17)}{12100} = -1.355 \cdot 10^{-2}$$

$$[(1 - \beta)\sigma_{44}'' - a] \frac{U_\sigma^2}{2} = [(1 - 0.45)(-1.355) \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}] \frac{12100}{2} = 75.9$$

განტოლებათა სისტემა

$$3.75Q_{k4} + 3.75Q_{k15} + 3.75Q_{k16} + 3.75Q_{k17} = -12.15$$

$$3.75Q_{k4} + 6.15Q_{k15} + 4.95Q_{k16} + 6.15Q_{k17} = 5.85$$

$$3.75Q_{k4} + 4.95Q_{k15} + 5.85Q_{k16} + 4.95Q_{k17} = 1.35$$

$$3.75Q_{k4} + 6.15Q_{k15} + 4.95Q_{k16} + 8.15Q_{k17} = 13.85$$

ამოხსნის შედეგად მივიღებთ

$$Q_{k4} = 0 \quad Q_{k15} = 0 \quad Q_{k16} = 0 \quad Q_{k17} = 1.70.$$

ზუსტი და გამარტივებული მეთოდებით მიღებული ამოხსნის შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.5.5)

ცხრ. 5.5. შედარებითი ანალიზის ცხრილი

კვანძი		6	8	9	10	11	12	13	14	17
ამონახსნი	ზუსტი მეთოდით	1.389	0.615	2.841	2.0	3.894	0.496	2.0	3.0	1.692
	გამარტივებული მეთოდით	1.331	0.543	2.59	2.01	3.70	0.54	2.0	3.0	1.70

მიღებული შედეგის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ გამარტივებული მეთოდით ამონახსნის შედეგები საკმარისი სიზუსტით უახლოვდება ზუსტ ამონახსნს, მაგრამ ეს მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მოცემული რეგიონისთვის  $\beta$  კოეფიციენტის შერჩევაზე.

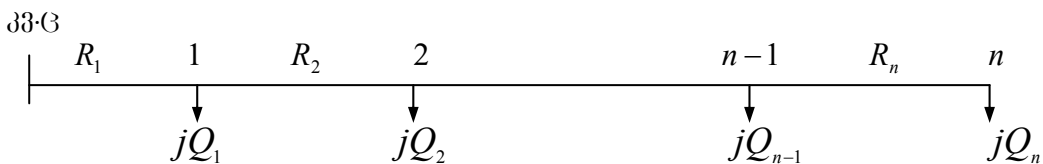
5.5 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში

საშუალო და დაბალი ძაბვის (6-35 კვ) მომხმარებელთა კვების

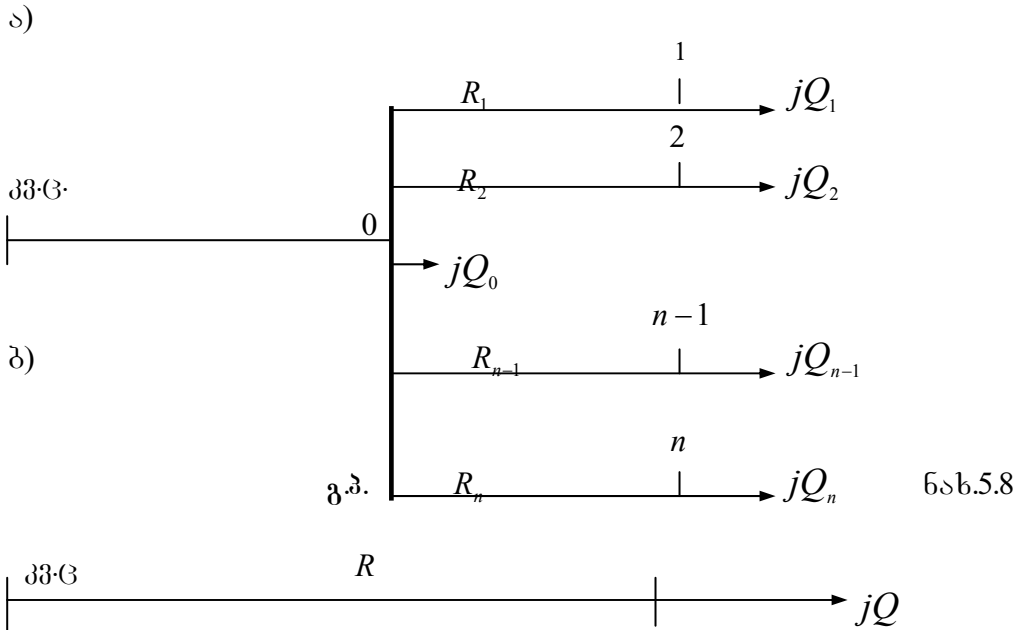
ელექტროქსელებში ფართოდ არის გავრცელებული მაგისტრალური

(ნახ. 5.8 ა)

და რადიალური (ნახ. 5.8 ბ) შეერთების სქემები







ნახ.5.9

ერთუბნიან მაგისტრალურ ქსელში (ნახ.5.9) აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის მეთოდის გამოყენებით, რეაქტიული დატვირთვის

ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდე განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$Q_{\beta} = -Q \left( 1 - \frac{a}{\sigma} \right)$$

ამ გამოსახულების თანახმად, რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად მიზანშეწონილია, თუ  $|\sigma| > |a|$  და ამასთან კომპენსაციის დონე

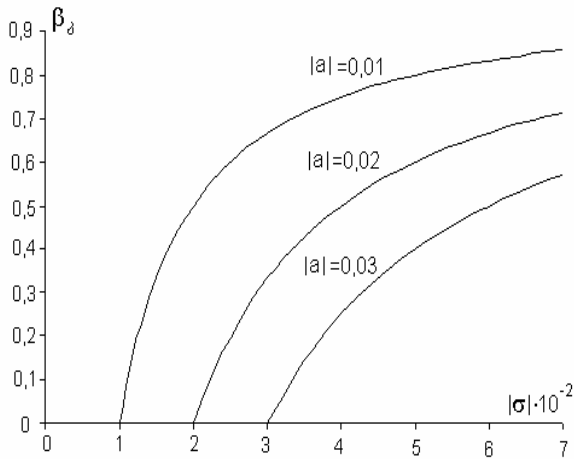
$$\beta_{\beta} = \frac{Q_{\beta}}{-Q} = \left( 1 - \frac{a}{\sigma} \right) \leq 1 \tag{5.31}$$

მით მაღალია, რაც დიდია დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის

ცხრ. 5.6.  $\beta_{\beta}$ -ს მნიშვნელობები

$\sigma$ a	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04
0,01	0	0,50	0,67	0,75	0,80	0,83	0,86
0,02	-	0	0,33	0,50	0,60	0,67	0,71
0,03	-	-	0	0,25	0,40	0,50	0,57

აბსოლუტური სიდიდე (ნახ. 5.10)



ნახ. 5.10

ნახ. 5.10

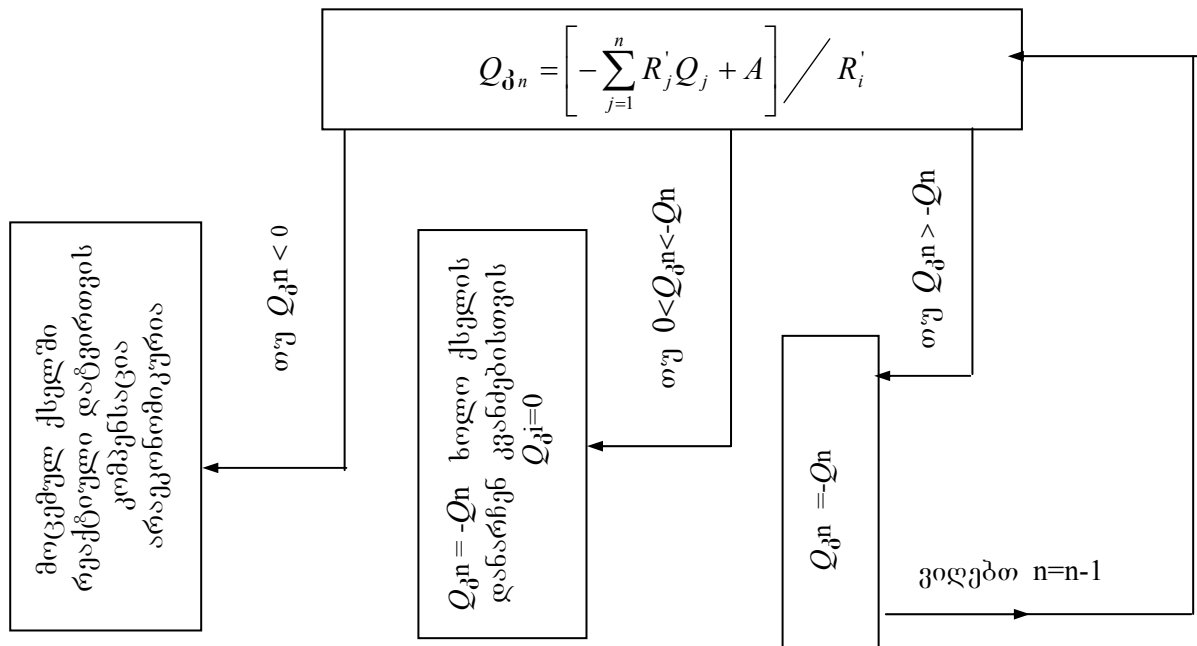
მრავალუბნიან მაგისტრალურ ქსელში (ნახ. 5.8 ა) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გზით აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის შედეგების ანალიზის საფუძველზე მივიღეთ, რომ თუ მაგისტრალის რომელიმე  $i$ -ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად მიზანშეწონილია  $0 < Q_{\delta i} < Q_i$  მაშინ  $j < i$  კვანძებისთვის  $Q_{\delta j} = 0$ , ხოლო  $j > i$  კვანძებისთვის  $Q_{\delta j} = -Q_j$  და ამასთან  $Q_{\delta i}$  იანგარიშება ფორმულით

$$Q_{\delta i} = \left[ -\sum_{j=1}^i R'_j Q_j + A \right] / R'_i, \quad (5.32)$$

სადაც  $A = \frac{aU_6^2}{2}$ ;  $R'_j = \sum_{k=1}^j R_k$  - უბნების წინალობათა ჯამი კვების

ცენტრიდან  $j$ -ურ კვანძამდე;  $R'_i = \sum_{k=1}^i R_k$  - იგივე  $i$ -ურ კვანძამდე.

მაგისტრალურ ქსელში ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის ბლოკ-სქემას აქვს ნახ.5.11-ზე ნაჩვენები სახე:



ნახ. 5.11

(5.32) გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მაგისტრალური ქსელის  $i$ -ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად მიზანშეწონილია ( $Q_{ik} > 0$ ) თუ სრულდება პირობა

$$\left| \sum_{j=1}^i R'_j Q_j \right| > |A|. \quad (5.33)$$

ამრიგად, მაგისტრალურ ქსელში ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის დროს  $i = 1, 2, \dots, n$  კვანძებისთვის უნდა შევაფასოთ სიდიდე  $\sum_{j=1}^i R'_j Q_j$ . თუ (5.33) პირობა დარღვეულია, მაშინ  $Q_{ik}$  უნდა გამოვთვალოთ (5.32) გამოსახულებით და დანარჩენი  $K > i$  კვანძებისთვის გვექნება  $Q_{ik} = -Q_k$ .

რადიალურ ქსელში (ნახ. 5.8 ბ) ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის დროს, პირველ რიგში, უნდა შევაფასოთ სიდიდე

$$Q_{k0} = -Q_0 + \frac{A}{R_0}. \quad (5.34)$$

თუ  $Q_{\delta 0} > 0$ , მაშინ ყველა  $Q_{\delta i} = -Q_i$  ხოლო თუ  $Q_{\delta 0} < 0$ , მაშინ ვიღებთ  $Q_{\delta 0} = 0$  და დანარჩენი კვანძებისთვის გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა

$$R_0 \sum_{j=1}^n Q_{\delta j} + R_i \cdot Q_{i\delta} = -R_0 \sum_{j=0}^n Q_j - R_i \cdot Q_i + A \quad i=1, 2 \dots n \quad (5.35)$$

ამ გამოსახულების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. რომელიმე  $f$ -ური კვანძის ელექტრული დაშორების უსასრულოდ გაზრდის შემთხვევაში ( $R_f \rightarrow \infty$ ) გვექნება

$$Q_{f k} = -Q_f$$

ე.ი. მოცემული კვანძი ელექტრულად რაც უფრო შორსაა მანაწილებელი პუნქტიდან, მით მაღალია კომპენსაციის დონე  $\beta_f$ . ხოლო სხვა კვანძებში, ბუნებრივია რომ კომპენსაციის დონე  $\beta_i$  მცირდება.

2. როცა  $f$  კვანძის ელექტრული დაშორება სხვა კვანძების ელექტრულ დასორებასთან შედარებით მნიშვნელოვნად მცირეა, მაშინ მანაწილებელი პუნქტი შეიძლება განვიხილოთ როგორც  $Q_0 + Q_f$  ჯამური რეაქტიული დატვირთვის მქონე პუნქტი და უნდა შევავასოთ სიდიდე

$$Q_{\delta 0} = -(Q_0 + Q_f) + \frac{A}{R_0} \quad (5.36)$$

თუ მივიღებთ, რომ  $Q_{\delta 0} > 0$ , მაშინ დანარჩენ  $i \neq f$  კვანძებისთვის გვაქვს  $Q_{\delta i} = -Q_i$ , წინააღმდეგ შემთხვევაში ვიღებთ  $Q_{\delta 0} = Q_{\delta f} = 0$  და დანარჩენი  $i \neq f$  კვანძებისთვის ჩაწერილ (5.35) სახის განტოლებათა სისტემის მარცხენა

მხრიდან ამოვარდება  $f$  სტრიქონი და  $f$  კვანძი, ხოლო მარჯვენა მხრიდან კი  $f$  სტრიქონი|

3. იმ შემთხვევაში, როცა  $R_0 \rightarrow 0$ , ვღებულობთ

$$Q_{j,i} = -Q_i + \frac{A}{R_i} \quad (5.37)$$

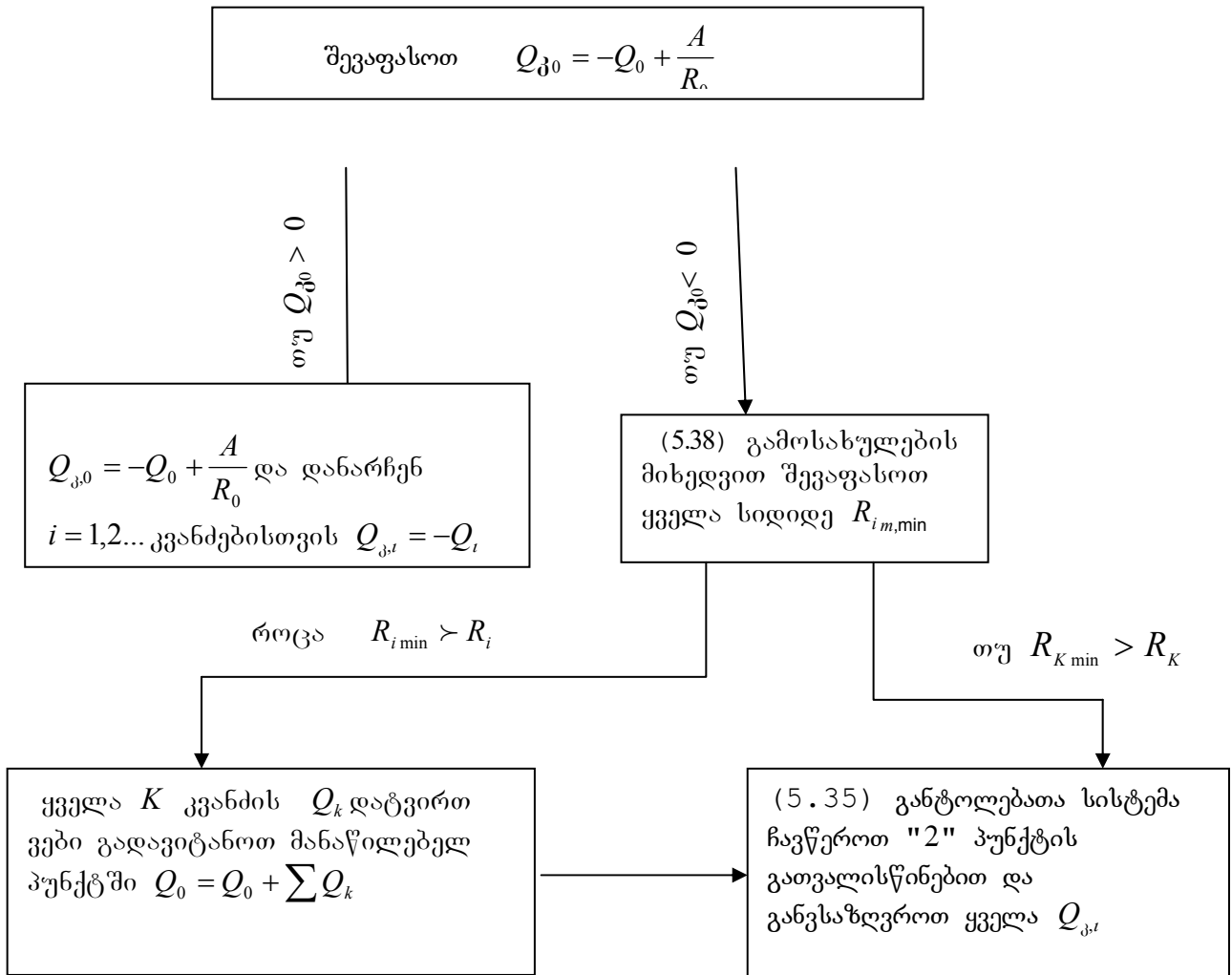
ე. ი. ამ შემთხვევაში  $i$ -ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდე არ არის დამოკიდებული  $j \neq i$  კვანძების რეაქტიული დატვირთვის მნიშვნელობაზე.

ყოველი  $i$ -ური რადიალური უბნისთვის არსებობს წინააღობის მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც  $Q_{j,i} = 0$ . (5.35) გამოსახულებიდან ვღებულობთ

$$R_{i, \min} = - \left[ \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{1}{R_k} \right]^{-1} \left( 1 + \frac{Q_0}{Q_i} - \frac{A}{R_0 Q_i} \right). \quad (5.38)$$

მაშასადამე, რადიალურ ქსელში ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის პროცესში ჯერ ყველა  $i$ -ური რადიალური უბნისთვის დავადგენთ წინააღობის მინიმალურ მნიშვნელობას და თუ  $R_i < R_{i, \min}$ , მაშინ ეს უბანი ამოღებული იქნება გაანგარიშებიდან და დატვირთვა  $Q_i$  განიხილება  $Q_0$  დატვირთვასთან ერთად ჯამში. შევაფასებთ  $Q_{j,0}$ -ს (5.36) გამოსახულების მიხედვით და შემდგომ გამოთვლებს ჩავატარებთ "2" პუნქტში ჩამოყალიბებული დასკვნის შესაბამისად.

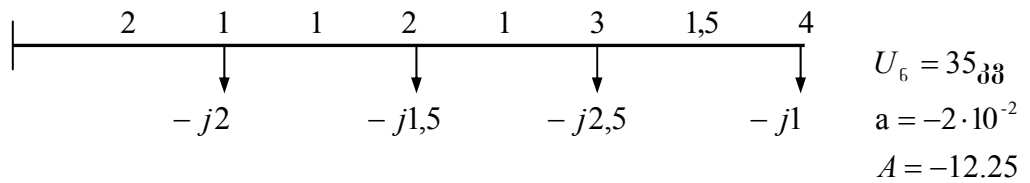
რადიალურ ქსელში ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის ბლოკ-სქემას აქვს ნახ. 5.12-ზე ნაჩვენები სახე.



განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითები.

მაგალითი 1. ამოვხსნათ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა ნახ. 5.13-ზე თუ მოცემული მაგისტრალური ქსელისთვის.

უბნების აქტიური წინაღობები მოცემულია ომებში, ხოლო კვანძების რეაქტიული დატვირთვები –მგვარ-ებში.



ნახ.5.13

ამოხსნა: 1 შევაფასოთ (5.33) უტოლობა კვანძებისათვის

$$i = 1 \quad \sum_{j=1}^i R'_j Q_j = 2(-2) = -4 > -12,25 \Rightarrow Q_{\alpha 1} = 0;$$

$$i = 2 \quad \sum_{j=1}^i R'_j Q_j = 2(-2) + 3(-1,5) = -8,5 > -12,25 \Rightarrow Q_{\alpha 2} = 0;$$

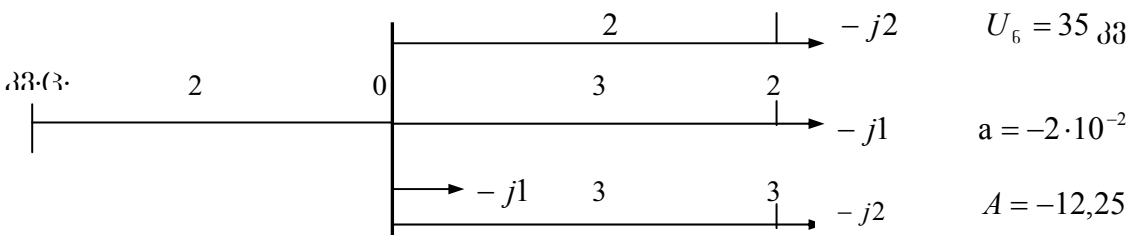
$$i = 3 \quad \sum_{j=1}^i R'_j Q_j = -8,5 + 4(-2,5) = -18,5 < -12,25 \Rightarrow Q_{\alpha 3} > 0.$$

2. განვსაზღვროთ  $Q_{\alpha 3}$  (გამოსახულება 5.32)

$$Q_{\alpha 3} = -\frac{-18,5 + 12,25}{4} = 1,563 \text{ მგვარ}$$

3.  $K > 3$  კვანძებისთვის გვაქვს  $Q_{\alpha 4} = -Q_4 = 1$  მგვარ.

მაგალითი 2. ამოვხსნათ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა ნახ.5.14-ზე მოცემული რადიალური ქსელისათვის



ნახ 5.14

ამოხსნა: 1 შევაფასოთ  $Q_{\alpha 0}$  (ფორმულა 5.34)

$$Q_{\alpha 0} = 1 - \frac{12,25}{2} = -5,125 < 0 \Rightarrow Q_{\alpha 0} = 0$$

შევაფასოთ უბანთა წინაღობები (გამოსახულება 5.38)

$$R_{1, \min} = -\frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{-1}{-2} + \frac{12,25}{2(-2)} \right) = 1,34 < R_1 \Rightarrow Q_{\beta 1} > 0;$$

$$R_{2, \min} = -\frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{-1}{-1} + \frac{12,25}{2(-1)} \right) = 3,09 > R_2 \Rightarrow Q_{\beta 2} = 0;$$

$$R_{3, \min} = -\frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{-1}{-2} + \frac{12,25}{2(-2)} \right) = 1,17 < R_3 \Rightarrow Q_{\beta 3} > 0$$

2. შევაფასოთ  $Q_{\beta 0}$  (გამოსახულება 5.36)

$$Q_{\beta 0} = 3 - \frac{12,25}{2} < 0$$

3. განვსაზღვროთ  $Q_{\beta 1}$  და  $Q_{\beta 3}$  (5.35) სახის განტოლებათა სისტემიდან

$$\begin{aligned} 2(Q_{\beta 1} + Q_{\beta 3}) + 2Q_{\beta 1} &= 12 + 4 - \frac{12,25}{2} \\ 2(Q_{\beta 1} + Q_{\beta 3}) + 3Q_{\beta 3} + 12 + 6 - \frac{12,25}{2} & \end{aligned}$$

აქედან ვღებულობთ

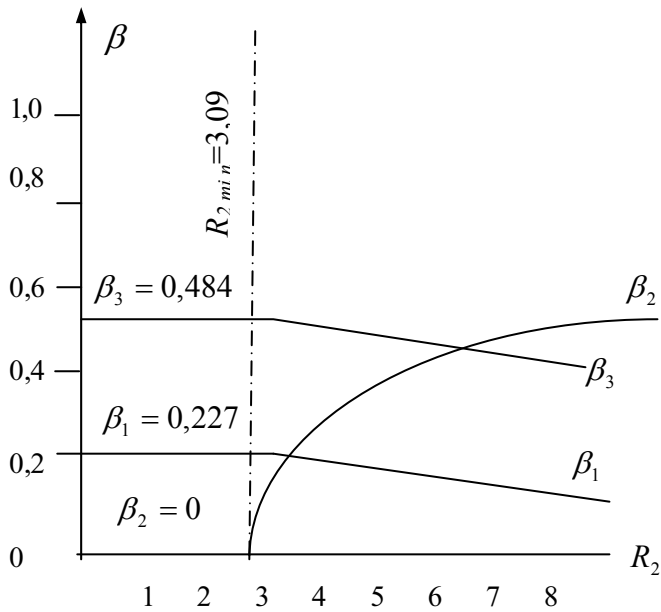
$$Q_{\beta 1} = 0,453 \text{ მგვარ, } Q_{\beta 3} = 0,969 \text{ მგვარ}$$

მოცემული მაგალითისთვის დავადგინოთ კომპენსაციის დონის  $\beta_{\beta 1}$  ცვლილების ხასიათი  $R_2$  წინაღობის გაზრდასთან დაკავშირებით (გამოსახულება 5.35) ანგარიშის შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ. 5.6) და გრაფიკულად (ნახ 5.15)

ცხრ. 5.7

$R_2$	$\beta_{\beta 1}$	$\beta_{\beta 2}$	$\beta_{\beta 3}$
3	0,227	0	0,484
4	0,191	0,191	0,461
5	0,164	0,332	0,443
8	0,122	0,561	0,414
20	0,074	0,815	0,388
$\infty$	0,039	1,0	0,359



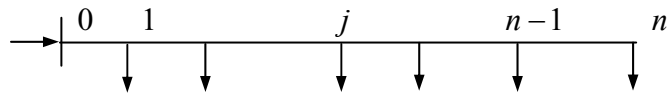


ნახ. 5.15

5.6 დატვირთვის გადატანა და კომპენსაციის ხარისხი

მაგისტრალურ ელექტრულ ქსელში (ნახ. 5.16) ბოლო  $n$  კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი განისაზღვრება ფორმულით

$$\sigma_n = \frac{2}{U_6^2} \sum_{i=1}^n R_{in} Q_i$$



ნახ.5.16

სადაც  $i$  და  $n$  კვანძების ურთიერთწინალობა  $R_{in}$  რიცხობრივად მახალანსირებელი 0 კვანძიდან  $i$  კვანძამდე უბნების წინალობათა ჯამის ტოლია

$$R_{in} = \sum_{K=1}^i R_K$$

რომელიმე  $j$  კვანძის  $Q_j$  დატვირთვის გავლენა  $\sigma_n$  სიდიდეზე გამოსახება

$$\sigma_{jn} = \frac{2}{U_6^2} R_{jn} Q_j \quad (5.39)$$

შესაკრების სახით. ამ გამოსახულების თანახმად,  $j$  კვანძი  $n$  კვანძთან ელექტრულად რაც უფრო ახლოს მდებარეობს მით მეტია  $\sigma_n$  და შესაბამისად, უფრო მაღალია ქსელში მოსალოდნელი ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხი.

ელექტრული ქსელების რეჟიმების ანგარიშების გამარტივების ერთერთ ხერხს წარმოადგენს დატვირთვების გადატანის ფართოდ ცნობილი მეთოდი, რომლის თანახმად  $j$  კვანძიდან  $n$  კვანძში გადატანილი სიმძლავრე

$$Q_{j \rightarrow n} = Q_j \frac{R_{jn}}{R_{mn}}. \quad (5.39)$$

ამ შემთხვევაში  $\sigma_n$ -ს გამოსახულებაში (5.39) სახის შესაკრების ნაცვლად გაჩნდება დამატებითი შესაკრები

$$\sigma_{jn} = \frac{2}{U_6^2} \cdot R_{mn} \cdot Q_{j \rightarrow n} = \frac{2}{U_6^2} R_{mn} \cdot Q_j \frac{R_{jn}}{R_{mn}} = \sigma_{jn} \quad (5.40)$$

რაც რიცხობრივად იგივეა, რაც (5.39).

მაშასადამე, შუალედური კვანძიდან მაგისტრალის ბოლოებში დატვირთვის გადატანისას მაგისტრალის ბოლო კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი სიდიდით იგივეა რჩება.

მაგისტრალის ბოლოში  $Q_j$  დატვირთვის გადატანამდე მაგისტრალის  $f < n$  კვანძების მიმართ დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის შესაბამის შემდგენს წარმოადგენს შესაკრები

$$\sigma_{jf} = \frac{2}{U_6^2} R_{jf} Q_j \quad (5.41)$$

ხოლო გადატანის შემდეგ კი –დამატებითი შემდგენი

$$\sigma_{jf} = \frac{2}{U_6^2} R_{jf} Q_{j \rightarrow n} = \frac{2}{U_6^2} R_{jf} Q_j \frac{R_{jn}}{R_{nm}} < b_{jf}. \quad (5.42)$$

(5.40) და (5.42) გამოსახულებათა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მაგისტრალის ნებისმიერი კვანძის დატვირთვის მაგისტრალის ბოლოში გადატანისას აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის შესაბამისი შემდგენი ბოლო კვანძის მიმართ უცვლელი რჩება, ხოლო დანარჩენი კვანძების მიმართ კი იცვლება და ეს ცვლილება  $R_{jn}/R_{nm}$  ფარდობის პროპორციულია

$$\frac{b'_{jf}}{b_{jf}} = \frac{R_{jn}}{R_{nm}}.$$

(5.43)

(5.42) გამოსახულების გათვალისწინებით  $f$  კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის საანგარიშო გამოსახულებას ექნება სახე.

$$\sigma'_f = \frac{2}{U_6^2} \sum_{i=1}^n R_{if} Q_i - \left( \frac{2}{U_6^2} R_{jf} Q_j - \frac{2}{U_6^2} R_{jf} Q_j \frac{R_{jn}}{R_{nm}} \right)$$

ანუ

$$\sigma'_f = \frac{2}{U_6^2} \left[ \sum_{i=1}^n R_{if} Q_i - R_{jf} Q_j \left( 1 - \frac{R_{jn}}{R_{nm}} \right) \right]. \quad (5.44)$$

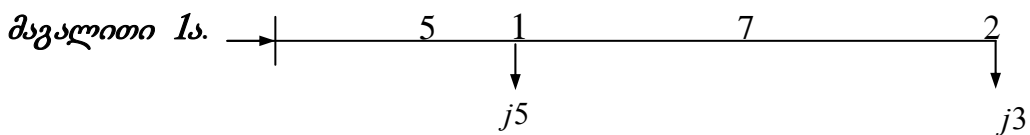
მაგისტრალური ქსელებისთვის (5.44) გამოსახულების საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა.

1. თუ  $f \neq n$  კვანძებისთვის მოსალოდნელი არ არის რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია, მაშინ ქსელში რეაქტიული

დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი ერთიდაიგივე იქნება დატვირთვების გადატანამდე და გადატანის შემდეგ;

2. თუ ქსელის  $f \neq n$  კვანძებში ეკონომიკურად მიზანშეწონილია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია, მაშინ დატვირთვების გადატანის შემდეგ კომპენსაციის ხარისხი რამდენამდე მცირდება და თანაც ეს შემცირება მით ნაკლებია, რაც ნაკლები რაოდენობის  $f \neq n$  კვანძებისთვის იქნება რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ეკონომიკური მიზანშეწონილობა;
3. “2” პუნქტში აღნიშნულ შემთხვევაში დატვირთვის გადატანისას კომპენსაციის ხარისხის შემცირება მით ნაკლები იქნება, რაც უფრო ელექტრულად ახლოსაა კვანძი, საიდანაც გადადის დატვირთვა, იმ კვანძთან შედარებით, სადაც გადადის აღნიშნული დატვირთვა.

განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითები (ამ მაგალითებში მიღებულია  $U_6 = 35$  კვ და  $a = -3 \cdot 10^{-2}$  კვტ/კვარ

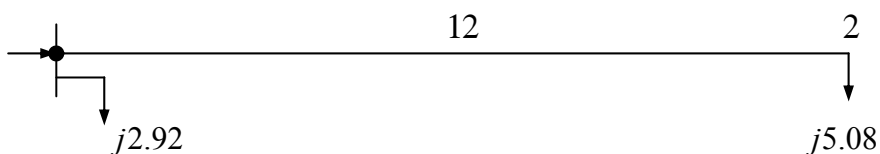


დატვირთვის გადატანამდე კომპენსაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემას აქვს სახე

$$\left. \begin{aligned} 5Q_{j1} + 5Q_{j2} &= 21.625 \\ 5Q_{j1} + 12Q_{j2} &= 32.625 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_{k2} = 3 : Q_{k1} = 1.325$$

$$\sum Q_k = 4.325$$

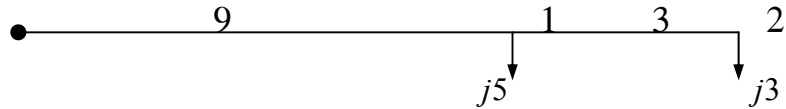
დატვირთვის გადატანის შემდეგ  $Q_{1 \rightarrow 2} = 5 \cdot \frac{5}{12} = 2.08$



$$Q_{\delta} = 5.08 - \frac{aU_6^2}{2 \cdot R_{22}} = 3.55.$$

როგორც ვხედავთ, კომპენსაციის ხარისხი დატვირთვის გადატანამდე შეადგენს  $\beta = 4.325/8 = 0.54$ -ს ხოლო გადატანის შემდეგ კი -  $\beta' = 3.55/8 = 0.44$  -ს

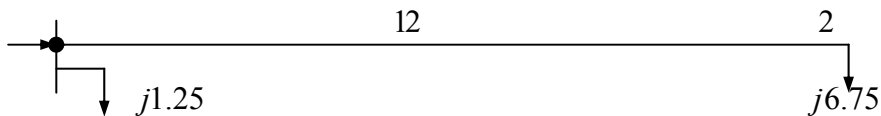
**მაგალითი 1ბ.**



დატვირთვის გადატანამდე

$$\left. \begin{aligned} 9Q_{\delta 1} + 9Q_{\delta 2} &= 53.625 \\ 9Q_{\delta 1} &= 12Q_{\delta 2} = 62.625 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Q_{k2} &= 3 : Q_{k1} = 2.958 \\ \sum Q_k &= 5.958 \Rightarrow \beta = 0.745 \end{aligned}$$

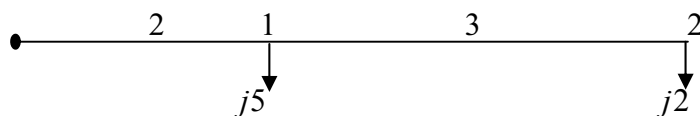
დატვირთვის გადატანის შემდეგ  $Q_{1 \rightarrow 2} = 5 \cdot \frac{9}{12} = 3.75$



$$Q_{\delta} = 6.75 - \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 1225}{2 \cdot 12} = 5.219 \Rightarrow \beta' = 0.652$$

ამრიგად პირველ შემთხვევაში, როცა გადასატანი დატვირთვის კვანძი ელექტრულად შედარებით შორსაა იმ კვანძიდან, სადაც გადადის დატვირთვა (მაგალითი 1ა) კომპენსაციის ხარისხი 54%-დან შემცირდა 44%-მდე ანუ 18.5% -ით, მეორე შემთხვევაში კი, როცა გადასატანი დატვირთვა ელექტრულად უფრო ახლოსაა-კომპენსაციის ხარისხი 74.5%-დან შემცირდა 65.2%-მდე ანუ 12.5%-ით.

**მაგალითი 2ა**

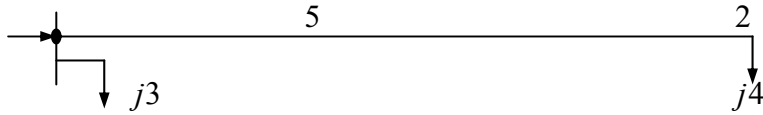


დატვირთვის გადატანამდე

$$\left. \begin{aligned} 2Q_{\delta 1} + 2Q_{\delta 2} &= -4.375 \\ 2Q_{\delta 1} + 5Q_{\delta 2} &= 1.625 \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow Q_{k1} = 0; Q_{k2} = 0.325$$

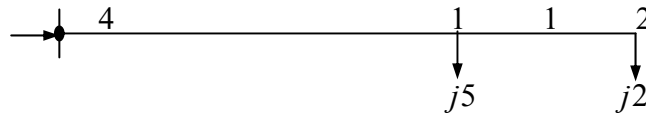
დატვირთვის გადატანის შემდეგ  $Q_{1 \rightarrow 2} = 5 \cdot \frac{2}{5} = 2$



$$Q_{\delta} = 4 - \frac{aU_6^2}{2 \cdot R_{22}} = 0.325.$$

როგორც ვხედავთ კომპენსაციის ხარისხი არ შეიცვალა, რადგანაც “1” კვანძში კომპენსაცია მოსალოდნელი არ იყო.

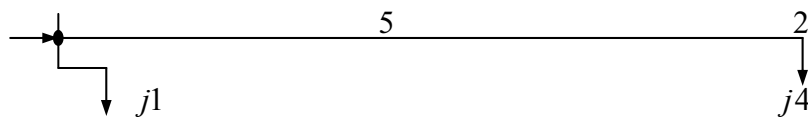
მაგალითი 2ბ.



დატვირთვის გადატანამდე

$$\left. \begin{aligned} 4Q_{\delta 1} + 4Q_{\delta 2} &= 9.625 \\ 4Q_{\delta 1} + 5Q_{\delta 2} &= 11.625 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} Q_{k2} &= 2; \quad Q_{k1} = 0.406 \\ \sum Q_k &= 2.406 \Rightarrow \beta = 0.344 \end{aligned}$$

დატვირთვის გადატანის შემდეგ  $Q_{1 \rightarrow 2} = 5 \cdot \frac{4}{5} = 4$



$$Q_{\delta} = 6 - \frac{aU_6^2}{2 \cdot R_{22}} = 2.35 \Rightarrow \beta' = 0.332$$

განხილული რიცხვითი მაგალითების შედეგები ამტკიცებს დატვირთვის გადატანის შედეგად კომპენსაციის ხარისხის შეცვლის ამ პარაგრაფში გაკეთებული დასკვნების ჭეშმარიტებას.

## 5.7 ოპტიმალური კომპენსაციის განტოლებათ სისტემის იტერაციული ამოხსნა

სისტემური მიდგომის პრინციპის დაცვის პირობებში ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის განტოლებათა სისტემას აქვს (4.20)-ს პირველი განტოლების სახე

$$\sigma_i = a \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.45)$$

როგორც აღვნიშნეთ (პარ.4.6) რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება ეკონომიკურად მიზანშეწონილი შეიძლება აღმოჩნდეს კვანძების იმ ნაწილში, სადაც  $|\sigma_i| > |a|$ .

(5.45) სახის განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შრომატევადობა მდგომარეობს მასში, რომ ამოხსნის შემდეგ უნდა გადამოწმდეს პირობა  $Q_{,i} > 0$  ყველა  $i$  კვანძისთვის. იმ შემთხვევაში თუ ქსელის რომელიმე კვანძისთვის აღნიშნული პირობა ირღვევა, მაშინ განტოლებათა სისტემიდან ამოღებული უნდა იქნეს ამ კვანძის შესაბამისი სტრიქონი და სვეტი და ამოვხსნათ დარჩენილი განტოლებათა სისტემა (პარ.5.4) და ა.შ.

ეს ერთი შეხედვით მარტივი ალგორითმი განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას ქმნის გარკვეულ გართულებებს იმის გამო, რომ ამოხსნის ახალ ეტაპზე გადასვლისას საძიებელ უცნობთა ინდექსი იცვლება და ამიტომ კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებისას საჭირო ხდება სტანდარტულ პროგრამაში ამოხსნის ალგორითმის შესაბამისი სახით კორექტირება.

წინამდებარე ნაშრომში შემოთავაზებულია (5.45) სახის განტოლებათა სისტემის იტერაციული ამოხსნის ერთგვარი

ალგორითმი, რომელიც ავტორის აზრით საგრძნობლად მარტივია და მიიღება საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტის ამონახსნი.

ამ ალგორითმის მიხედვით ამოხსნა უნდა დავიწყოთ იმ კვანძის შესაბამისი განტოლებიდან გამომდინარე, რომლისთვისაც აქტიური სიმძლავრის ფარდობითი ნაზრდი უდიდესია აბსოლიტური მნიშვნელობით. ამ კვანძისთვის მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური სიმძლავრე განვსაზღვროთ ფორმულით.

$$Q_{\mathcal{A}} = \frac{-\sigma_j + a}{2R_{jj}} \cdot U_6^2. \quad (5.46)$$

თუ ფორმულით მიღებული სიდიდე აღმოჩნდა  $-Q_j$  სიდიდეზე მეტი, მაშინ შევირჩიოთ  $Q_{\mathcal{A}} = -Q_j$  და ქსელის ყველა კვანძისთვის განვსაზღვროთ სიდიდე

$$\Delta\sigma_j = \frac{2}{U_6^2} R_{ji} Q_{\mathcal{A}} \quad (5.47)$$

და გამოვთვალოთ

$$\sigma_j^{(1)} = \sigma_j^{(0)} + \Delta\sigma_j, \quad (5.48)$$

სადაც

$$\sigma_j^{(0)} = \frac{2}{U_6^2} \sum_{f=1}^n R_{jf} Q_f \quad (5.49)$$

და დადგენილია განტოლებათა სისტემის შედგენისას (2.36).

ამით დასრულდება პირველი იტერაცია, რომლის შემდეგ (5.46) ფორმულით დავადგენთ მაკომპენსირებელი დანადგარის ოპტიმალური სიმძლავრის მიახლოებულ (ქვემოდან) მნიშვნელობას იმ კვანძისთვის, რომლისთვისაც  $\sigma_j^{(1)}$  აბსოლიტური სიდიდით იქნება უდიდესი და გავიმეორებთ (5.47)–(5.48) პროცედურას.



ამოხსნის იტერაციული პროცესი დამთავრებულად ჩაითვლება როცა ყველა კვანძისთვის წინსაწარ შერჩეული სიზუსტით შესრულდება პირობა

$$\sigma_j = a.$$

ოპტიმალური კომპენსაციის განტოლებათა სისტემის ამოხსნა ჩატარდა 5.4 პარაგრაფში წარმოდგენილი ელექტრული ქსელისთვის და ამოხსნის პროცედურა ნაჩვენებია ქვემოთ ცხრილში (ცხრ. 5.8).

**I იტერაცია:**  $\sigma_i^{(0)}$  პარამეტრებს შორის აბსოლიტური სიდიდით უდიდესია  $|\sigma_{14}^{(0)}| = 3.392$

$$Q_{\delta 14} = \frac{(3.392 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 9.8} \cdot 12100 = 8.59 \Rightarrow Q_{\delta 14} = -Q_{14} = 3.0$$

პირველი იტერაციის დასრულებით მივირეთ, რომ  $\sigma_j^{(1)}$  აბსოლიტური სიდიდით უდიდესია მე-10 კვანძისთვის  $|\sigma_{10}^{(1)}| = 3.213$ .

**II იტერაცია:**

$$Q_{\delta 10} = \frac{(3.213 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 7.2} \cdot 12100 = 10.2 \Rightarrow Q_{\delta 10} = -Q_{10} = 2.0$$

ამ იტერაციის დასრულებით მივიღეთ  $|\sigma_{11}^{(2)}| = 3.005$ .

**III იტერაცია:**

$$Q_{\delta 11} = \frac{(3.005 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 6.9} \cdot 12100 = 8.81 \Rightarrow Q_{\delta 11} = -Q_{11} = 4.0$$

იტერაციის დასრულებით მივიღეთ  $|\sigma_{13}^{(3)}| = 2.654$

**IV იტერაცია:**

$$Q_{\delta 13} = \frac{(2.654 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8.8} \cdot 12100 = 4.5 \Rightarrow Q_{\delta 13} = -Q_{13} = 2.0$$

მივიღეთ  $|\sigma_9^{(4)}| = 2.492$

**V იტერაცია:**

$$Q_{j^9} = \frac{(2.492 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 6.4} \cdot 12100 = 4.2 \Rightarrow Q_{j^{13}} = Q_9 = 3.0$$

ՅՅՆ. 5.8

№	$R_{ii}$	$ \sigma_i^{(0)} $	$ \sigma_i^{(1)} $	$ \sigma_i^{(2)} $	$ \sigma_i^{(3)} $	$ \sigma_i^{(4)} $	$ \sigma_i^{(5)} $	$ \sigma_i^{(6)} $	$ \sigma_i^{(7)} $	$ \sigma_i^{(8)} $
1	4.2	2.762	2.643	2.524	2.286	2.207	2.028	1.978		
2	4.8	3.154	2.995	2.836	2.519	2.413	2.175	2.108	2,008	
3	4.8	3.012	2.774	2.668	2.456	2.297	2.138	2.038	1,960	
4	3.7 5	2.404	2.260	2.194	2.062	1.963	1.864	1.747		
5	5	2.861	2.742	2.623	2.385	2.306	2.127	2.057	1,917	
6	8	3.010	2.891	2.772	2.534	2.455	2.276	<b>2.22</b> <b>6</b>	2,00	1.971
7	5.4	2.894	2.775	2.656	2.418	2.339	2.160	2.110		
8	7.4	2.960	2.841	2.722	2.484	2.405	2.226	2.176	<b>2,04</b> <b>6</b>	2.00 0
9	6.4	3.312	3.153	2.955	2.598	<b>2.49</b> <b>2</b>	2.175	2.180	2,008	1.988
10	7.2	3.372	<b>3.21</b> <b>3</b>	2.975	2.578	2.472	2.174	2.108	2,008	1.988
11	6.9	3.62	3.203	<b>3.00</b> <b>5</b>	2.549	2.443	2.175	2.108	2,008	1.988
12	6.8	3.243	2.906	2.800	2.588	2.363	2.204	2.104	2,026	2.00 6
13	8.8	3.309	2.972	2.866	<b>2.65</b> <b>4</b>	2.363	2.204	2.104	2,026	2.00 6

1 4	9.8	<b>3.39</b> <b>2</b>	2.906	2.800	2.588	2.636	2.204	2.104	2,026	2.00 6
15	6.15	2.707	2.558	2.492	2.360	2.261	2.162	1.957		
1 6	5.8 5	2.632	2.483	2.417	2.285	2.186	2.087	1.912		
17	8.15	2.839	2.690	2.624	2.492	2.393	<b>2.29</b> <b>4</b>	2.024	1,981	1.972

შენიშვნა: კვანძებში დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის აბსოლიტური მნიშვნელობის უფრო მეტად შემცირება, ვიდრე  $|a| = 2.0$ , მიუთითებს მასზე, რომ ამ კვანძებში ოპტიმალურთან შედარებით გვაქვს ჭარბი კომპენსაცია.

$$\text{მივიღეთ } |\sigma_{17}^{(5)}| = 2.294$$

VI იტერაცია:

$$Q_{\delta 17} = \frac{(2.294 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8.15} \cdot 12100 = 2.18 \Rightarrow Q_{\delta 17} = 2.0$$

$$\text{მივიღეთ } |\sigma_6^{(6)}| = 2.226$$

VII იტერაცია:

$$Q_{\delta 6} = \frac{(2.226 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8} \cdot 12100 = 1.17 \Rightarrow Q_{\delta 6} = 1.7$$

$$\text{მივიღეთ } |\sigma_8^{(7)}| = 2.046$$

VIII იტერაცია:

$$Q_{\delta 8} = \frac{(2.046 - 2) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8} \cdot 12100 = 0.38 \Rightarrow Q_{\delta 8} = 0.38.$$

მე-8 იტერაციის დასრულებით მივიღებთ, რომ ქსელის ყველა კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის ფარდობითი ნაზრდის აბსოლიტური სიდიდე პრაქტიკულად არ აღემატება ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალურ მნიშვნელობის (4.18) აბსოლიტურ სიდიდეს

$$|\sigma_i^{(8)}| \leq |a|$$

რის გამოც იტერაციული პროცესი დასრულებულად ჩაითვლება.

იტერაციული ამოხსნისას მიღებული შედეგები შევადაროთ 5.5 ცხრილის შედეგებს (ცხრ. 5.9).

ცხრ.5.9

კვანძი №	6	8	9	10	11	12	13	14	17
ზუსტი მეთოდი	1.389	0.615	2.843	2.0	3.834	0.496	2.0	3.0	1.69
(5.27) მათ. მეთოდი	1.331	0.543	2.59	2.01	3.70	0.54	2.0	3.0	1.70
იტერაციული ამოხსნა	1.7	0.38	3.0	2.0	4.0	0	2.0	3.0	2.0

#### 5.8. თეორიული კვლევის შედეგების პრაქტიკული გამოყენება და დანერგვა

რეგიონულ ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნის წინამდებარე ნაშრომში მიღებული გამარტივებული მათემატიკური მოდელი (5.27) დანერგილი იქნა საქართველოს ენერგოსისტემის «ეი-ი-ეს თელასის» მანაწილებელ ქსელში.

საქართველოს ენერგოსისტემის ელექტრულ ქსელი მოიცავს 500-220 კვ ძაბვის მკვებავ ქსელს, რომელიც დისერტაციაში მიღებული

სტრუქტურული სქემის თანახმად მიეკუთვნება ვერტიკალური იერარქიის IV დონეს.

აღნიშნული დონე მოიცავს სისტემათაშორისო და შიგასასისტემო 500 კვ ძაბვის ელექტოგადაცემის ხაზებს: «კავკასიონი», «მუხრანი», «იმერეთი», «ქართლი 1» და «ქართლი 2» და 30 ერთეულზე მეტ 220 კვ ძაბვის ერთ- და ორჯაჭვა ე.გ. ხაზებს (ნახ. 5.17).

ენერგოსისტემის მუშაობის სპეციფიკურობიდან გამომდინარე აქტიური სიმძლავრის მახალანსირებელ კვანძად თითქმის ყველა შესაძლო რეჟიმში განიხილება ენგურჰესის კვანძი. რეაქტიული სიმძლავრის რეგიონული ბალანსირების პრინციპის თანახმად მახალანსირებელ კვანძად დასავლეთ საქართველოს რეგიონისათვის განიხილება ენგურჰესი, ხოლო აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონისათვის – თბილსრესი. ამ შეთანხმების პირობებში რეაქტიული სიმძლავრის გადადინება დასავლეთიდან აღმოსავლეთში ან პირიქით, პრაქტიკულად, მინიმუმამდეა დაყვანილი.

იერარქიული სტრუქტურის III დონეს წარმოადგენს 35-110 კვ ძაბვის ქსელები, რომლებიც იკვებება 220/110 კვ ძაბვის ელექტროსადგურებისა და ქვესადგურების 110 კვ ძაბვის სალტეებიდან. თითოეული ეს იერარქიული დონე ელექტროენერგიას აწვდის 6-10 კვ ძაბვის მანაწილებელ ქსელს ანუ ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის II დონეს.

ნახ. 5.17

220/110 კვ ქვესადგურების 220 კვ ძაბვის კვანძების მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი დადგენილი იქნა 2.41 გამოსახულების საფუძველზე (ნახ. 5.18) ანგარიშის შედეგები წარმოდგენილია 5.10 ცხრილში.

მკვებავ ქსელში:  $\sum P_{\text{მოხ.}} = 1428,3$  მგვტ,  $\sum Q_{\text{მოხ.}} = 702,9$  მგვარ;

ანუ  $tg\varphi = 0,49$ ,  $\Delta P = 42,69$ , ანუ  $\Delta P\% = 2,99\%$ .

რეგიონულ ქსელში კარგები მიახლოებით შეადგენს 2,0 %.

მაშასადამე  $\sum \Delta P\% = 4,99$

ცხრ. 5.10. დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი,  $\sigma \cdot 10^{-2}$

220 კვ ძაბვის კვანძი		მაბალანსირებელი კვანძი	
№	ასახელება	ენგურჰესი-500	თბილსრესი-500
1	ენგურჰესი	-0,42	-2,36
2	ვარდნილჰესი	-1,3	-2,92
3	ტყვარჩელსრესი	-4,12	-5,84
4	სოხუმი	-6,4	-7,64
5	ბზიფი	-6,84	-8,72
6	ბათუმი	-2,74	-2,92
7	მენჯი	-1,88	-2,06
8	ზუგდიდი	-1,72	-2,14
9	ქუთაისი	-1,44	-1,64
10	წყალტუბო	-1,44	-1,62
11	ლაჯანურჰესი	-0,62	-0,64
12	ზესტაფონი	-0,74	-0,84
13	ხაშური	-1,82	-1,14
14	გორი	-1,86	-1,12
15	ქსანი	-1,80	-1,10
16	ჟინვალჰესი	-1,38	-1,0
17	გლდანი	-2,02	-1,42
18	რუსთავი	-1,7	-1,16
19	გურჯაანი	-2,92	-2,10

20	ნავთლული	-1,98	-1,58
21	ხრამჭესი 2	-0,72	-0,50
22	ლისი	-2,28	-0,91
23	დიღუბე	-3,02	-1,75
24	მარნეული	-2,52	-1,60
25	თბილსრესი	-1,84	-0,36

აღნიშნული კვანძების საკუთარი წინაღობები, დაყვანილი 220 კვ ძაბვაზე, დავადგინეთ 5.18 ნახაზზე ნაჩვენები სქემის მიხედვით. ანგარიშის შედეგები წარმოდგენილია 5.11 ცხრილში.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული თეორიული კვლევის შედეგების საფუძველზე რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა ამოხსნილი იქნა ქ/ს «დ. ნავთლულის» 110 კვ ძაბვის სალტეებზე მიერთებული III და II იერარქიული დონეების ელექტრულ ქსელისათვის (ნახ. 5.19), რომლის კვანძური რეაქტიული დატვირთვები მოცემულია 5.12 ცხრილში.

ქ/ს «დ. ნავთლულის» 220 კვ ძაბვის კვანძის მიმართ (რომელსაც პირობითად მივანიჭეთ ინდექსი «0») აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი (ცხრ. 5.10)

$$\sigma_0 = -1,58 \cdot 10^{-2},$$

ხოლო ამავე კვანძის საკუთარი წინაღობა (ცხრ. 5.11)

$$R_{0,0} = 1,669 \text{ ომი.}$$

ამ ქვესადგურის 220/110 კვ ძაბვის ავტოტრანსფორმატორების ეკვივალენტური წინაღობა

$$R_{აბ} = (R_{მალ.} + R_{საშ.}) = 0,5 \text{ ომი}$$

ცხრ. 5.11. კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობა. ომი

220 კვ ძაბვის კვანძი		მაბალანსირებელი კვანძი	
№	ასახელება	ენგურჰესი-500	თბილსრესი-500
1	ენგურჰესი	0,437	2,154
2	ვარდნილჰესი	0,950	2,615
3	ტყვარჩელსრესი	4,39	5,055
4	სოხუმი	9,39	11,055
5	ბზიფი	15,59	17,255
6	ბათუმი	6,41	7,292
7	მენჯი	3,41	4,657
8	ზუგდიდი	1,51	3,916
9	ქუთაისი	1,74	2,372
10	წყალტუბო	3,75	4,382
11	ლაჯანური	7,31	7,942
12	ზესტაფონი	1,01	1,555
13	ხაშური	4,06	3,94
14	გორი	4,01	4,562
15	ქსანი	1,74	0,675
16	ჟინვალჰესი	5,84	4,775
17	გლდანი	2,85	1,501
18	რუსთავი	2,996	1,445
19	გურჯაანი	10,065	8,515
20	ნავთლული	3,544	1,669
21	ხრამჰესი 2	8,434	6,559
22	ლისი	2,370	0,993
23	დიდუბე	2,690	1,313
24	მარნეული	2,95	1,504
25	თბილსრესი	1,016	0,364



ცხრ. 5.12. ქვესადგურ «დ. ნავთლულის» მანაწილებელი ქსელის  
რეაქტიული დატვირთვები (2004 წლის მაქს. რეჟიმი)

მანაწილებელი ქსელის კვანძი		დატვირთვა, მგვარ	გენერაცია, მგვარ
№	ასახელება		
2	ორხევი	5,3	—
3	ნავთლული 2	5,4	—
4	ვარკეთილი	6,1	—
5	ორთაჭალაჭესი	—	4,2
6	ავიოქარხანა	5,1	—
7	სოლოლაკი	9,8	—
8	ტაბახმელა	3,6	—
9	კოჯორი	2,3	—
10	კიკეთი	1,1	—
11	ნავთლული 10 კვ	20,9	—
13	პ/ნავთლული	5,2	—
15	აეროპორტი	3,1	—
16	ნორიოს მეფრ. ფაბრიკა	0,8	—
17	საცხენისიჭესი	—	2,0
18	ვაზიანი	1,7	—
19	მარტყოფიჭესი	—	0,5
20	თეთრიხევიჭესი	—	0,5
21	ლილო 1	1,2	—
22	ლილო 2	1,3	—

23	ლილო 3	2,1	—
24	ფონიჭალა	10,1	—
25	გაჩიანი წვევა	5,2	—

ელექტროსისტემის განხილულ რეჟიმში «ნავთლუდის» 220 კვ ძაბვის ჯამური რეაქტიური ტვირთი შეადგენდა

$$Q_{0,\Sigma} = -86,1 \text{ მგვარ}$$

და, შესაბამისად, ამ კვანძისათვის 5,28 გამოსახულების თანახმად

$$\sigma'_0 = \frac{2R_{0,0}Q_{0,\Sigma}}{U_6^2} = \frac{2 \cdot 1,669 \cdot (-86,1)}{220^2} = -0,59 \cdot 10^{-2}.$$

მაშასადამე, 5.29 გამოსახულების თანახმად

$$\sigma''_0 = \sigma_0 - \sigma'_0 = (-1,58 - (-0,59)) \cdot 10^{-2} = -0,93 \cdot 10^{-2}$$

გამოვთვალოთ განსახილველი რეგიონული ქსელის (ნახ. 5.19) კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები «0» კვანძის მიმართ, რისთვისაც შევადგინოთ ამ ქსელის შენაცვლების სქემა (ნახ. 5.20), სადაც ნაჩვენებია უბანთა აქტიური წინაღობები, დაყვანილი 220 კვ ბაზისურ ძაბვაზე.

ანგარიშის შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ. 5.13).

მომდევნო 5.14 ცხრილში 5.30 გამოსახულების შესაბამისად ნაჩვენებია ამავე კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები მკვებავი ქსელის გათვალისწინებით:

$$R_{ij} = R_{0,0} + R'_{ij}.$$

განსახილველი რეგიონული ქსელისათვის გამოვთვალოთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური სიდიდე (4.18)

$$a = -\frac{(0,16+0,03) \cdot 20000 + 0,3 \cdot 7000 \cdot 60 \cdot 10^{-2}}{2500 \cdot 60} = -3,37 \cdot 10^{-2}.$$

მაღალი ძაბვის მკვებავი ქსელისათვის (IV იერარქიული დონე), რომლისათვისაც  $\operatorname{tg} \varphi = 0,49$  და  $\Delta P\% = 4,99$ , განვსაზღვროთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხი (5.10)

$$\beta = 1 + \frac{50a(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi \cdot \Delta P\%} = 1 - \frac{50 \cdot 3,37(1 + 0,49^2) \cdot 10^{-2}}{0,49 \cdot 4,99} = 0,15.$$

გამოვთვალოთ (5.27) გამოსახულების მარჯვენა მხარის მეორე წევრი

$$[(1 - \beta)\sigma_K'' - a] \frac{U_6^2}{2} = [(1 - 0,15)(-0,93 \cdot 10^{-2}) - (-3,37 \cdot 10^{-2})] \frac{48400}{2} = 624,24.$$

5.14 ცხრილის საფუძველზე რეგიონული ქსელის იმ კვანძებისათვის, სადაც მოსალოდნელია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის დადებითი ეკონომიკური ეფექტი, გამოვთვალოთ  $\sum_{j=1}^K R_{ij} \cdot Q_j$  სიდიდე. ანგარიშის შედეგები წარმოვადგინოთ 5.15 ცხრილის სახით. ამავე ცხრილში ნაჩვენებია კვანძების მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი  $\sigma_{\rho}$ .

ცხრ. 5.15  $\sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j$  სიდიდეთა მნიშვნელობები რეგიონული ქსელის კვანძებისათვის

კვანძი №	კვანძის დასახელება	$\sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j$	$\sigma_{\rho} \cdot 10^{-2}$
2	ორხევი	-202,52	-0,837
3	ნავთლული 2	-211,73	-0,875
4	ვარკეთილი	-200,17	-0,831
6	ავიოქარხანა	-205,17	-0,848
7	სოლოლაკი	-648,08	-2,678
8	ტაბახმელა	-939,80	-3,883
9	კოჯორი	-1032,05	-4,265
10	კიკეთი	-1046,20	-4,736
13	პ/ნავთლული	-349,30	-1,443
15	აეროპორტი	-637,51	-2,634
16	ნორიოს მეფრ. ფაბრიკა	-442,21	-1,827
18	ვაზიანი	-872,78	-3,607

21	ლილო 1	-1032,31	-4,679
22	ლილო 2	-1202,74	-4,970
23	ლილო 3	-1220,65	-5,044
24	ფონიჭალა	-200,70	-0,829
25	გაჩიანი წვევა	-232,72	-0,962

მიღებული მონაცემების საფუძველზე შევადგინოთ (5.27) სახის განტოლებათა სისტემა, რომლის ამოხსნის შედეგად ვღებულობთ:

$$Q_{\rho 8} = 0,87, \quad Q_{\rho 9} = 2,3, \quad Q_{\rho 10} = 1,1, \quad Q_{\rho 18} = 0,49,$$

$$Q_{\rho 22} = 1,07 \quad \text{და} \quad Q_{\rho 23} = 2,1 \quad \text{მგვარ.}$$

ამრიგად, მოცემულ რეგიონულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ჯამური კომპენსაცია შეადგენს 7,93 მგვარ-ს, ანუ კომპენსაციის ოპტიმალური დონე აღწევს  $\beta = 0,092$ -ს.

5.15 ცხრილის მონაცემების მიხედვით ელექტროსისტემაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ჯამური ცვლილება იქნება

$$\Delta(\Delta P_{\rho}) = (-3,883 \cdot 0,87 - 4,265 \cdot 2,3 - 4,736 \cdot 1,1 - 3,607 \cdot 0,49 - \\ - 4,97 \cdot 1,07 - 5,044 \cdot 2,1) \cdot 10^{-2} = -0,361 \quad \text{მგვტ.}$$

მათ შორის მკვებავ ქსელში დანაკარგების ცვლილება იქნება (ქვესაღვურ «დ.ნავთლულისათვის»  $\sigma = -1,58 \cdot 10^{-2}$ )

$$\Delta(\Delta P_{\rho})_{\text{მკვ.ქს.}} = -1,58 \cdot 10^{-2} \cdot 7,93 = -0,125 \quad \text{მგვტ.}$$

მაშასადამე, «დ.ნავთლულის» მანაწილებელ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები შემცირდა  $0,361 - 0,125 = 0,246$  მგვტ-ით.

### 5.9. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ეკონომიკური ეფექტი (შეფასებითი ანგარიში)

5.8 პარაგრაფში მიღებული რიცხვითი მონაცემების საფუძველზე გვაქვს:

1. რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარის კაპიტალური ხარჯები

$$K = 7,93 \cdot 20000 = 158600 \text{ ლარი}$$

2. ამავე დანადგარის საექსპლუატაციო ხარჯები (მომსახურება, რემონტი (3%) და დანადგარში ენერჯის დანაკარგები (0,3 %))

$$\Delta I_{\text{ექს.}} = 0,03 \cdot 20000 + 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 7000 \cdot 7,93 = 767 \text{ ლარი/წელი}$$

3. ქსელში ენერჯის დანაკარგების შემცირებით მიღებული შემოსავალი

$$\Delta N = 0,361 \cdot 2500 \cdot 60 = 54150 \text{ ლარი/წელი}$$

4. ქონების გადასახადი (1%)

$$I_{\text{ქონ.}} = 0,01 \cdot 158600 = 1586 \text{ ლარი/წელი}$$

5. მოგება (ბრუტო)

$$\Pi_{\text{ბრ.}} = 54150 - 767 - 1586 = 51797 \text{ ლარი/წელი}$$

6. დღგ (20%)

$$I_{\text{დღგ}} = 0,2 \cdot 51797 = 10359 \text{ ლარი/წელი}$$

7. ინვესტიციის გადასახადი (10%)

$$I_{\text{ინვესტ.}} = 0,1 \cdot 158600 = 15860 \text{ ლარი/წელი}$$

8. წმინდა მოგება

$$54150 - 767 - 1586 - 10359 - 15860 = 25578 \text{ ლარი/წელი}$$

9. მაკომპენსირებელი დანადგარის გამოსყიდვის ვადა

$$T_{\text{გაგ}} = \frac{158600}{25578} = 6,2 \text{ წელი.}$$

## თავი 6. მანაწილებელ ქსელში (6-10 კვ) ენერჯის განაწილების აღრიცხვის მეთოდი

### 6.1. მანაწილებელ ქსელში (6-10 კვ) ელ. ენერჯის განაწილების, კონტროლის, მართვის და დაგეგმვის ახალი მეთოდი

ცნობილია, რომ გაუმრიცხველიან უბნებში საკმაოდ დიდი კომერციული დანაკარგებია და მათი აღმოფხვრის ერთ-ერთი გზა არის ელექტროენერჯის შეზღუდვით მიწოდება, ანუ ენერჯის მიწოდების ხელოვნური შემცირება. ასეთი შემცირებები ძირითადად ხდება 6-10 კვ ფიდერების საშუალებით. ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში რა დროის მონაკვეთში უნდა მოხდეს ასეთი სახის შეზღუდვები, რომ მივაღწიოთ სასურველ ფინანსურ მაჩვენებელს? შეიძლება განხილული იქნეს ყოველდღიური შესყიდვების ანგარიშის მეთოდი (ცხრილი 6.1) ფიდერების მიხედვით, რაც გარკვეულ წილად იძლევა ამ ამოცანის ამოხსნის საშუალებას. მაგალითად თუ შევზღუდავთ ფიდერს გარკვეულ დროით, შედეგი გამოჩნდება მეორე ან მესამე დღეს. ანუ შეიძლება შევადაროთ მოხმარებული ენერჯია და შემოსული თანხა. თუ ეს შედეგი არ დაგვაკმაყოფილებს შემდეგ ისევ შევცვლით მიწოდების გრაფიკს შემდეგი დღისათვის და ა.შ. ამ პროცესმა სასურველ შედეგს რომ მიაღწიოს, შეიძლება საკმარისად დიდი დრო დაგვაკარგვინოს. ისმის კითხვა, როგორ დავადგინოთ მიწოდების გრაფიკის ისეთი სქემა, რომ სასურველი შედეგი საკმაო სიზუსტით მიღებული იქნეს მეორე დღესვე. ერთერთი გზა ამისა არის ის, რომ ვიცოდეთ ფიდერის საათობრივი მოხმარება და აქედან გამოვთვალოთ, თუ რომელ საათში გაითიშოს იგი რათა სასურველი შედეგი მივიღოთ. (ან ფიდერებზე



უნდა დავაყენოთ ისეთი ტექნიკა, რომელიც ამ ინფორმაციას ავტომატურ რეჟიმში მოგვაწვდის, რაც საკმაოდ ძვირია – ერთ ფიდერზე მისი დამონტაჟების ღირებულება დაახლოებით 1000-1500 აშშ დოლარს შეადგენს).

ეს ყველაფერი კარგია, მაგრამ როგორ მოვიქცეთ იმ შემთხვევაში, როცა ფიდერის რაოდენობაა 200 ან 300 და მათი ტვირთების საათობრივი მაჩვენებლების მოხსნა პრაქტიკულად შეუძლებელია? მაგალითისთვის ავიღოთ უბანი, რომელიც იკვებება ფიდერების გარკვეული რაოდენობით და ჩვენი ამოცანაა ამ უბნის გარკვეული რაოდენობის ენერგიით მომარაგება, რაც ჩვენ წინასწარ ვიცით (ანუ ეს იმ ენერგიის რაოდენობაა, რაც ჩვენი ფინანსური მდგომარეობისთვის არის მისაღები). 24 საათიანი მიწოდების შემთხვევაში იგი აჭარბებს ამ ენერგიას დიდი რაოდენობით და შემოსული თანხა კი იგივე არის.

ამოცანა იხსნება შემდეგნაირად:

ვიღებთ ფიდერების ყოველდღიური შესყიდვის ინფორმაციას და ვასაშუალოებთ მათ ფიდერების მიხედვით (ანუ ვანგარიშობთ ერთი დღის საშუალო მოხმარებას თითოეულ ფიდერზე). შემდეგ ვიღებთ ქალაქის მოხმარების დატვირთვის მრუდს (ცხრილი 6.2, ნახ. 6.1), რომელიც ჩვენთვის არის ცნობილი და ვახდენთ იგივე პროპორციის გამოყენებას თითოეული ფიდერის შემთხვევაში, საიდანაც პრაქტიკულად ვღებულობთ ნებისმიერი ფიდერის საათობრივ დატვირთვას და საათობრივ გადაჭარბებას (ცხრილი 6.3) ყოველგვარი სირთულის გარეშე, და თანაც ჩვენ შეგვიძლია ეს ინფორმაცია განვაახლოთ ყოველდღიურად.

ეს მეთოდი არის საკმაოდ ზუსტი იმისათვის, რომ მენეჯმენტმა მიიღოს სწორი და სწრაფი გადაწყვეტილება კომერციული დანაკარგების აღმოფხვრის საკითხში, ისეთი ფიდერების მიმართ, სადაც არის საკმაოდ დიდი დანაკარგები.

მიღებული გრაფიკი შემდეგ გადაეცემა სადისპეტჩერო სამსახურს მისი შესრულებისათვის (ცხრილი 6.4).

ამ მეთოდოლოგიის გამოყენება შეიძლება მხოლოდ ენერჯის დეფიციტის პირობებში, რაც მეტად მნიშვნელოვანია ენერგეტიკული კრიზისული მდგომარეობის პირობებში.

## 6.2. ფიდერებზე შესყიდვის და დარიცხვის დაბალანსება

ფიდერების მიერ გაცემული ენერჯის დაბალანსება ამ ფიდერის მომხმარებლების დარიცხვასთან და კომერციული კარგების დადგენა ფიდერების ან სატრანსფორმატორო ჯიხურების (ს/ჯ) მიხედვით, იდეალურ შემთხვევაში შესაძლებელი იქნებოდა როდესაც ყველა ფიდერზე, ს/ჯ-ზე და აბონენტს ექნებოდა მოწყობილი მრიცხველები.

რეალურად კი მოსახლეობის დიდ ნაწილს არ აქვს მოწყობილი აღრიცხვა, ს/ჯ-ებზე არ გვაქვს საბალანსო მრიცხველები და, ბოლოს, მოწყობილი არ გვაქვს ფიდერებს შორის გადადინების წერტილებში აღრიცხვა. ფიდერზე ბალანსის მისაღწევად აუცილებელია ერთდროულად წავიკითხოთ ფიდერის მრიცხველი და მასზე მიბმული აბონენტები. აქედან გამომდინარეობს ის რომ ს/ჯ-ები და ფიდერი რომლისგანაც ისინი იღებენ ენერჯიას უნდა იყოს უცვლელი, ხოლო შეცვლის შემთხვევაში გადინებული ან შემოდინებული ენერჯია უნდა აღრიცხოს მრიცხველით, რომელიც არ გვაქვს დაყენებული, ხოლო დაყენება კი ჯდება ძალიან ძვირი (უნდა გავითვალისწინოთ ის, რომ გადადინების ერთი მრიცხველის დაყენება ჯდება იმდენი რა თანხითაც ჩვენ შეგვიძლია ათი და უფრო მეტი ს/ჯ-ის საბალანსო მრიცხველის მოწყობა). ერთადერთი გამოსავალი ამ სიტუაციიდან არის ის, რომ უნდა ვიცოდეთ თუ რა ენერჯია მოიხმარა ფიდერმა ყოველდღიურად ანუ ფიდერის ჩვენება უნდა ავიღოთ ყოველდღე.

როგორ მოაგვარებს ყოველდღიური შესყიდვის ცოდნა ამ პრობლემებს და რა დადებითი ინფორმაციის მოცემა შეუძლია მას.

განვიხილოთ მაგალითი (ნახ. 6.2).

6.5 ცხრილში ნაჩვენებია ფიდერების მიერ ენერჯის ყოველდღიური მოხმარება, როცა ს/ჯ-ები იღებენ კვებას იმ ფიდერებიდან, როგორც მითითებულია ეტალონში. ხოლო იმ შემთხვევაში თუ რომელიმე კაბელი დაზიანდა და ს/ჯ-ებს, რომლებიც დარჩნენ კვების გარეშე დისპეტჩერები მიაწვდიან სარეზერვო კვებას, ადგილი ექნება დისბალანსს და ს/ჯ-ების გარკვეული რაოდენობა რაღაც პერიოდის განმავლობაში მიიღებს კვებას სხვა ფიდერიდან რომელიც მის ძირითად კვებად არ ითვლება.

ცხრილი 6.5

	1-Apr-01	2-Apr-01	3-Apr-01	4-Apr-01	5-Apr-01	6-Apr-01	7-Apr-01
F1	20000	20020	20100	20080	20084	20088	20092
F2	80000	80030	80010	80015	80017	80014	80070
F3	120000	120009	120018	120027	120036	120045	120054
F4	50000	50006	50012	50018	50024	50030	50036
F5	65000	65003	65006	65009	65012	65015	65018

ცხრილი 6.5 (გაგრძელება)

8-Apr-01	9-Apr-01	10-Apr-01	11-Apr-01	12-Apr-01	13-Apr-01	14-Apr-01	15-Apr-01
20089	20086	20083	20080	20077	20074	20071	20068
80040	80035	80053	80033	80040	80047	80054	80061
120063	120072	120081	120090	120078	120066	120054	120042
50042	50048	50043	50038	50033	50028	50023	50018
65021	55024	65019	65014	65009	65004	64999	64994

ვთქვათ, დაზიანდა კაბელი, რომლის მიმართულება არის 7-8 (ნახ. 6.3), ეს იმას ნიშნავს, რომ ს/ჯ-ი 8, 9 და 10 დარჩება კვების გარეშე. მის შემდეგ დისპეტჩერი იღებს გადაწყვეტილებას იმის შესახებ, თუ რომელი მიმართულებიდან მიაწოდოს კვების გარეშე დარჩენილ კვება ჯიხურებს, ვინაიდან ვარიანტები ამ კონკრეტულ შემთხვევაში

საკმაოა, გადაწყვეტილებაზე იმოქმედებს სეზონის ფაქტორი, ჯიხურების ტვირთები, სარეზერვო კაბელების განიკვეთი და ა.შ.

ვთქვათ, დისპეტჩერმა მიიღო გადაწყვეტილება და სამივე ჯიხურს კვება მიაწოდა 14 ჯიხურიდან, სადაც არ დგას მრიცხველი, რაც ნიშნავს, ენერჯის გადასვლის აღურიცხავობას ამ მიმართულებაზე. ვთქვათ, ეს გადართვა მოხდა 7 აპრილს, ხოლო დაზიანების აღმოფხვრა მოხდა 9 აპრილს და სქემაც

ნახ. 6.3

აღადგინეს იმავე დღეს, მაშინ ყოველდღიურ შესყიდვაში მოხდება ცვლილება, რომელიც მიიღებს შემდეგ სახეს (ცხრ. 6.6):

ცხრილი 6.6

	1-Apr-01	2-Apr-01	3-Apr-01	4-Apr-01	5-Apr-01	6-Apr-01	7-Apr-01
F1	20000	20020	20100	20080	20084	20088	20092
F2	80000	80030	80010	80015	80017	80014	<b>80070</b>
F3	120000	120009	120018	120027	120036	120045	<b>120054</b>
F4	50000	50006	50012	50018	50024	50030	50036
F5	65000	65003	65006	65009	65012	65015	65018

ცხრილი 6.6 (გაგრძელება)

8-Apr-01	9-Apr-01	10-Apr-01	11-Apr-01	12-Apr-01	13-Apr-01	14-Apr-01	15-Apr-01
20089	20086	20083	20080	20077	20074	20071	20068
<b>80040</b>	<b>80035</b>	80053	80033	80040	80047	80054	80061
<b>120063</b>	<b>120072</b>	120081	120090	120078	120066	120054	120042
50042	50048	50043	50038	50033	50028	50023	50018
65021	55024	65019	65014	65009	65004	64999	64994

გამოკვეთილი ფონით (ცხრილი 6.6) აღნიშნულია იმ ფიდერების შესყიდვები იმ დღეების მიხედვით, როცა მოხდა გადართვა და ეს ციფრები მიიღებს შემდეგ მნიშვნელობებს 80070-E(TP#8)-E(TP#9)-E(TP#10) და ა.შ., სადაც E(TP#8) არის ჯიხურის ენერჯია, რომელსაც

იგი გადასცემდა შესაბამის დღეებში. ეს იმას ნიშნავს, რომ ფიდერ 2-ს მოაკლდა ხარჯი  $3*(TP\#8)+E(TP\#9)+E(TP\#10)$  ენერჯის ოდენობით. აქედან გამომდინარეობს ის, რომ იგივე რაოდენობის ენერჯია დაემატა ფიდერ 3-ს. ვთქვათ ეს ენერჯია ჯამში შეადგენს 40000 კვტ სთ-ს. შესყიდვების ცხრილი მიიღებს სახეს (ცხრ. 6.7):

ცხრილი 6.7

	1-Apr-01	2-Apr-01	3-Apr-01	4-Apr-01	5-Apr-01	6-Apr-01	7-Apr-01
F1	20000	20020	20100	20080	20084	20088	20092
F2	80000	80030	80010	80015	80017	80014	<b>40070</b>
F3	120000	120009	120018	120027	120036	120045	<b>160054</b>
F4	50000	50006	50012	50018	50024	50030	50036
F5	65000	65003	65006	65009	65012	65015	65018

ცხრილი 6.7 (გაგრძელება)

8-Apr-01	9-Apr-01	10-Apr-01	11-Apr-01	12-Apr-01	13-Apr-01	14-Apr-01	15-Apr-01
20089	20086	20083	20080	20077	20074	20071	20068
<b>40040</b>	<b>40035</b>	80053	80033	80040	80047	80054	80061
<b>160063</b>	<b>160072</b>	120081	120090	120078	120066	120054	120042
50042	50048	50043	50038	50033	50028	50023	50018
65021	55024	65019	65014	65009	65004	64999	64994

აღნიშნული ცვლილებები წარმოდგენილია 6.4 ნახაზზე.

ამ ტრაპეციის ფართობი ექვივალენტურია  
ზემოთ ხსენებული ენერჯისა და  
რომელიც მოემატა ფიდერ № 3  
გადართვის შედეგად

ამ ტრაპეციის ფართობი ექვივალენტურია  
ზემოთ ხსენებული ენერჯისა და  
რომელიც მოაკლდა ფიდერ № 2  
გადართვის შედეგად

მიღებული შედეგების მიხედვით შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა% მთავარია ვიცოდეთ თუ როდის მოხდა დაზიანება და გადართვების ზუსტი დრო, რომ ყოველდღიური შესყიდვების პროგრამის საშუალებით გავიგებთ ნებისმიერი რაოდენობის ენერჯის გადადინებას, რაც მოგვცემს იმის საშუალებას, რომ ვიცოდეთ ფიდერზე ზუსტი შესყიდვა, დარიცხვა, ამოღება და რაც მთავარია, დავზოგავთ უდიდეს თანხებს, რომელიც უნდა დახარჯულიყო გადადინებების მრიცხველების დაყენებაზე.



## დასკვნა

ჩატარებული კვლევის შედეგების მიხედვით შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა:

1. ყოველი რეგიონული ქსელისთვის არსებობს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური სიდიდე, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია, ერთი მხრივ მაკომპენსირებელი დანადგარის ხვედრით ღირებულებასა და საექსპლოატაციო ხარჯებზე და, მეორე მხრივ, მოცემულ ქსელში ელ.ენერჯის ტარიფზე და ამ ქსელში მაქსიმალური აქტიური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობაზე;
2. მიღებულია კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური მნიშვნელობის საანგარიშო გამოსახულება, რაც საშუალებას გვაძლევს წინასწარ შევაფასოთ კომპენსაციის პრიორიტეტულობა კვანძების მიხედვით;
3. მიღებულია რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ახალი, მნიშვნელოვნად გამარტივებული მათემატიკური მოდელი, რომელშიც მაქსიმალურად გათვალისწინებულია ამ ამოცანისადმი სისტემური მიდგომის პრინციპი;
4. ქმედების ეფექტურობის თვალსაზრისით ეკონომიკურად მიზანშეწონილია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია უპირველესად განხორციელდეს ელექტრულად უშორეს კვანძში, რომელიც დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის დიდი აბცოლიტური მნიშვნელობით ხასიათდება;

5. განსახილველ რეგიონულ მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის მათემატიკურ მოდელში სისტემური მიდგომის პრინციპი ჩადებულია აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის იმ შემდგენის სახით, რომელიც განპირობებულია მოცემული რეგიონული ქსელისა და სისტემის დანარჩენი ნაწილის ურთიერთკავშირით;
6. მათემატიკურ მოდელში სისტემის დანარჩენი ნაწილის გავლენა გათვალისწინებულია ე.წ. გავლენის კოეფიციენტით, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა 0,20-0,35-ის ფარგლებში იცვლება;
7. მიღებულია საანგარიშო გამოსახულება, რომელიც საშუალებას გვაძლევს რეგიონული მანაწილებელი ქსელისათვის შევადგინოთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის გამარტივებული განტოლებათა სისტემა ელექტრული სისტემის დანარჩენი ნაწილის გათვალისწინებით;
8. ქსელის იერარქიული სტრუქტურის ანალიზის საფუძველზე ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ რაც უფრო დაბლა გადავდივართ იერარქიის ერთი ვერტიკალის გასწვრივ, მით უფრო ნაკლებად არსებითია იერარქიის მეორე ვერტიკალის კვანძების რეაქტიული დატვირთვებისა და ამ დატვირთვების კომპენსაციის გავლენა განსახილველი ვერტიკალის კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდეზე;
9. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით მაკომპენსირებელი დანადგარის მიერთების ადგილად რეკომენდირებულია 6-10/0,38 კვ ძაბვის სატრანსფორმატორო ჯიხურების 6-10 ან 0,38 კვ ძაბვის სალტეები;

10. ცალკე გამოსახულებებითაა მოცემული რადიალურ და მაგისტრალურ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის მათემატიკური მოდელი;
11. მიღებული გამარტივებული მათემატიკური მოდელის გამოყენებისას განტოლებათა სისტემის განზომილება მცირდება რამდენიმე ათეულჯერ და მეტად;
12. მანაწილებელი ქსელების გაუმრიცხველებიან უბნებში კომერციული დანაკარგების შემცირების მიზნით შემოთავაზებულია ახალი მეთოდოლოგია, რაც დისპეტჩერს საშუალებას აძლევს ოპტიმალურად წარმართოს ქსელის მენეჯმენტი.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Александров О.И., Падалко Л.П., Никольская Н.Н. Уменьшение потерь в сложноразветвленной электрической сети путем компенсации реактивных мощностей нагрузок. В. кн: Опыт планирования, анализа потерь энергии и разработки мероприятий по их снижению в энергосистеме. Минск: Высшая школа, 1974, с. 65-71.
2. Арзамасцев Д.А., Игуменцев В.А. Расчет оптимального распределения реактивной мощности методом последовательного эквивалентирования, Электричество, 1976, N1, с. 70-73.
3. Арзамасцев Д.А., Скляр Ю.С. Выбор мощности и размещения компенсирующих устройств в электрической сети. - В кн.: Материалы II республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники, Минск, БПИ, 1968, с. 20-24.
4. Баркая Я.Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях. - М.: Энергия, 1971. - 231 с.
5. Блок В.М. Электрические сети и системы. - М.: Высш. шк., 1986 - 430 с.
6. Боровиков В. А., Косарев В.К., Ходот Г.А., Электрические сети энергетических систем. Л.: Энергия, 1977.
7. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоиздат, 1982.
8. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисев М.С. Регулирование напряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат., 1985.
9. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н. и др. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. - М. Энергоатомиздат, 1983.
10. Временная инструкция по расчету и анализу потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. - М.: ОРГРЭС, 1976. -56 с.

11. Выбор мощности и размещения компенсирующих устройств в энергосистеме / М.И. Мардер, Е.А. Привалов, Р.Н. Шапиро и др. - В кн.: Регулирование напряжения в электрических сетях, М.: Энергия, 1968. с. 455-461.
12. Глазунов А.А., Хиен Нгуен, Строев В.А. Об экономически целесообразной емкостной компенсации в сетях промышленных предприятий. - Электричество, 1968, № 3, с. 6-11.
13. Гремяков А.А., Строев В.А. Определение мощности и размещения конденсаторных батарей в распределительных электрических сетях с учетом режима напряжений. - Электричество, 1976, № 12, с. 1-4.
14. Железко Ю.С. Выбор мощности и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в сложных электрических системах. - Электричество, 1977, № 2, с. 7-11.
15. 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.
16. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах - М.: Энергоиздат, 1981. - 200 с.
17. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии: М.: Энергоатомиздат, 1985.
18. Железко Ю.С. Методика определения оптимального значения реактивной мощности, передаваемой потребителю. - Промышленная энергетика, 1977, №1, с. 49-51.
19. Журавлев В.Г., Арион В.Д. Размещение и выбор источников реактивной мощности в распределительных сетях методом динамического программирования. - Изв. вузов, Энергетика, 1976, № 5, с. 12-16.
20. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. - Киев: Техника, 1975 - 312 с.
21. Идальчик В.И. Электрические системы и сети - М.: Энергоатомиздат, 1989-592 с.

22. Казак Н.А. Техничко-экономический расчет компенсации реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Электричество, 1961, №12. с. 28-31.
23. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. - М.: Энергия, 1975. - 182 с.
24. Карпов Ф.Ф., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий. - М. Энергия, 1970. - 223 с.
25. Каялов Г.М., Ковалев И.Н. Расчет компенсации реактивных нагрузок регулируемыми конденсаторными батареями. - электричество 1971, № 8 с.19-25.
26. Каялов Г.М., Молодцов В.С. Матрично-вычислительный метод анализа компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети - электричество, 1976, № 2, с. 16-22.
27. კიკალიშვილი მ. აქტიური სიძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი. ენერგია 1(3). 2000. გვ. 119-121.
28. კიკალიშვილი მ. რეგიონულ ელექტროქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია. სტუ, სტუდენტთა, მაგისტრანტთა და ასპირანტთა 71-ე ღია სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია. თბილისი. 2002.
29. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей, - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 200 с.
30. Ковалев И.Н. Два метода расчета компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях. - Электричество, 1973, № 10, с. 10-13.
31. Ковалев И.Н. Метод расчета компенсации переменных реактивных нагрузок в электрических сетях. - Известия АН СССР. Сер. энергетика и транспорт, 1973, № 2, с. 79-90.
32. Ковалев И.Н. О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности. Электричество. 1981. № 10, с. 61-64.

33. Ковалев И.Н., Фадеев В.В. Квадратичная математическая модель при исследовании компенсации реактивной мощности, *Электричество*.1984. № 4, с. 7-13.
34. Колесников С.В. Алгоритм расчета оптимального размещения компенсирующих устройств в сложных энергосистемах. - В кн.: *электрические сети и системы*. Львов, Виша школа, 1967, с. 98-103.
35. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Н.А. Мельников, Ф.Ф. Карпов, Солдаткина Л.А. и др. - *Промышленная энергетика*, 1969, № 4, с. 25-30.
36. Махарадзе Г.Т., Буадзе В.В. Компенсация реактивной мощности в локальных электрических сетях, *Сборник научных трудов*, Тбилиси, Изд-во ГТУ, 1990.
37. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკვივალენტირების პრინციპით. *ენერჯია*. 4(12). 1999. გვ. 36-38.
38. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში. *ენერჯია*. 4(16). 2000. გვ. 107-112.
39. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის მათემატიკური მოდელი. *სტუ-ს შრომები (452)*. თბილისი. 2004.
40. Меарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир. 1973.
41. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. - М.: Энергия, 1975. - 128 с.
42. Мельников Н.А., Солдаткина Л.А. О выборе компенсирующих устройств. - *Электрические станции*, 1963, № 9, с 43-47.
43. Мельников Н.А., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях. - М.: Энергия, 1968 - 153 с.

44. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. - М.: Энергия, 1975. - 463 с.
45. Методика определения оптимального значения реактивной мощности, передаваемой в сеть потребителя. - М.: ОРГРЭС. 1976. - 24 с.
46. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, часть 1,2. М. Л. изд. Энергия, 1966, - с 522.
47. Оптимизация входных реактивных мощностей энергосистем. / И.Н. Ковалев, В.Г. Репьев, Е.Ю. Самсонова и др./ Электричество, 1988. № 5, с 7-14.
48. Оптимизация режимов энергетических систем / Под ред. В.М. Синькова, 1-е изд. - Киев. Высшая школа, 1976. - 308 с.
49. Основы построения промышленных сетей / Г.М. Каялов, Э.А.Каджан, И.Н. Ковалев, Э.Г. Курений. М.: Энергия, 1978.
50. Особенности технико-экономических расчетов при выборе оптимального варианта установки дополнительных компенсирующих устройств / В.Г. Холмский, Ю.В. Щербина, В.Н. Сулейманов и др. - В кн.: Электрические сети и системы. Львов: Вища школа, 1966.
51. Пospelов Г.Е., Сыч Н.М., Федин В.Т. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1983. - 112 с.
52. Пospelов Г.Е., Федин В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. - Минск. Высшая школа, 1978.
53. Руководящие указания по повышению коэффициента мощности в установках потребителей электроэнергии. - М.: Госэнергоиздат, 1961 - 20с.
54. Солдаткина Л.А. Электрические сети и системы - М.: Энергия, 1978.
55. Сыч Н.М., Федин В.Т. и др. Экономичность выбора и размещения компенсирующих устройств в энергосистеме, - Электрические станции, 1973, № 8.
56. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. - М.: Энергия, 1974. - 72 с.



- 57.Фадеев В.В. Оптимизация компенсации реактивных мощностей потребителей при проектировании сетей энергосистем, Электрические станции. 1985. № 4, с 40-43.
- 58.Филиппова Т.А. Задачи и методы оптимизации режимов энергосистем. - Новосибирск: НЭТИ, 1973-108 с.
- 59.Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей - М.: Высшая школа, 1975. - 280 с.
- 60.Холмский В.Г., Щенбина Ю.В., Колесников С.В. Решение проектной задачи оптимального распределения реактивных мощностей методом потенциалов затрат. - В кн.: Электрические сети и системы. Львов: Вища школа, 1968. вып. 4. с 6-9.
- 61.Холмский В.Г., Щербина Ю.В. Основы расчета оптимального распределения реактивных мощностей в электрических сетях с помощью ЭЦВМ. - Известия вузов СССР. Сер. энергетика, 1962. N4. с 1-8.
- 62.Электрические системы. Т.П. Электрические сети, Под ред.: В.А. Веникова, М.: Высшая школа, 1971.
- 63.Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов. Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа. 1973. - с.318.