

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

კვალიშვილი მამუკა

მანაწილებელი ელექტრული ქსელების
რეჟიმების ოპტიმიზაცია და მენეჯმენტი

05.14.02 – ელექტროსადგურები, ქსელები, ელექტროენერგეტიკული
სისტემები და მათი მართვა

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის სამეცნიერო
ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი
2006

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ელექტრული სადგურების, ქსელებისა და სისტემების კათედრაზე.

სამეცნიერო ხელძღვანელი:	მანარაძე გურამი	
კანდიდატი	ტექნიკის	მეცნიერებათა
	პროფესორი	
ოფიციალური ოპონენტები:		
დოქტორი	ტექნიკის	მეცნიერებათა
	პროფესორი	
კანდიდატი	ტექნიკის	მეცნიერებათა
	დოცენტი	

დისერტაციის დაცვა შედგება 2006 წლის _____ საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის T 05. სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე

მისამართი: ქ. თბილისი, კოსტავას ქ. 78, VIII სასწავლო კორპუსი, აუდ. 427.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში.

მისამართი: ქ. თბილისი, კოსტავას ქ. 77.

ავტორეფერატი დაიგზავნა 2006 წლის _____

სადისერტაციო საბჭოს სწავლული მდივანი
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. საქართველოში მიმდინარეობს ახალი საზოგადოებრივი სისტემის ფორმირების პროცესი. ქვეყანაში მყარდება პოლიტიკური და სამეურნეო ურთიერთობათა ახალი სისტემა, რომელმაც უნდა შექმნას საქართველოს დამოუკიდებელი არსებობის და მგრადი 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. ამავე დროს, მსოფლიოში მიმდინარე გლობალური პოლიტიკური და ეკონომიური პროცესების ფონზე, საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორს შეუძლია ეფექტიანად ჩაერთოს რეგიონში ენერჯის წარმოების, ტრანსპორტირებისა და მოხმარების პროცესში, აქტიური მონაწილეობა მიიღოს მთელი რეგიონის ეკონომიკური ინტეგრაციისა და პოლიტიკური სტაბილურობის ეკონომიკური პირობების ჩამოყალიბებაში.

ქვეყანაში საბაზრო ეკონომიკის განვითარების თანამედროვე პირობებში აქტუალურია სხვადასხვა ლოკალურ მანაწილებელ ელექტრულ ქსელებში მთელი რიგი ტექნიკური ხასიათის ამოცანათა ურთიერთ დამოუკიდებელი გადაწყვეტა. იმავდროულად, ელექტრულ ქსელში დამოუკიდებელი უწყებრივი ქვედანაყოფების არსებობა აძნელებს სისტემის ყველა საფეხურის ძაბვათა ქსელების ერთდროული გათავალისწინების პრაქტიკულ რეალიზაციას. ეს გარემოება გარკვეულწილად გვაიძულებს უარი ვთქვათ სისტემური მიდგომის პრინციპის სრულმასშტაბოვანი რეალიზაციის კლასიკურ მეთოდებზე და ცნობილი საწყისი ინფორმაციის პირობებში ვისარგებლოთ ეკვივალენტურობის სხვადასხვა მეთოდებით. ასეთი მიდგომა საშუალებას მოგვცემს ადვილად გადავლახოთ ის სიძნელეები, რომლებიც წარმოიშობა მთლიანი ქსელისთვის

კონფიგურაციის, ელემენტთა ელექტრული პარამეტრებისა და სამომხმარებლო კვანძებში დატვირთვების შესახებ სრულყოფილი და საკმარისი ინფორმაციის მიღებასთან დაკავშირებით. იმავდროულად, სისტემური მიდგომის პრინციპზე უარის თქმა გამოიწვევს მნიშვნელოვან ცდომილებას და ასევე ცდომილების შემცველი იქნება დასმული ამოცანის ამონახსნი და შედეგად მისგან გამოწვეული ტექნიკურ-ეკონომიკური ეფექტი.

ასეთი ხასიათისაა მოცემულ რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული

დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა, რომელიც გადაჭარბების გარეშე შეიძლება ითქვას, რომ სასისტემო ხასიათის ამოცანაა.

ეკვივალენტურობის პრინციპი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ამოვხსნათ დასმული ამოცანა ქსელის დანარჩენი ნაწილისგან გამოყოფილად და ამოხსნის შედეგები საკმარისი სიზუსტით მიუახლოვდეს ამოხსნის იმ შედეგებს, რაც მიიღება სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენებისას, დღევანდელი საბაზრო ეკონომიკის პირობებში სადისტრიბუციო ენერგოკომპანიების წარმატებული ფუნქციონირებისთვის მეტად აქტუალური საკითხია.

სამუშაოს მიზანია განსახილველ რეგიონულ მანაწილებელ ქსელში, შედარებით ადვილად მოპოვებადი და აუცილებელი მინიმალურ რაოდენობის საწყისი ინფორმაციის პირობებში, მივიღოთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის გამარტივებული და მნიშვნელოვნად შემცირებული განზომილების მქონე მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტის ამონახსნი. აქედან გამომდინარე ნაშრომში გაანალიზებულია:

- ელექტრული სისტემის იერარქიული სტრუქტურა და ამ სტრუქტურის დონეთა ურთიერთგავლენის ხარისხი;

- ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობათა რაოდენობრივი და ხარისხობრივი თანაფარდობა;
- ქსელის კვანძების მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის შემდგენები და მათი გავლენის ხარისხი დასმული ამოცანის ამოხსნის შედეგებზე;
- ქსელის კვანძებიდან დატვირთვითა გადატანა (ქსელის ეკვივალენტირება) და მისი გავლენა ამოხსნის შედეგებზე;
- პრობლემისადმი სისტემური მიდგომის პრინციპის საფუძველზე მიღებულ განტოლებათა სისტემის ღრმა ანალიზი და მისი განზომილების შემცირება შესაძლებლობა.

ამ და სხვა მრავალ საკითხთა ანალიზმა შესაძლებლობა მოგვცა წარმატებით გადაწყვეტილიყო დისერტაციაში დასმული ამოცანა.

თეორიული კვლევის მეთოდი დაფუძნებულია, ელექტრული სისტემის მკვეთრად ჩამოყალიბებული იერარქიული სტრუქტურული წყობის გათვალისწინებით, დასმული ამოცანის მათემატიკური მოდელის განზომილების შემცირების მიზნით და ამ მოდელის შესაბამისი განტოლებათა სისტემიდან კონრეტული რეგიონული ქსელის მახასიათებელი ძირითადი ბირთვის გამოყოფაზე და მასზე ელექტრული სისტემის დანარჩენი ნაწილის გავლენის კოეფიციენტის დადგენაზე.

თეორიული კვლევის შედეგად მიღებული გამარტივებული მათემატიკური მოდელის გამოყენებისას დასმული ამოცანის ამოხსნის შედეგები. მათი სიზუსტის შემოწმების მიზნით, შედარდა სისტემური მიდგომის პრინციპის სრულმასშტაბოვანი გათვალისწინებისას მიღებული ამონახსნთა შედეგებს. შედარების შედეგებმა დაადასტურა დისერტაციაში მიღებული მათემატიკური მოდელის სრულფასოვნობა და მისი პრაქტიკაში რეალიზაციის მიზანშეწონილობა.

მეცნიერული სიახლე. დისერტაციაში, არსებული სამეცნიერო-ტექნიკური ლიტერატურიდან განსხვავებით, პირველად დაისვა და დადებითად გადაწყდა ამოცანის მიმართ არსებითი და ნაკლებად არსებითი საწყის ინფორმაციათა მკვეთრი გამიჯვნა და მათი ურთიერთგავლენის კოეფიციენტის დადგენის საკითხი.

სამომხმარებლო კვანძების რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ხარისხის კოეფიციენტზე დაყრდნობით მიღებული იქნა ახალი გამარტივებული მათემატიკური მოდელი, რომლის გამოყენებით მინიმალური რაოდენობის საწყისი ინფორმაციის პირობებში შესაძლებელია საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტის ამონახსნის მიღება. პრაქტიკულად გამორიცხულია განსახილველ რეგიონული ქსელისთვის ძნელად მოსაპოვებელი, ნაკლებად სარწმუნო და ნაკლებად არსებითი ინფორმაციის შეგროვების აუცილებლობა.

პრაქტიკული ღირებულება. ნაშრომში მიღებულია საანგარიშო გამოსახულება რომელიც საშუალებას გვაძლევს რეგიონული მანაწილებელი ქსელისთვის შევადგინოთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის განტოლებათა სისტემა, სადაც ელექტრული სისტემის დანარჩენი ნაწილი გათვალისწინებულია ე.წ. გავლენის კოეფიციენტის საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს მოცემული რეგიონული ქსელის მკვებავი კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის შემდგენს, გამოწვეულს სისტემის დანარჩენი ნაწილის რეაქტიული დატვირთვით.

ყველა საანგარიშო გამოსახულება, სხვადასხვა საწყისი პირობებისას, ჩაწერილია იმ ფორმით, რაც მოხერხებულია პრაქტიკული სარგებლობისათვის.

სამუშაოს შედეგების დანერგვა დისერტაციაში მიღებული მათემატიკური მოდელის საფუძვლზე საქართველოს ენერგოსისტემის

მანაწილებელი კომპანიის “ეი-ი-ეს თელასის” რეგიონულ ქსელში, კერძოდ ქს “დ. ნავთლუდის” 35-110 კვ ძაბვის მანაწილებელ ქსელში, ამოხსნილი იქნა რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა.

ამ ამოცანის შესაბამისი განტოლებათა სისტემის შესადგენად სასისტემო პარამეტრებიდან ვისარგებლებთ მხოლოდ ქს “დ. ნავთლუდის” 220 კვ ძაბვის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდითა და ამ კვანძის საკუთარი წინაღობით. დანარჩენი საწყისი ინფორმაცია აღებული იქნა თვითონ ამ მანაწილებელი ქსელის მონაცემების მიხედვით. ამით მკვეთრად შემცირდა განტოლებათა სისტემის განზომილება და საწყისი ინფორმაციის მოცულობა.

სამუშაო აპრობაცია მეცნიერული კვლევით მიღებული შედეგები მოხსენებული იყო საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში სტუდენტთა, მაგისტრანტთა და ასპირანტთა 71-ე ღია სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (აპრილი, 2003 წ.) და რესპუბლიკურ სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (აპრილი, 2003 წ.). ამ კონფერენციებზე გაკეთებული მოხსენება შეფასებული იქნა სპეციალური სიგელით.

სამუშაოს მთელი რიგი საკითხები მოსმენილი იქნა სტუ-ს ელექტრული სადგურების, ქსელების და სისტემების კათედრაზე (2001-2003 წწ.) და «ეი-ი-ეს თელასის» (თებერვალი, 2004 წ.) და UEDC (მარტი, 2004 წ.) სადისტრიბუციო კომპანიების ტექნიკურ საბჭოზე.

სამუშაოს პუბლიკაცია. დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებული არის 5 სამეცნიერო სტატიაში.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. ნაშრომი შედგება: შესავალი, ექვსი თავი, დასკვნა და გამოყენებული ლიტერატურა, რომელიც მოიცავს 63 დასახელებას. დისერტაციის ძირითადი ტექსტი მოიცავს 151 კომპიუტერულად ნაბეჭდ გვერდს, 38 ნახაზსა და 24 ცხრილს.

სამუშაოს მოკლე აღწერა

შესავალში ყურადღება გამახვილებულია საბაზრო ეკონომიკის განვითარების თანამედროვე პირობებში ელექტრული სისტემის ცალკეულ რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებში ტექნიკური ხასიათის ამოცანათა ურთიერთ დამოუკიდებელი გადაწყვეტის აქტუალობაზე. კერძოდ, ქსელში გადასაცემი რეაქტიული სიმძლავრის ეკონომიკურად დასაბუთებულ მნიშვნელობამდე დაყვანის ეკონომიკურ ეფექტურობაზე.

პირველ თავში გაანალიზებულია ცვლადი დენის წრედში მიმდინარე ენერგეტიკული პროცესები და ელექტრულ სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის თავისებურებანი, როგორც აქტიური სიმძლავრის გადაცემის თანმდევი მოვლენა. რეაქტიული სიმძლავრე პრაქტიკულად მოხერხებული ფორმაა ცვლადი დენის წრედში გარდამავალი პროცესების მიმდინარეობის ანალიზის თვალსაზრისით.

როგორც ცნობილია, ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის პირობებშიც კი ადგილი აქვს რეაქტიული სიმძლავრის გარკვეულ დეფიციტს, რომლის დასაბალანსებლად საჭიროა ქსელში მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება. რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადების ცვლილება შესაძლებელია სწორედ ამ მაკომპენსირებელი დანადგარების მეშვეობით. ამასთან ეს დანადგარები სასურველია იყოს რეგულირებადი მომხმარებელთა მუშაობის რეჟიმის ცვლილებასთან შესაბამისობაში.

ენერგოსისტემა, რომელიც დეფიციტურია აქტიური სიმძლავრის მიხედვით, იგი დეფიციტურია რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვითაც. თუ აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის აღმოფხვრა მისაღებია მეზობელი ენერგოსისტემიდან იმპორტის გზით, რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტის

აღმოფხვრა ამ გზით აშკარად არაეფექტურია და იგი უნდა აღმოიფხვრას მოცემულ სისტემაში რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენებით, რომელთა შერჩევა და განლაგება უნდა მოხდეს მათი მაღალ- ეფექტურად გამოყენების საფუძველზე.

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

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს ქსელში ძაბვისა და აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების რეგულირების თვალსაზრისით. ამ თვალსაზრისით უფრო მოხერხებულია რეგულირებადი მაკომპენსირებელი დანადგარები სინქრონული კომპენსატორები, კონდენსატორთა ბატარეები და მაშუნტებელი რეაქტორები.

კომპენსატორები რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის თვალსაზრისით ქსელში ძაბვის ცვლილებისას დადებითი მარეგულირებადი ეფექტით ხასიათდებიან, მაშინ როცა არარეგულირებად კონდენსატორთა ბატარეებს უარყოფითი მარეგულირებადი ეფექტი ახასიათებს, თუმცა ამ უკანასკნელთა მონტაჟი და ექსპლუატაცია შედარებით უფრო მარტივია და ასევე შედარებით ნაკლებ აქტიურ სიმძლავრეს მოითხოვენ ქსელიდან.

მიუხედავად გარკვეული უარყოფითი მხარეებისა მანაწილებელ ქსელში კონდენსატორთა ბატარეა უფრო ფართოდ გამოიყენება, ვიდრე სინქრონული კომპენსატორები, რადგანაც მათი დაყენება შეიძლება:

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

მეორე თავში გაანალიზებულია ელექტრული ქსელის განსახილველი კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ცალკეული შემდგენები, გამოწვეული შესაბამისად მოცემული კვანძისა და ქსელის დანარჩენი კვანძების დატვირთვებით:

$$\sigma_i = \sigma_i^1 + \sigma_i^{ii},$$

სადაც:

$$\sigma_i^1 = \frac{2}{U_n^2} R_{ii} Q_i \quad \text{და} \quad \sigma_i^{ii} = \frac{2}{U_n^2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n R_{ij} Q_j$$

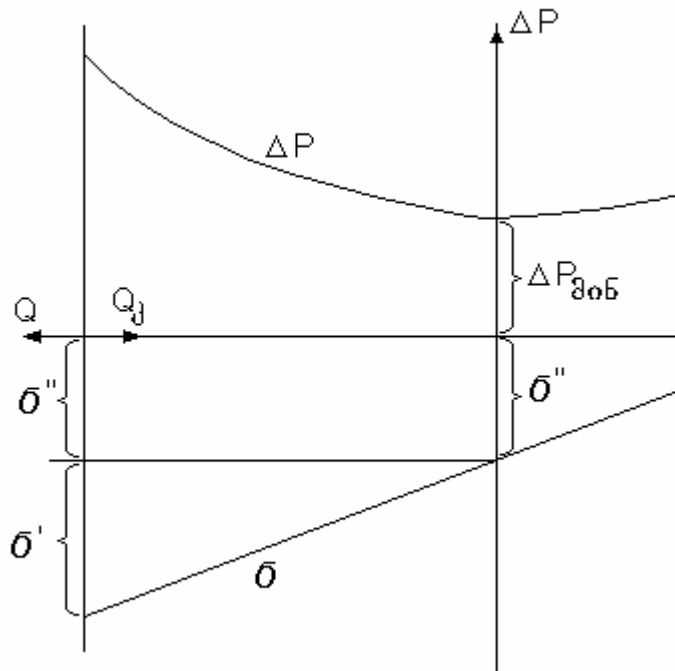
ელექტრულ ქსელში კვანძური დატვირთვების მიხედვით აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულებას აქვს სახე

$$\Delta P = \frac{1}{U_n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j)$$

ამ გამოსახულებაში კვანძის გენერაცია აიღება “პლუს” ნიშნით, დატვირთვა კი “მინუს” ნიშნით.

ამ შეთანხმების მიხედვით $\Delta P(Q_i)$ ფუნქციონალურ დამოკიდებულებას აქვს ნახაზ 1-ზე ნაჩვენები სახე, რომელიც გვიჩვენებს i -ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კონპენსაციის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ხასიათს.

ამ დროს უცვლელი რჩება დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის σ_i^{ii} შემდგენი, ხოლო σ_i^1 შემდგენის აბსოლიტური მნიშვნელობა მცირდება კომპენსაციის პროპორციულად და იგი ნულის ტოლი ხდება კვანძში რეაქტიული დატვირთვის სრული კომპენსაციის შემთხვევაში. σ_i^1 შემდგენის შემცირება კვანძის საკუთარი წინაღობის პროპორციულია.



ნახ. 1

სწორედ ამ კანონზომიერების საფუძველზე ჩამოყალიბებულია ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის გამარტივებული მათემატიკური მოდელი, რომელიც განხილულია დისერტაციის მე-5 თავში.

როგორც წარმოდგენილი გრაფიკიდან ჩანს (ნახ. 1) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის მიზანშეწონილობა უნდა ვეძებოთ იმ კვანძებისთვის, სადაც აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის აბსოლუტური მნიშვნელობა უდიდესია და ამასთან მაღალია ამ კვანძის საკუთარი წინაღობა.

თუ არ გავითვალისწინებთ მაკომპენსირებელი დანადგარის შეძენის, მონტაჟისა და ექსპლუატაციის ხარჯებს, მაშინ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით ეფექტურია რეაქტიული დატვირთვის სრული კომპენსაცია, ქსელის ყველა კვანძში. რადგანაც ყოველი ტექნიკური დანადგარი, და მათ შორის მაკომპენსირებელიც, მოითხოვს მნიშვნელოვან კაპიტალურ და საექსპლუატაციო ხარჯებს, მოცემული კონკრეტული ქსელის შემთხვევაში იარსებებს დანაკარგების ფარდობითი

ელექტროენერგეტიკის სამეცნიერო-ტექნიკური კომპლექსის განუყოფელ ნაწილს წარმოადგენს რეაქტიული დატვირთვის რაციონალური კომპენსაცია, რადგანაც ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსიდან გამომდინარე საჭიროა თითქმის მისი ერთი მესამედი გენერირდებოდეს მომხმარებელთა ახლოს დაყენებული მაკომპენსირებელი დანადგარების მიერ.

აღნიშნულ სფეროში მრავალწლიანი გამოკვლევები მიმართული იყო დასმული ამოცანის განზომილების შემცირებისა და ცალკეული ქვესისტემების საინფორმაციო დაშორიშორების გადალახვაზე, რაც განპირობებულია ამ ქვესისტემების უწყებრივი დაქვემდებარებულობით და ქსელის მუშაობის რეჟიმის მიხედვით საწყისი საანგარიშო ინფორმაციის შეგროვების სხვადასხვა შესაძლებლობებით.

აღნიშნული მიმართულებით კვლევის ყველა ამჟამად არსებული რეზულტატები, როგორც ეს ხაზგასმულია ნაშრომში Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей, - М.: Энергоатомиздат, 1990, პირობითად შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად, რომელთაგანაც პირველს მიეკუთვნება ცალკეული ქვესისტემების ეკვივალენტირების მეთოდები და მეორეს კი ე.წ. პარციალური გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც განსხვავებული მიდგომაა.

Ю.С. Железко თავის ნაშრომში Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии, М.: Энергоатомиздат, 1985, რეკომენდაციას იძლევა ენერგოსისტემის სისტემაწარმომქნელი ქსელის ზემალაღი ძაბვის ხაზების ძირითად ქსელთან მიერთების კვანძებში მოცემულად ჩაითვალოს $P(t)+jQ(t)$ გრაფიკი, რომელიც განსაზღვრული იქნება დამოუკიდებელი გაანგარიშებით. ამ მეთოდით შესაძლებელი ხდება 110-500კვ ძაბვის ენერგოსისტემაში შემავალი ყოველი მანაწილებელი ქსელის რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმიზაციის შემდეგ განისაზღვროს ჯამური შემავალი რეაქტიული სიმძლავრე Q_p , რომლის შემდეგ ისმება დამოუკიდებელი

ამოცანა მოცემული მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის Q_3 სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების შესახებ.

რიგი ავტორებისა თვინათ შრომებში რეკომენდაციას იძლევიან მანაწილებელი ქსელი შეიცვალოს ეკვივალენტური აქტიური წინაღობით, რომელიც გამოითვლება სიმძლავრის ცნობილი დანაკარგების მიხედვით. სხვა მკვლევართა აზრით 6-35კვ ძაბვის ქსელებში შესაძლებელია უფრო მარტივი ეკვივალენტირება. კერძოდ, აღნიშნული ძაბვის ქსელის ეკვივალენტური წინაღობა შეიძლება მივიღოთ სქემის ხის შტოების წინაღობათა მიმდევრობითი და პარალელური შეკრების გზით. ავტორები თავინათ მეთოდს პარციალურს უწოდებენ, რომელიც ვრცელდება 6-10კვ ძაბვის შედარებით მოკლე რადიალურ და მაგისტრალურ ხაზებზე, რაც უფრო დამახასიათებელია სამრეწველო ქსელებისთვის. [Основы построения промышленных сетей/ Г.М. Каялов, Э.А. Каджан, И.Н. Ковалев, Э.Гю Курений. М.: Энергия, 1978]. ეს მეთოდი გულისხმობს რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ამოცანის ლოკალიზაციას.

არსებულ სამეცნიერო-ტექნიკურ ლიტერატურაში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის დასმის ყველაზე უფრო გავრცელებულ ვარიანტში მიზნის ფუნქცია ფორმულირდება დაყვანილი ხარჯების სახით და განიხილება ამ ფუნქციის მინიმიზაციის საკითხი. ამოცანის დასმის სხვა ვარიანტში მოცემულად მიიღება მაკომპენსირებელი დანადგარების ჯამური სიმძლავრე და ამ შემთხვევაში ამოცანა განიხილავს ამ სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების საკითხს ქსელის კვანძებს შორის.

რიგი ავტორები (Арзамасцев Д.А., Скляр Ю.С.) გვთავაზობს ამოცანა განვიხილოთ იმ დაშვებით, რომ ტექნიკური თუ სხვა ინჟინრული მოსაზრებების საფუძველზე, მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების ადგილები მოცემულია. ამ შემთხვევაში ამოცანის ამოხსნა განიხილება კოორდინატული დაშვების სვლის მეთოდით.

ზოგიერთი ავტორის (Каялов Г.М., Молодцов В.С.) მიერ კვადრატული პროგრამირების მათემატიკურ ამოცანაზე დაყრდნობით შემოთავაზებულია მატრიცულ-გამოთვლითი მეთოდი მაკომპენსირებელი დანადგარებიანი ელექტრული სისტემის რეჟიმის ამსახველი განტოლებების რთული სისტემის ამოხსნის პროცედურა შეიცვალოს ამ დანადგართა სიმძლავრის ოპტიმალური მნიშვნელობების გამოთვლით მზა მატრიცული ფორმულების გამოყენებით.

შედარებით წარმატებულ სპეციალურ მეთოდს წარმოადგენს ხარჯების პოტენციალთა მეთოდი, რომელიც განიხილება რიგი ავტორების ნაშრომებში (Меарович М., Мако Д., Такахара И., Холмский В.Г., Щербина Ю.В. და სხვ.). აქ ამოცანის ამოხსნისას განიხილება ენერგოსისტემის ქსელის პირობითი სქემა, რომელიც შეიცავს ქსელის ელემენტების მხოლოდ აქტიურ წინაღობებს და კვანძების საანგარიშო რეაქტიულ დატვირთვებს.

ავტორები Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. და Федин В.Т. გვთავაზობენ პრობლემის გადაწყვეტისთვის გამოვიყენოთ ე.წ. კრიტერიალური მეთოდი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს განვსაზღვროთ მაკომპენსირებელი დანადგარების არა მარტო სიმძლავრე და დაყენების ადგილები, არამედ მათი დაყენების რაციონალური რიგითობაც.

რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის პრობლემისადმი შემოთავაზებული ყველა მეთოდი და მიდგომა ხასიათდება როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მხარეებით და მეტნაკლები წარმატებით გამოიყენება ამა თუ იმ დანიშნულებისა და კონფიგურაციის ელექტრულ ქსელებში.

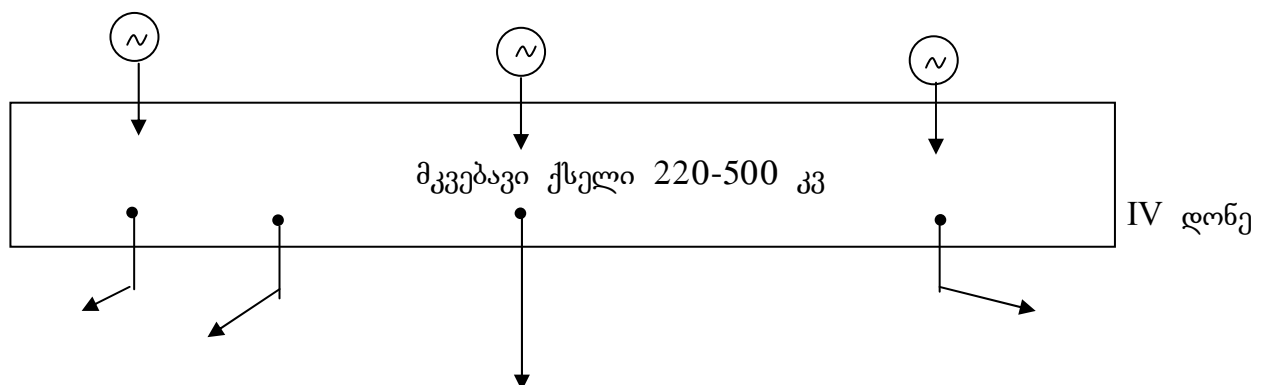
მეოთხე თავში განხილულია ელექტრული სისტემის იერარქიულობა და რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნისადმი მიდგომის თავისებურება. აქ ენერგოსისტემის ვერტიკალური იერარქიული სტრუქტურის მიხედვით შედგენილი ჩანაცვლების ერთიანი სქემის გათვალისწინებით ისმება რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური

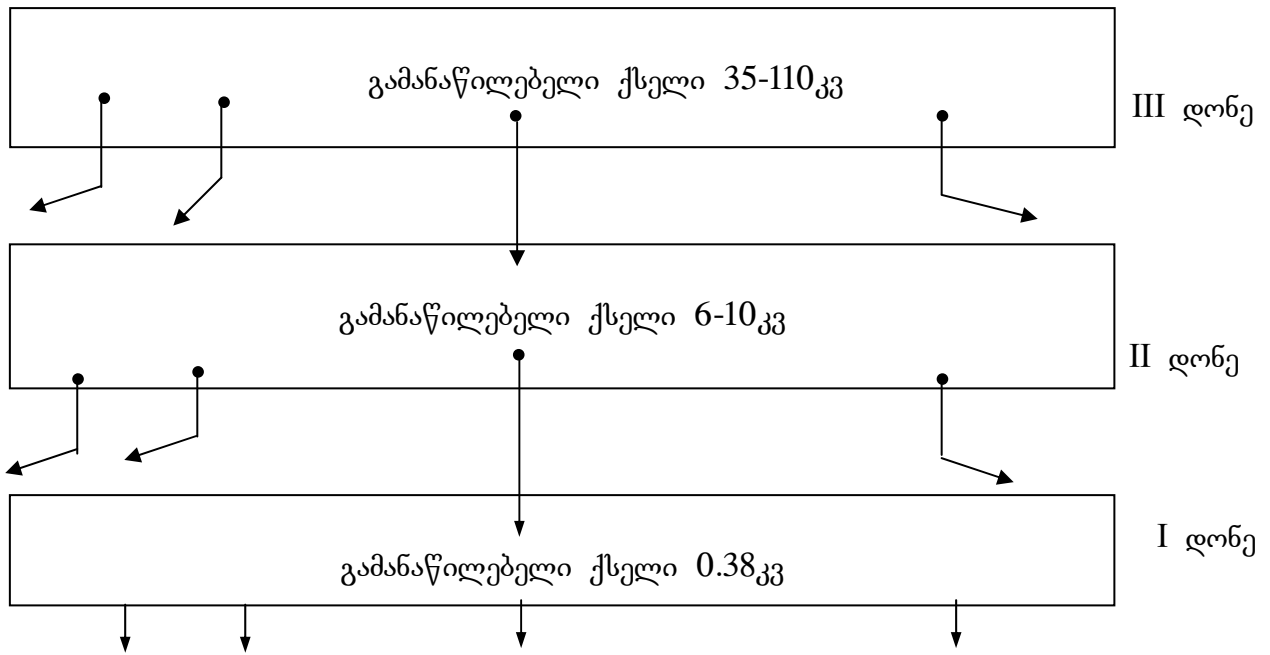
კომპენსაციის გლობალური ამოცანა და გამოკვლეულია ამ ამოცანის დეკომპოზიციის შესაძლებლობა, რაც საშუალებას გვაძლევს პრობლემა განხილულ იქნეს ცალკეული, შედარებით მარტივი, ლოკალური ამოცანების სახით.

ელექტრული სისტემა ქსელის ძაბვების მიხედვით დაყოფილია ოთხ იერარქიულ ვერტიკალურ დონედ (ნახ. 3):

ამ დაყოფისას იგულისხმება, რომ k დონის ქსელს ელექტრული კავშირი აქვს მის ზემდგომ $k+1$ დონის ქსელის მხოლოდ ერთ კვანძთან. იერარქიის IV დონეზე განთავსებულია ძირითადი წყაროები, რომელთაგანაც ნებისმიერი შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც მახალანსირებელი კვანძი.

პრობლემისადმი ასეთი მიდგომისას III და უფრო დაბალი დონის მანაწილებელ ავტონომიურ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია გარკვეული ხარისხით გავლენას ახდენს მკვებავ ქსელში სიმძლავრეთა გადანაწილებაზე და, შესაბამისად, დანაკარგების შეფასების თვალსაზრისით გლობალური ხასიათის ამოცანის ამოხსნისას საჭიროა შეფასებული და გათვალისწინებული იქნეს ეს გავლენა. კერძოდ, ვერტიკალურ სტრუქტურაში მდებარე III, II და I დონეების ავტონომიურ ქსელებში უფრო ზუსტი ამოცანის ამოხსნის მისაღებად დამატებით უნდა იქნეს გათვალისწინებული მკვებავი ქსელის სხვა კვანძებში მიერთებულ ავტონომიურ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის β ხარისხი.





ნახ. 3

- 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

იერარქიული სტრუქტურის გათვალისწინებით რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა შეიძლება დასმული იქნეს სხვადასხვა სახით, იმის და მიხედვით ქსელის რომელი დონის კვანძებში გვსურს მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება და მოცემულია თუ საძიებელია კვების წყაროების რეაქტიული გენერაცია. ამ ამოცანათა რაოდენობა შეადგენს რვას, რომელთაგანაც ყველაზე უფრო გლობალურად მიიჩნევა IA ამოცანა, რადგანაც ამ დროს ვერტიკალური იერარქიის გასწვრივ ყველა დონეზე დადგენილი იქნება მაკომპენსირებელი დანადგარების ოპტიმალურ სიმძლავრეთა მნიშვნელობები და ამასთან განისაზღვრება გენერაციის წყაროების ოპტიმალური რეაქტიული დატვირთვები.

იერარქიის	კვანძები,	სადაც	კვების	ამოცანის
-----------	-----------	-------	--------	----------

დონე	გათვალისწინებულია მაკომპენსირებელი და დაყენება	დანადგარის წყაროების რეაქტიული გენერაცია	ინდექსი
I	A_I, B_I, \dots, M_I	საძიებელია მოცემულია	I A I B
II	$A_{II}, B_{II}, \dots, M_{II}$	საძიებელია მოცემულია	II A II B
III	$A_{III}, B_{III}, \dots, M_{III}$	საძიებელია მოცემულია	III A III B
IV	$A_{IV}, B_{IV}, \dots, M_{IV}$	საძიებელია მოცემულია	IV A IV B

A სახის ამოცანისას ოპტიმიზაციის განტოლებათა სისტემას აქვს სახე

$$\frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f, \delta}} = \alpha \quad f=1, 2 \dots n_{\text{ფ}}$$

$$\frac{\partial \Delta P(Q)}{\partial Q_{f, \beta}} = 0 \quad f= n_{\text{ფ}}+1, n_{\text{ფ}}+2 \dots n_{\text{ფ}}+n_{\beta}-1$$

$$\sum_{f=1}^{n_{\text{ფ}}} (Q_f + Q_{f_k}) + \sum_{f=n_{\text{ფ}}+1}^{n_{\text{ფ}}+n_{\beta}} Q_{f_{\beta}} + \Delta Q = 0,$$

ხოლო B სახის ამოცანისას, როცა ელექტროსადგურების რეაქტიული დატვირთვები ცნობილია, გვაქვს

$$\frac{\partial \Delta \rho(Q)}{\partial Q_{f, \delta}} = \alpha \quad f=1, 2 \dots n_{\text{ფ}}$$

$$\sum_{f=1}^{n_{\text{ფ}}} (Q_f + Q_{f_k}) + \sum_{f=n_{\text{ფ}}+1}^n Q_{f_{\beta}} + \Delta Q = 0$$

სადაც, $n_{\text{ფ}}$ n_{β} – შესაბამისად, რეაქტიული დატვირთვის და გენერაციის კვანძების რაოდენობა; $n = n_{\text{ფ}} + n_{\beta}$ – ქსელში კვანძების საერთო რაოდენობა, a აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის ოპტიმალური მნიშვნელობა

$$a = -\frac{1}{\tau} \left[\frac{(E_{\text{ვ}} + \alpha) K_0}{C_0} + \Delta P_{\delta} \% \cdot T_0 \cdot 10^{-2} \right]$$

აქ: τ მაქსიმალური დანაკარგების დრო, სთ;

E_c – მაკომპენსირებელი დანადგარის პირველდაწყებითი კაპიტალური ხარჯების გამოსყიდვის ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტი;

α – დანადგარის ამორტიზაციის, რემონტისა და მომსახურების ხარჯები ფარდობით ერთეულებში;

K_0 – ამ დანადგარის ხვედრითი ღირებულება;

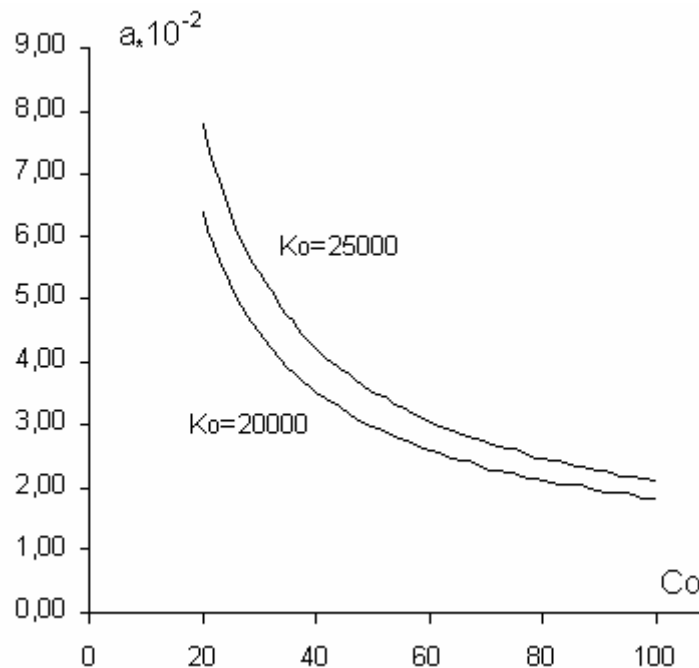
$\Delta p, \%$ – ამავე დანადგარში აქტიური სიმძლავრის კარგვები პროცენტობით;

T_0 – ამ დანადგარის ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლიობა, სთ;

C_0 – ელექტროენერგიის ტარიფი ძაბვის მოცემულ საფეხურზე, ლარი/მგვტსთ.

$a = f(K_0, C_0)$ დამოკიდებულების სამაგალითო გრაფიკი მოცემულია მე-4

ნახაზზე



ნახ. 4

მეხუთე თავი. როგორც აღვნიშნეთ, რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის პრობლემა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულადაც მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს.

ამ თავში ჩამოყალიბებულია მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას

გვაძლევს დასმული ამოცანა წარმოვადგინოთ შედარებით მარტივ ფორმაში და ამასთან მაქსიმალურად უზრუნველვყოთ მიზნის ფუნქციის საკმარისი სიზუსტით ფორმირება.

დადგენილია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გლობალური ამოცანის გამარტივების საფუძვლები:

1. ქსელის იერარქიული სტრუქტურის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ იერარქიის ერთი ვერტიკალის გასწვრივ რაც უფრო დაბლა გადავდივართ, მით უფრო ნაკლებად არსებობს მეორე ვერტიკალური იერარქიის კვანძების დატვირთვებისა და კომპენსაციის გავლენა განსახილველი ვერტიკალის კვანძებში დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდეზე;
2. იერარქიის IV დონეზე, სადაც ენერგოგადაცემის ხაზები პრაქტიკულად ყოველთვის დატვირთულია ნატურალურ სიმძლავრეზე ნაკლები ტვირთით, ხაზების მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია თითქმის ყოველთვის ჭარბობს ამავე ხაზებში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგებს და შედეგად იერარქიის ამ დონეზე გვაქვს ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრე, რაც რიგ შემთხვევაში გაკომპენსირებული უნდა იქნეს მაშუნტებელი რეაქტორებით, აქედან გამომდინარე გვაქვს საკმარისი საფუძველი, რათა აღნიშნული ამოცანის დასმისას მახალანსირებელ კვანძად პირობითად ავირჩიოთ განსახილველი ვერტიკალური სტრუქტურის IV დონესთან დამაკავშირებელი კვანძი;
3. ვერტიკალური იერარქიის I დონე ეს არის 0.38 კვ ძაბვის დამოუკიდებელი ღია ქსელი, რომლის $6-10/0.38$ კვ ძაბვის სატრანსფორმატორო ჯიხურებიდან იკვებება 0.38 კვ ძაბვის ერთფაზა მომხმარებლები, ხოლო მაღალი ძაბვის (6-10) კვ სალტეებიდან კი

როგორც ანგარიშის ანალიზმა გვიჩვენა 0,38 კვ ერთფაზა მომხმარებლებთან ერთფაზა მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენებით ეკონომიკური ეფექტი იმდენად უმნიშვნელოა, რომ მისი გაუთვალისწინებლობა ამოცანის ამოხსნის შედეგებზე პრაქტიკულად გავლენას ვერ მოახდენს. ამდენად მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების ადგილად მივიჩნევთ 6-10 კვ მანაწილებელი ქსელის 6-10/0,38 კვ ძაბვის სატანსფორმატორო ჯიხურების სალტებს;

4. როგორც ვიცით მახალანსირებელი კვანძის მიმართ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი ნულის ტოლია, რის გამოც, ჩვენს შემთხვევაში, IV დონე და მასთან მიერთებული დანარჩენი ვერტიკალური იერარქიული დონეები გათვალისწინების მიღმა აღმოჩნდება. ანუ განუხორციელებელი იქნება პრობლემისადმი სისტემური მიდგომის პრინციპი. ამის თავიდან აცილების მიზნით განსახილველი ვერტიკალური სტრუქტურის IV დონესთან მიერთების კვანძი განიხილება პირობით მახალანსირებელ კვანძად, რომლის მიმართ ენერგოსისტემის IV დონის ქსელის არსებობა გათვალისწინებული იქნება ამ კვანძის საკუთარი R_{KK} წინაღობის და დანაკარგების σ_K ფარდობითი ნაზრდის საშუალებით, რომელიც გამოითვლება მკვებავ ქსელში მიღებული მახალანსირებელი კვანძის მიმართ.

ამრიგად, ყველა ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის დასმისას დასაშვებია განვიხილოთ ვერტიკალური იერარქიის III და II დონე და, მასთან, საინჟინრო გაანგარიშებისთვის საკმარისი სიზუსტით შენარჩუნებული იქნება ამოცანის ამოხსნისთვის სისტემური მიდგომის

პრინციპი. აღნიშნულის საფუძველზე მიღებული მათემატიკურ მოდელს აქვს სახე:

$$\sum_{j=1}^K R_{ij} Q_{jk} = -\sum_{j=1}^K R_{ij} Q_j - [(1-\beta)\sigma_K'' - a] \frac{U_n^2}{2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

სადაც:

$$\sigma_K'' = \sigma_K - \sigma_K' = \sigma_K - \frac{2}{U_6^2} R_{KK} \cdot Q_{K\Sigma};$$

$$R_{ij} = R_{KK} + R_{ij}';$$

i, j – განსახილველი რეგიონული მანაწილებელი ქსელის კვანძის ნომრები;

K – ამავე ქსელის კვანძების საერთო რაოდენობა მისი IV დონესთან მიერთების K -ური კვანძის ჩათვლით;

R_{ij}' – ამ რეგიონული ქსელის საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობა, გამოთვლილი K -ური კვანძის მიმართ;

σ_K – აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი IV დონის მაბალანსირებული კვანძის მიმართ;

σ_K'' – აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის შემდგენი განპირობებული IV დონის და მასთან მიერთებული დანარჩენი რეგიონული ქსელის კონფიგურაციითა და კვანძური რეაქტიული დატვირთვებით;

β – რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ხარისხი დანარჩენ რეგიონულ ქსელში.

ამავე თავში შედგენილია დაბალი და საშუალო ძაბვის (6-35კვ) მაგისტრალური და რადიალური ქსელებისთვის რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის გამარტივებული მათემატიკური მოდელი.

ამავე თავში ზოგადად ნაჩვენებია შეკრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის განტოლებათა სისტემის ამოხსნის იტერაციული პროცესი, რომლის მიხედვით დადგენილია კომპენსაციის რიგითობა კვანძების მიხედვით.

მეექვსე თავი მთლიანად ეძღვნება მანაწილებელი ქსელის მენეჯმენტის, კერძოდ, კომერციული დანაკარგების შემცირების საკითხებს.

ქსელში კომერციული დანაკარგების შემცირების ერთერთი გზაა ელექტროენერჯის დატაცების წინააღმდეგ ბრძოლა. დისერტაციაში შემოთავაზებული მეთოდოლოგია საშუალებას იძლევა მანაწილებელი ქსელის დისპეტჩერისთვის წინასწარ შემუშავდეს გაუმრიცხველებთან უბნებზე ფიდერების ჩართვა-გამორთვის გრაფიკი, რათა მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი კომერციული დანაკარგები.

დასკვნა

ელექტრული სისტემის მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის შედეგები გავლენას ახდენს მთლიანად ელექტრული სისტემის თითქმის ყველა ელემენტის მუშაობის რეჟიმზე. ასეთი ხასიათის ამოცანის ამოხსნა სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენების გარეშე გარკვეულ ცდომილებებს იწვევს, ხოლო სისტემის ყველა საფეხურის მახვათა ქსელების ერთდროული გათვალისწინება პრაქტიკულად შეუძლებელია. რის გამოც აუცილებელი ხდება ვისარგებლოთ ეკვივალენტირების სხვადასხვა მეთოდებით. წინამდებარე ნაშრომში შემოთავაზებულია ეკვივალენტირების პრინციპულად განსხვავებული მეთოდი.

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.ენერგიის 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

4. ქმედების ეფექტურობის თვალსაზრისით ეკონომიკურად მიზანშეწონილია რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია უპირველესად განხორციელდეს ელექტრულად უშორეს კვანძში, რომელიც დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდის დიდი აბსოლუტური 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 სალტები;
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.

სადისერტაციო თემაზე გამოქვეყნებული შრომები:

1. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკვივალენტურობის პრინციპით. ენერჯია. 4(12), 1999.
2. კიკალიშვილი მ. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზრდი. ენერჯია. 1(13), 2000.
3. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში. ენერჯია, 4(16). 2000.
4. კიკალიშვილი მ. რეგიონულ ელექტროქსელში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია. სტუ, სტუდენტთა, მაგისტრანტთა და

5. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეგიონულ მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის მათემატიკური მოდელი. სტუ-ს შრომები. 2(452). თბ. 2004.