

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დავით ჯაფარიძე

რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური

შერჩევა ელექტროსისტემაში

ინჟინერიის (0719) დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი, 2022 (წელი)

ნაშრომი შესრულდა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციების დეპარტამენტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ომარ ზივზივამე, პროფესორი  
(სახელი, გვარი, სამეცნიერო ხარისხი)

რეცენზენტები: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
(სახელი, გვარი, სამეცნიერო ხარისხი, სპეციალობის შიფრი)

დისერტაციის დაცვა შედგება \_\_\_\_\_  
(თარიღი და დრო)

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილ სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე. მისამართი: 4600. ქუთაისი. თამარ მეფის ქ.59, I კორპუსი აუდ. №1114.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო

უნივერსიტეტის სამეცნიერო ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600. ქუთაისი. თამარ მეფის ქ.59.

ავტორეფერატი დაიგზავნა „ \_\_\_\_\_ ”  
(თარიღი)

სადისერტაციო საბჭოს

მდივანი \_\_\_\_\_ / ნ. სახანბერიძე /  
(ხელმოწერა)

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში არსებობს არაერთი პრობლემა და გამოწვევა, რომელიც მოითხოვს მის ოპტიმალურ გადაჭრას, მათგან ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გახლავთ რეაქტიული სიმძლავრე და მასთან დაკავშირებული ძირეული საკითხები. მოცემული სადისერტაციო ნაშრომი კი სწორედ ამ საკითხს ეხება და სახავს ეფექტურ გზებს დასმული ამოცანის გადასაჭრელად.

**თემის აქტუალობა:** ელექტრულ ქსელში სიმძლავრეთა ნაკადგადადინების მნიშვნელოვანი ზრდის კვალდაკვალ ღრმავდება საკონტროლო კვანძებში ძაბვის პრობლემები და უმეტეს შემთხვევებში მანაწილებელი ქსელის კვანძებში ძაბვის რეგულირების ერთ-ერთი მთავარი გზა რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ხდება.

მაღალი და ზემდაღალი ძაბვის ელექტრული ქსელის განვითარებამ ერთისმხრივ ქვეყნის ენერგოსისტემის მსხვილ კვანძებს შორის გაზარდა სიმძლავრეთა ნაკადგადადინების შესაძლებლობები, თუმცა მეორესმხრივ სისტემაწარმომქნელ ქსელში გამოიწვია რეაქტიული სიმძლავრის დიდი სიჭარბე. რის საფუძველზეც ხშირ შემთხვევაში გვაქვს ძაბვის პრობლემები საკონტროლო კვანძებში და ამიტომ სისტემაწარმომქნელ ქსელში საჭირო ხდება არსებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია.

დისერტაციაში განიხილება აღნიშნული აქტუალური საკითხები და წარმოდგენილია ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმის სტრატეგია.

ამრიგად, სადისერტაციო ნაშრომის თემა, რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური შერჩევა ელექტროსისტემაში, ჭეშმარიტად აქტუალური საკითხი გახლავთ.

**კვლევის მიზანი და ძირითადი ამოცანები:** დისერტაციის მიზანია ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მიერ გამოწვეული პრობლემებისა და გართულებების გააზრება, კვლევა. სისტემაწარმომქნელ და მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობით გამოწვეული პრობლემების კვლევა-ძიება და რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის ოპტიმალური ვარიანტის მოძიება.

ნაშრომის მიზნიდან გამომდინარე, დისერტაციის ძირითადი გადასაწყვეტი ამოცანები შემდეგია:

- მაღალი და ზემოდალი ძაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელის საკონტროლო კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევა;
- საშუალო და დაბალი ძაბვის მანაწილებელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევა;
- ნაშრომში მიღებული შედეგებისა და შერჩეული სტრატეგიის საილუსტრაციოდ საქართველოს 500 კვ ზემოდალი ძაბვის პერსპექტიულ სისტემაწარმომქნელი ქსელის საკონტროლო კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროთა ოპტიმალური შერჩევა;

**კვლევის საგანი და ობიექტი:** ნაშრომის კვლევის საგანია რეაქტიული სიმძლავრე და მასთან დაკავშირებული გართულებები, აგრეთვე ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური კომპენსაცია.

კვლევის ობიექტია ელექტროენერგეტიკული სისტემა, კერძოდ ელექტრული ქსელი, ძირითადად აქცენტი გადატანილია მაღალი და ზემოდალი ძაბვის სისტემაწარმომქნელ ქსელზე.

**ნაშრომის მთავარი შედეგები და სამეცნიერო სიახლე:** სადისერტაციო ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე შემდეგში მდგომარეობს:

- შემოთავაზებულია ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის სტრატეგია;
- მიღებულია ქსელის კვანძებში ძაბვის გადახრის საანგარიშო გამოსახულება, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ქსელის კვანძების რეზულტატიური გენერაცია/დატვირთვის საშუალებით დავადგინოთ ძაბვის მუშა მნიშვნელობა კვანძებში რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების გარეშე;
- მიღებულია სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარის შერჩევის მათემატიკური მოდელი, რომელიც შედგენილია ქსელის კვანძების რეზულტატიური გენერაცია/დატვირთვისა და ამ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიური და რეაქტიული წინააღმდეგობათა გამოყენებით. ამ მოდელის საფუძველს წარმოადგენს რეალურ სახასიათო

რეჟიმში მუშა ძაბვის გადახრის სიდიდე მოცემულ კვანძში, ხოლო კრიტერიუმს კი ძაბვის მოთხოვნილი სიდიდე განსახილველ კვანძში;

- მიღებულია სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძიდან მასთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალურად გადანაწილების (ეკონომიკურობის კრიტერიუმის მიხედვით) მათემატიკური მოდელი.

ნაშრომის მთავარ შედეგს წარმოადგენს ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის მიღებული მათემატიკური მოდელები და შემუშავებული სტრატეგია. რის საფუძველზეც თვალსაჩინოდ უმჯობესდება ელექტრული ქსელის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები.

**კვლევის პრაქტიკული მნიშვნელობა და რეალიზაცია:** სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი შედეგები, დასკვნები და რეკომენდაციები მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხის გადაჭრას პრაქტიკაში. შესაძლებლად მიგვაჩნია მისი რეალურ ქსელზე მორგება და დანერგვა. იგი ამავე დროს დაეხმარება ამ სფეროს დამწყებ მკვლევარებსა თუ მეცნიერებს გააღრმავონ კვლევა ამ პრობლემატური საკითხის ირგვლივ და გააუმჯობესონ, დახვეწონ წარმოდგენილი ხედვები და რეკომენდაციები.

**დასაცავად გამოტანილი დებულებები:** სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგების, დებულებებისა და დასკვნების სარწმუნოობა დასტურდება მათი მკაცრი დასაბუთების გზით. ნაშრომში დასახული ამოცანების გადაწყვეტისათვის შემოთავაზებული მათემატიკური მოდელები სრულიად ეყრდნობა მაღალი აკადემიური სტანდარტის სამეცნიერო-ტექნიკური ლიტერატურის მასალებსა და შედეგებს.

**ნაშრომის აპრობაცია:** სადისერტაციო თემის ძირითადი დებულებები და შედეგები, მასთან დაკავშირებული საკითხები მისი დამუშავების სხვადასხვა ეტაპებზე მოხსენიებულ და განხილულ იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მიერ ჩატარებულ საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციებზე, კონკრეტულად:

- ჯაფარიძე დ. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის კრიტერიუმები და სტრატეგია. II საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერგია“ ISSN: 1512-0120, N4(96), 2020. - გვ. 5-8.
- ჯაფარიძე დ. ზემადალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზების ცალმხრივად ჩართვის რეჟიმი. III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერგია“ ISSN: 1512-0120, N2(98), 2021. - გვ. 62-67.

**პუბლიკაციები:** დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია სამი ნაშრომი, რომელთა ჩამონათვალი მოცემულია ავტორეფერატის ბოლოს.

**დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა:** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება სარჩევის, შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნების, ლიტერატურის მიმოხლვისა და დანართებისაგან. ნაშრომი გადმოცემულია ბეჭდვითი ტექსტის 169 გვერდზე, ილუსტრირდება 1 სურათით, 25 ცხრილითა და 32 ნახაზით. გამოყენებული ლიტერატურის სია წარმოდგენილია 41 დასახელებით.

## დისერტაციის მოკლე შინაარსი

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

პირველ პარაგრაფში აღნიშნულია რეაქტიული სიმძლავრის ბუნება და მისი ენერგეტიკული ხასიათი.

მეორე პარაგრაფში განხილულია რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებლები და წყაროები, მაკომპენსირებელ დანადგართა სახესხვაობები, მათი მუშაობის პრინციპები და თავისებურებანი.

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

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

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ამოცანა მკვეთრად გამოკვეთილი სასისტემო პრობლემაა, რომელიც ითვალისწინებს და პრაქტიკულად მოიცავს ენერგოსისტემის ყველა საქსელო დანაყოფს და კომპენსაციის შედეგად გამოწვეულ მთელ რიგ თანმდევ ეფექტს: ძაბვის რეგულირება; ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლება; ენერგოსისტემის მუშაობის საიმედოობის გაზრდა და სხვა. მთლიანი ქსელის აუცილებელი გათვალისწინების თვალსაზრისით ამ პრობლემას ელექტროენერგეტიკაში ანალოგია თითქმის არ მოეპოვება.

რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანის ამოხსნას მიეძღვნა მრავალი მკვლევარის შრომები და მათ მიერ შემოთავაზებულია ამოცანის

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

ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია პირობითად შეგვიძლია დავყოთ გლობალურ და ლოკალურ ამოცანებად. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის გლობალური ამოცანა გულისხმობს სისტემური მიდგომის პრინციპის გამოყენებას. მეორე მხრივ, არის შემთხვევები, როდესაც ინფორმაციის უზუსტობისა და მრავალრიცხოვნობის გამო დღის წესრიგში დგება რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური კომპენსაციის გლობალური ამოცანა (სისტემური მიდგომის ამოცანა) დავიყვანოთ ცალკეული მანაწილებელი ქსელის ლოკალურ ამოცანებამდე.

მოცემული სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა შერჩევა სისტემაწარმომქმნელ ( $U_{\Sigma} \geq 220$  კვ) და მანაწილებელ ( $U_{\Sigma} \leq 110$  კვ) ქსელებში, ძირითადად აქცენტი გადატანილია მაღალი და ზემაღალი ძაბვის ქსელზე. ცხადია, რომ ჩვენი ამოცანის მიზანი გლობალური და მასშტაბურია, შესაბამისად ამოცანის გადაწყვეტისას გამოვიყენეთ სისტემური მიდგომის პრინციპი.

როგორც პრაქტიკა გვიჩვენებს, რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე ძირითადად შეიმჩნევა სისტემაწარმომქმნელ ქსელებში, განსაკუთრებით სისტემის მუშაობის მინიმალურ რეჟიმში, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი შეიმჩნევა მანაწილებელ ქსელებში, განსაკუთრებით, სისტემის მუშაობის მაქსიმალურ რეჟიმში. აქედან გამომდინარე, ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის პრინციპი მდგომარეობს მასში, რომ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები, რომლებიც მუშაობენ ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების რეჟიმში, დაყენებული უნდა იქნეს



სისტემაწარმომქმნელი ქსელის კვანძებში. ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროები, რომლებიც მუშაობენ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში დაყენებული უნდა იქნეს მანაწილებელი ქსელის კვანძებში.

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

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

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

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

სიმძლავრის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება ჩავწეროთ ქსელში სიმძლავრის სრული ბალანსის სახით:

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=0}^n \underline{S}_f$$

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

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

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

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

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

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

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

შევნიშნოთ, რომ თუ კი (1) გამოსახულებაში გავითვალისწინებთ კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ წინააღობებს მივიღებთ:

$$\underline{\Delta S} = 3 \cdot \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \underline{I}_k (R_{f,k} + jX_{f,k}) \underline{I}_f^* \quad (2)$$

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

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

მაშინ (2) გამოსახულება მიიღებს სახეს:

$$\Delta S = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{S_k^* \cdot S_f^*}{U_k^* \cdot U_f^*} \cdot Z_{f,k} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k - jQ_k}{U_k} \cdot \frac{P_f - jQ_f}{U_f} \cdot Z_{f,k} \cdot e^{j\varphi_{u,k-f}} \quad (3)$$

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

(3) გამოსახულების გარკვეულ მათემატიკურ გარდაქმნათა და შესაბამის დაშვებათა გათვალისწინების შედეგად ელექტრულ ქსელში სიმძლავრის დანაკარგებისთვის მივიღებთ:

$$\Delta P_P = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f R_{fk}; \quad \Delta P_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f R_{fk}; \quad (4)$$

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

სადაც:  $\Delta P_P$  გახლავთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვით, ხოლო  $\Delta P_Q$  – აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით. მეორეხრივ,  $\Delta Q_P$  გახლავთ რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების აქტიური დატვირთვებით, ხოლო  $\Delta Q_Q$  – რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები გამოწვეული კვანძების რეაქტიული დატვირთვებით.

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

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

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

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

$$U_i = U_0 + \Delta U_i$$

ძაბვის დანაკარგი ელექტრულ ქსელში -  $\Delta U_i$  შეიძლება გამოთვლილ იქნეს ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობების გამოყენებით:

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

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

შესაბამისად, ძაბვის მუშა მნიშვნელობა  $i$  კვანძში იქნება:

$$U_i = U_0 + \frac{1}{U_0} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \quad (5)$$

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

მეოთხე პარაგრაფში განიხილება მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსების საშუალებები.

მესამე თავში წარმოდგენილია ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებით წყაროთა შერჩევის არსებული მიდგომები და ჩვენს მიერ მიღებული

მათემატიკური მოდელები.

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

მეორე პარაგრაფში მიღებულია ზემალაღი ძაბვის ( $U_6 \geq 220$  კვ) სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი, აღნიშნული მიმოხილულია ქვემოთ.

მოგეხსენებათ, სისტემაწარმომქნელი ქსელის ელემენტებისთვის დამახასიათებელია თანაფარდობა  $X \gg R$ , შესაბამისად ქსელში ძაბვის გადახრის სიდიდეზე (5) უფრო მეტ გავლენას ახდენს  $Q_j X_{ij}$  შემდგენი. ამიტომ, ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვის რეგულირებისა და ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების მიზნით განიხილება  $Q_j$  კვანძური სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შესაბამისი შერჩევის გზით.

რაიმე დამატებითი ღონისძიებების გატარებამდე ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვები განისაზღვრება (5) გამოსახულებით, ხოლო კვანძებში ძაბვის საჭირო (მოთხოვნილი) დონის უზრუნველყოფის მიზნით რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების შემდეგ:

$$U_0 + \frac{1}{U_6} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + (Q_j + Q_{j,j}) X_{ij}) = U_{i, მოთ.} \quad (6)$$

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

(6) და (5) გამოსახულებების მარტივ ალგებრულ გარდაქმნათა შედეგად, მივიღებთ:

$$\sum_{j=1}^n Q_{j,j} X_{ij} = U_6 \cdot (U_{i, მოთ.} - U_i) \quad (7)$$

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

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

$$\frac{Q_i X_{ij}}{U_j} \leq \frac{Q_i X_{ii}}{U_i} \quad (8)$$

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

$$U_{i, უდიდ.} > U_{i, დას.მაქს.} \text{ და } U_{j, უმც.} < U_{j, დას.მინ.} \quad (9)$$

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

$$Q_{ji} X_{ii} + Q_{ij} X_{ij} = (U_{დას.მაქს} - U_i) \cdot U_j \quad (10)$$

$$Q_{ji} X_{ji} + Q_{ij} X_{jj} = (U_{დას.მინ} - U_j) \cdot U_i$$

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

ამ ღონისძიების გატარების შემდეგ  $i$  და  $j$  კვანძებში ძაბვები მკაცრად შესაბამისი დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობების ტოლი იქნება. (8) უტოლობის თანახმად, ქსელის სხვა კვანძებში ძაბვები უფრო ნაკლები სიდიდით შეიცვლება და არ არის გამორიცხული, რომ ამ ღონისძიების გატარების შემდეგ შეიძლება აღმოჩნდეს რომელიმე  $k$  და/ან  $m$  კვანძი, სადაც ძაბვა დასაშვებ ზღვარს გარეთ იწება. ამ შემთხვევაში სისტემაწარმომქმნელ ქსელში ძაბვის რეგულირების

მათემატიკური მოდელი უნდა ჩავწეროთ ყველა ამ კვანძისთვის (თავდაპირველად შერჩეული  $i, j$  კვანძი და შემდგომ გამოვლენილი  $k$  და/ან  $m$  კვანძი):

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

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

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

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

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

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

1. ქსელის რეჟიმის გაანგარიშება და კვანძების მუშა ძაბვების ანალიზი;
2. იმ კვანძების გამოვლენა, სადაც მუშა ძაბვები სიდიდით გამოსულია შესაბამის დასაშვებ ზღვრულ მნიშვნელობას გარეთ (ადგილი აქვს (9) სახის უტოლობას) და:

2.1. თუ აღმოჩნდა, რომ (9) სახის უტოლობა სრულდება მხოლოდ ერთ მხარეს რამდენიმე კვანძისთვის, მაშინ (7) სახის განტოლებას ჩავწერთ იმ ერთი კვანძისთვის, სადაც მუშა ძაბვა ყველაზე დაბალია/მაღალია. იმ შემთხვევაში, თუ რომელიმე ორ კვანძში ძაბვა ერთნაირი სიდიდით დაბალია/მაღალია, მაშინ (7) სახის განტოლებას ჩავწერთ იმ ერთი კვანძისთვის, რომლის საკუთარი რეაქტიული წინაღობა უფრო დიდია. ამოვხსნით ამ განტოლებას და გადავამოწმებთ მუშა ძაბვებს კვანძებში: თუ ყველა კვანძის ძაბვა ნორმის ფარგლებშია, მაშინ ამოცანის ამოხსნა დამთავრებულია. იმ შემთხვევაში, თუ მივიღეთ რომ ქსელის სხვა რომელიმე კვანძში ძაბვა გაცდა თავის დასაშვებ ზღვარს, მაშინ (7) სახის განტოლებათა სისტემას ჩავწერთ თავიდან მონიშნული და ახლად გამოვლენილი კვანძებისთვის და ამოვხსნით. გადავამოწმებთ მუშა ძაბვებს და საჭიროების შემთხვევაში გავაგრძელებთ ამოცანის გადაწყვეტის პროცედურას მიზნის მიღწევამდე.

2.2. თუ აღმოჩნდა, რომ (9) სახის უტოლობა სრულდება რამდენიმე კვანძისთვის და, ამასთან, სხვადასხვა მხარეს, მაშინ (7) სახის

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

მესამე პარაგრაფში მიღებულია მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკური მოდელი.

როგორც ავლნიშნეთ მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების მიზნით უფრო ეფექტურია რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ჯამური  $Q_p$  სიმძლავრე გადანაწილებული იქნეს უფრო დაბალი დონის მანაწილებელი ქსელის დატვირთვის კვანძებში. ეს გადანაწილება მიზანშეწონილია განხორციელდეს ისე, რომ მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების ეფექტი იყოს მაქსიმალური.

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

ამ ამოცანის საწყის მონაცემებს წარმოადგენს:

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



ამ ამოცანის ოპტიმიზაციის განტოლებებია:

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

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

- ❖ შეზღუდვის განტოლება:

$$W = (Q_{j1} + Q_{j2} + \dots + Q_{ji} + \dots + Q_{jn}) - Q_j = 0;$$

- ❖ შეზღუდვის უტოლობა დატვირთვის კვანძების მიმართ:

$$0 \leq Q_{ji} \leq -Q_i \quad (11)$$

ქსელში რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე გამოითვლება (4) გამოსახულებით, ხოლო კვანძებში  $Q_j$  სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დაყენების შემთხვევაში დასმული ამოცანის მიზნის ფუნქცია ჩაიწერება შემდეგ სახეში:

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

- ❖ ოპტიმიზაციის განტოლება ჩაიწერება ლაგრანჟის ფუნქციის სახით:

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

სადაც:  $\lambda$ - ლაგრანჟის განუსაზღვრელი მამრავლი.

დატვირთვის კვანძებში საძიებელი  $Q_{ji}$  სიმძლავრეები განისაზღვრება შემდეგი პირობიდან:

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

ანუ

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

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

$$\begin{cases} \frac{2}{U_b^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{3j}) R_{ij} + \lambda = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ (Q_{31} + Q_{32} + \dots + Q_{3i} + \dots + Q_{3n}) - Q_j = 0 \end{cases} \quad (12)$$

ზემოთ მიღებულ (12) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს მანაწილებელ ქსელში ( $U_b \leq 110$  კვ) რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის მათემატიკურ მოდელს.

(12) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლება შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად:

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} Q_{3j} + \lambda \cdot \frac{U_b^2}{2} = - \sum_{j=1}^n R_{ij} Q_j, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ეს გამოსახულება შესაძლებელია ჩავწეროთ მატრიცულ ფორმაში შემდეგნაირად:

$$|R| \cdot |Q_{3j}| + \frac{U_b^2}{2} |\lambda| = -|R| \cdot |Q_j|, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

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

წინააღმდეგობათა მატრიცა;

$$|Q_{3j}| = \begin{vmatrix} Q_{31} \\ Q_{32} \\ \vdots \\ Q_{3n} \end{vmatrix} - \text{საძიებელ ცვლადთა სვეტ-მატრიცა}; \quad |\lambda| = \begin{vmatrix} \lambda \\ \lambda \\ \vdots \\ \lambda \end{vmatrix} - n \times 1\text{-ზე}$$

ლაგრანჟის განუსაზღვრელ მამრავლთა სვეტ-მატრიცა;

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

სიმძლავრეების სვეტ-მატრიცა;

ამრიგად მიღებული მათემატიკური მოდელი (12) მატრიცულ ფორმაში ჩაიწერება:

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & \frac{U_b^2}{2} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & \frac{U_b^2}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & \frac{U_b^2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{jm} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ -Q_n \\ Q_j \end{pmatrix} \quad (13)$$

გავითვალისწინოთ, რომ როცა მანაწილებელ ქსელში გვაქვს გენერაციის  $m$  კვანძი  $Q_m$  გენერაციით, მაშინ განტოლებათა განსახილველ სისტემაში მივიღოთ საძიებელი ცვლადი  $Q_{jm} = 0$  და (13) განტოლებათა სისტემიდან ამოვიღოთ  $m$  ნომრის შესაბამისი სტრიქონი და სვეტი. განტოლებათა ამ სისტემის ეტაპობრივი ამოხსნა უნდა გაგრძელდეს მანამ, სანამ დატვირთვის კვანძების მიმართ ყველა ცვლადი არ დააკმაყოფილებს შეზღუდვის (11) უტოლობებს.

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

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

მესამე პარაგრაფში გაანგარიშებულ და მიღებულ იქნა საქართველოს ელექტროსისტემის პერსპექტიული სისტემაწარმომქნელი ქსელის საკუთარ და ურთიერთ აქტიური და რეაქტიული წინააღობები.

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

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

## ძირითადი შედეგები და ზოგადი დასკვნები

მოცემულ სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობისა და კვლევის პროცესში

მიღებულ იქნა შემდეგი ზოგადი დასკვნები და ძირითადი შედეგები:

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

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

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

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

## დისერტაციასთან დაკავშირებული მთავარი პუბლიკაციები და წაკითხული მოხსენებების ნუსხა

1. მახარაძე გ., ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის კრიტერიუმი და მათემატიკური მოდელი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული ISSN: 1512-0996, N4(518), დეკემბერი 2020. - გვ. 105-112.
2. ზივზივაძე ო., ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური გადანაწილება მანაწილებელ ქსელში. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული ISSN: 1512-0996, N3(521), სექტემბერი 2021. - გვ. 123-129.
3. ჯაფარიძე დ. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების გავლენა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებზე. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის სამეცნიერო ჟურნალი „მოამბე“ ISSN: 2233-3711, №2 (18), 2021. - გვ. 153-160.
4. ჯაფარიძე დ. რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების შერჩევის კრიტერიუმები და სტრატეგია. II საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერგია“ ISSN: 1512-0120, N4(96), 2020. - გვ. 5-8.
5. ჯაფარიძე დ. ზემადალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზების ცალმხრივად ჩართვის რეჟიმი. III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი. ჟურნალი „ენერგია“ ISSN: 1512-0120, N2(98), 2021. - გვ. 62-67.



Akaki Tsereteli State University

*Faculty of Technical Engineering*

*With the rights of the Manuscript*

DAVIT JAPARIDZE

OPTIMAL SELECTION OF AN ADDITIONAL SOURCE OF  
REACTIVE POWER IN THE POWER GRID

THE AUTHOR'S ABSTRACT

of the dissertation for the

academic degree of Doctor of Engineering (0719)

Kutaisi 2022

The Dissertation was performed at Akaki Tsereteli State University Department of Energy and Telecommunications.

Supervisor:

Omar Zivzivadze, Professor

(Name, surname, academic degree)

Reviewers:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
(Name, surname, academic degree, specialty code)

The Defense of the Dissertation will be held

\_\_\_\_\_  
(date and hour)

at the session of the Dissertation Commission established by the Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering. Address: 59 Tamar Mepe St., Kutaisi, 4600, Campus I Aud. № 1114.

The Dissertation will be available in the library of Akaki Tsereteli State University. Address: 59 Tamar Mepe St., Kutaisi, 4600.

The Author's abstract was sent out on “ \_\_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_

(date)

*The Secretary of the*

*Dissertation Council*

\_\_\_\_\_

*/N.Sakhanberidze/*

(signature)

## General description of paper

In the power grid as a whole, there are a number of problems and challenges that require the optimal solution, one of the most important of which is reactive power and relating fundamental issues. This dissertation paper deals with this issue, revolves around it and outlines effective ways to achieve the targets set.

**Relevance of topic.** In the wake of a significant increase in power flow in the electrical network, voltage problems in the control nodes are exacerbated and in most cases, reactive power compensation becomes one of the main ways to regulate the voltage in the distribution network nodes.

The development of high-voltage and extra-high-voltage power networks, on the one hand, has increased the possibilities for capacity flows between the major nodes of the country's power grid, but on the other hand, it has increased the excess reactive power in a backbone network, which is why we often have voltage problems in the control nodes and therefore it is necessary to compensate the existing excess reactive power in a backbone network.

The dissertation discusses the current issues and presents a strategy for the installation of reactive power compensation equipment in the power grid.

Thus, the topic of the dissertation - the optimal selection of an additional source of reactive power in the electrical system, is a truly topical issue.

**The aim and main objectives of the research.** The aim of the dissertation paper is: to conceptualize and study the problems and complications caused by reactive power in the electrical network; to investigate the problems caused by reactive power imbalances in the backbone and distribution networks and find the optimal option for selecting reactive power compensation equipment.

Depending on the purpose of the dissertation, the main objectives of the dissertation paper are:

- Selection of additional reactive power source in control nodes of the high and extra-high-voltage backbone network;
- Selection of additional reactive power source in medium and low-voltage distribution network nodes;

- Optimal selection of additional reactive power sources in the control nodes of the 500 kV high voltage backbone network of Georgia to illustrate the results obtained in the paper and the selected strategy.

The aim of the dissertation paper is: to conceptualize and study the problems and complications caused by reactive power in the electrical network; to investigate the problems caused by reactive power imbalances in the backbone and distribution networks and find the optimal option for selecting reactive power compensation equipment.

**Research subject and object.** The research subject is reactive power and related complications, as well as the optimal compensation of reactive power in the electrical network.

The object of research is the power grid, in particular the electrical network, mostly the focus is on the high and extra-high-voltage backbone network.

**Main findings and novelty of the research.** The research novelty of the dissertation paper is as follows:

- A strategy for selecting reactive power compensation equipment in the electricity network is proposed;
- The diagram concerning the calculation of voltage deviation in the network nodes is obtained, which allows us to determine the operating voltage value in the network nodes by means of resultant generation/load without calculating the mode parameters in the nodes;
- A mathematical model for the selection of reactive power compensation equipment in the backbone network nodes is obtained, which was developed using the resultant generation/loads of the network nodes and the inherent and mutually active and reactive resistances of these nodes. The basis of this model is the value of the operating voltage deviation in a real characteristic mode in a given node, while the criterion is the required value of voltage in the node being under consideration;
- A mathematical model of optimal distribution (according to the efficiency criterion) of the additional reactive power source node from the backbone network node to the distribution network nodes connected to it.

The main result of the research is the obtained mathematical models and the developed

strategy for the selection of reactive power compensation equipment in the electricity network, on the basis of which the technical-economic indicators of the electricity network are visibly improving.

**Practical significance and implementation of the research.** The results, conclusions and recommendations presented in the dissertation will significantly contribute to solving the issue of reactive power compensation in practice. We consider it possible to adapt and implement it in the real network, which will help increase the sustainability and reliability of the Georgian electricity network. It would also help novice researchers or scientists engaged in this field to intensify their research on this problematic issue and improve, refine the presented visions and recommendations.

**Provisions brought to defense.** The credibility of the results, provisions and conclusions obtained in the dissertation is confirmed by their rigorous substantiation. The mathematical models proposed for the solution of problems set in the paper are completely based on the materials and results of the scientific-technical literature of high academic standard.

**Approbation of work.** The main provisions and results of the dissertation topic, related issues were reported at various stages of its development and discussed at international scientific-technical conferences held at the Georgian Technical University, particularly:

- Japaridze D. Criteria and strategy for selection of the reactive power compensation equipment. II International Scientific-Technical Conference "Modern Energy Problems and Ways to Address Them", Georgian Technical University, Tbilisi. Journal "ENERGIA" ISSN: 1512-0120, N4 (96), 2020. - pp. 5-8
- Japaridze D. One-way connection mode of the extra-high-voltage power lines. III International Scientific-Technical Conference "Modern Energy Problems and Ways to Address Them", Georgian Technical University, Tbilisi. Journal "ENERGIA" ISSN: 1512-0120, N2 (98), 2021. - pp. 62-67

**Publications.** There are published three scientific works, which are listed below the text of this author's abstract.

**Volume and Structure of Dissertation.** Dissertation includes introduction, four chapters, major results and conclusions, list of references and annexes. It comprises 169 printing

pages and contains 1 picture, 25 tables and 32 drawings. References include 41 literature titles.

### **A brief content of Dissertation**

The first chapter of the paper deals with general theoretical issues related to reactive power. Also in the first chapter the task of reactive power compensation in the electrical system has been set and formulated.

In the first paragraph is discussed nature of reactive power and its energy nature. In the second paragraph reactive power users and sources, types of the compensating devices, principles of their operation and features are also discussed here.

In the third paragraph the importance of reactive power balance in the power grid and the impact of its disruption on the quality of electricity, as well as its impact on the active power balance are presented.

The fourth paragraph discusses the issue of reactive power compensation in the electrical system, defines the main task and aim of the dissertation. Criteria for solving the problem in the power grid is discussed, the problem of multi-criteria is posed and the ways/methods of solving it are mentioned. The task has been set and formulated, the main criteria we have selected and the problem-solving strategy have been proposed.

The task of reactive power compensation is a sharply defined systemic problem that encompasses and covers the whole electric network and a number of side effects caused by it: Voltage adjustment; Improvement of power quality; Increase stability of power system etc. There is almost no analogy to this problem in electric power system in terms of the necessary consideration of the whole network.

The work of many researchers has been devoted to solving the problem of optimal reactive power compensation and they have proposed different methods of solving the problem. The most accurate method among these is the system approach method, which involves considering all voltage networks of power system. This method is, in fact, a universal method, but on the one hand is characterized by a large dimension (a large

number of elements of the electrical system and consumption nodes) and on the other hand, the initial information is relatively low quality.

Reactive power compensation in an electric network can be conditionally divided into global and local tasks. The global task of reactive power compensation involves the use of the systematic approach principle. On the other hand, there are cases when due to the inaccuracy and multiplicity of information the global task of optimal reactive power compensation (the system approach task) is reduced to the local tasks of a separate distribution network.

The aim of the dissertation is reactive power compensation in backbone (transmission) ( $U_n \geq 220$  kV) and distribution ( $U_n \leq 110$  kV) networks. It is clear, that the purpose of our task is global and large-scale, therefore we used the principle of systematic approach in solving the task.

As practice shows, surplus of reactive power is mainly observed in the backbone networks, especially in the minimal load modes, while deficit of reactive power is observed in the distribution networks, especially in the maximal load modes. Therefore, the principle of selection of additional source of reactive power in the electrical network is that shunt reactors should be installed in the nodes of the backbone network. And additional source of reactive power operating in generation mode shall be installed in the distribution network nodes.

Based on the above, in the dissertation, the issue of selecting an additional source of reactive power in the electric network is considered according to the following strategy:

- The principle of the system approach will be applied to the backbone network, and the quality of voltage in the nodes of the mentioned network will be considered to the criterion for selecting the capacity of the compensating equipment in the nodes of this network and the place of installation;
- If we find that according to the voltage quality criterion, an additional source of reactive power of a certain magnitude is required in one of the nodes of this network, then this power will be optimally distributed among the distribution network nodes connected to the given node of the backbone network.

The first paragraph of second chapter of the paper discusses the own and mutual impedances of the electrical network nodes and the properties of the node's own and mutual impedance matrix and the ways of drawing up this matrix.

In the first subparagraph of second paragraph calculation of power losses in a node is presented, which allows to calculate losses not by the power flows passing through the branches, but by the nodal loads and their own and mutual impedances.

Write the power loss equation as an apparent power balance in the network:

$$\Delta \underline{S} = \sum_{f=0}^n \underline{S}_f$$

where:  $\underline{S}_f$  – nodal apparent power, here generation is calculated by “+” sign and consumption by “-” sign.

As we know  $\underline{S}_f = \sqrt{3} \underline{U}_f \underline{I}_f^*$ , then we get:

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

In turn,  $\underline{U}_f = U_0 + \sqrt{3} \Delta \underline{U}_f$ , where  $\Delta \underline{U}_f$  is a phasor value of voltage loss from slack bus to  $f$  node. Based on the above discussion, we write:

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

The first member of the above equation contains the algebraic sum of the currents of all nodes in the network (including slack bus), which is equal to zero according to Kirchhoff's first(Current) law.

Therefore, we get  $\Delta \underline{S} = 3 \sum_{f=0}^n \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}_f^*$ , because  $\Delta \underline{U}_{f=0} = 0$ , we get:

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

Note that if we consider own and mutual impedances of the nodes in (1) equation, we get:



$$\underline{\Delta S} = 3 \cdot \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \underline{I}_k (R_{f,k} + jX_{f,k}) \underline{I}_f^* \quad (2)$$

When calculating the grid modes, it is more convenient to plot the nodal loads with the corresponding nodal currents:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{S}_k^*}{\sqrt{3}\underline{U}_k^*} \quad \Leftrightarrow \quad \underline{I}_f = \frac{\underline{S}_f^*}{\sqrt{3}\underline{U}_f^*}$$

Then (2) equation will take shape:

$$\underline{\Delta S} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\underline{S}_k^* \cdot \underline{S}_f^*}{\underline{U}_k^* \cdot \underline{U}_f^*} \cdot \underline{Z}_{f,k} = \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{P_k - jQ_k}{U_k} \cdot \frac{P_f - jQ_f}{U_f} \cdot \underline{Z}_{f,k} \cdot e^{j\varphi_{u,k-f}} \quad (3)$$

where:  $\varphi_{U_{kf}} = \varphi_{U_k} - \varphi_{U_f}$  is a phasor shift between the voltage vectors of the  $k$  and  $f$  nodes. Obviously that  $\varphi_{U_{k-f}} = -\varphi_{U_{f-k}}$ .

As a result of certain mathematical transformations of the (3) equation and the corresponding assumptions, we obtain the following for the power losses in the electrical network:

$$\begin{aligned} \Delta P_P &= \frac{1}{U_0^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f R_{fk}; & \Delta P_Q &= \frac{1}{U_0^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f R_{fk}; \\ \Delta Q_P &= \frac{1}{U_0^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n P_k P_f X_{fk}; & \Delta Q_Q &= \frac{1}{U_0^2} \sum_{f=1}^n \sum_{k=1}^n Q_k Q_f X_{fk}; \end{aligned} \quad (4)$$

where:  $\Delta P_P$  is active power losses in the network caused by nodal active powers, but  $\Delta P_Q$  – active power losses in the network caused by nodal reactive powers. On the other hand,  $\Delta Q_P$  is reactive power losses in the network caused by nodal active powers, but  $\Delta Q_Q$  – reactive power losses in the network caused by nodal reactive powers.

In the second subparagraph the calculation of the operating value of voltage in the control node of a complex interconnected network was obtained, based on the node resultant load/generation and the nodes' own and mutual impedances.

Magnitude of the operating voltage in the node of electric network depends on several factors:

- Voltage value of slack bus –  $U_0$ ;

- Configuration and electric parameters of electric network –  $R, X$ ;
- Values of consumption nodal powers –  $P, Q$ .

Relationship between operating voltage values of  $i$  node and slack voltage is:

$$U_i = U_0 + \Delta U_i$$

Voltage loss in the electrical network –  $\Delta U_i$  can be calculated by the own and mutual impedances:

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

where:  $P_j, Q_j$  –  $j$  nodal active and reactive net powers (Generation is calculated by “+” sign and consumption by “–” sign);  $R_{ij}, X_{ij}$  – own and mutual impedances of network (own, when  $j = i$  and mutual, when  $j \neq i$ ).

Therefore, operating voltage value at  $i$  node:

$$U_i = U_0 + \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \quad (5)$$

In the third paragraph we will look at the existing approaches and tools of technical-economic management of the power grid, which are mostly aimed at minimizing active power loss in the electricity network and optimizing voltage regulation, through which it is possible to improve the economic and technical performance of the network.

The fourth paragraph discusses the means of balancing reactive power in the distribution network.

The third chapter of the dissertation presents the mathematical models that we developed for the selection of additional reactive power sources in the network.

The first paragraph presents the approaches and means in the technical-scientific literature on the topic of reactive power compensation.

The second paragraph presents a mathematical model that we developed for the selection of additional reactive power sources in the backbone network, let's discuss this.

As you know, the ratio  $X \gg R$  is typical for backbone network elements, therefore main contribution of voltage losses in equation (5) is  $Q_j X_{ij}$  member. Therefore, in order to regulate operating voltage values in the nodes and reduce active power losses in the

network, the issue of appropriate selection of reactive power compensating equipments is considered.

Prior to any additional measures, the operating voltages at the nodes shall be determined by (5), but after the installation of reactive power compensating equipments to ensure the required level of voltage at the nodes shall be determined:

$$U_0 + \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j R_{ij} + (Q_j + Q_{cj}) X_{ij}) = U_{i,req} \quad (6)$$

where:  $Q_{cj}$  – capacity of compensating equipment installed in  $j$  node, MVar;  $U_{i,req}$  – required voltage value in the  $i$  node of backbone network.

As a result of simple algebraic transformations of (5) and (6) equations, we get:

$$\sum_{j=1}^n Q_{cj} X_{ij} = U_n \cdot (U_{i,req} - U_i) \quad (7)$$

The equation (7) is the mathematical model that we developed for the selection of additional reactive power sources in the backbone network. Which criterion is the required value of voltage in this node.

As you know, the relationship  $X_{ii} \geq X_{ij}$  is typical for own and mutual reactances, therefore when a compensating equipment is installed at  $i$  node, deviation of voltage value at  $i$  node is bigger than at  $j$  node. Because of this we write:

$$\frac{Q_i X_{ij}}{U_n} \leq \frac{Q_i X_{ii}}{U_n} \quad (8)$$

In most cases, there is such nodes in the electric network, where nodal voltages are outside the permissible limits. If nodal voltage in the  $i$  node is bigger than the maximum permissible value and on the other hand if nodal voltage in the  $j$  node is less than minimal permissible one, then we can write:

$$U_i > U_{i,req,MAX} \text{ and } U_j < U_{j,req,MIN} \quad (9)$$

Then the task of regulating of voltage values in the network is set, which must be carried out by installing a reactive power compensating equipment in the respective nodes, all of which will be written in the following form:

$$Q_{ci} X_{ii} + Q_{cj} X_{ij} = (U_{req,MAX} - U_i) \cdot U_n \quad (10)$$

$$Q_{ci} X_{ji} + Q_{cj} X_{jj} = (U_{req,MIN} - U_j) \cdot U_n$$

By solving of the above equations we will get  $Q_{ci}$  and  $Q_{cj}$  values. Where  $Q_{ci}$  will be negative, what means that shunt reactor must be installed at  $i$  node, but  $Q_{cj}$  will be positive, what means that capacitor banks should be insalled at  $j$  node.

After this measurement, the voltages at  $i$  and  $j$  nodes will be strictly equal to the corresponding permissible limit values. According to (8) inequality, after this operation, any  $k$  or  $m$  node can be found where voltage values is outside the allowable range. In this case we need to write a (7) mathematical model for all these nodes. So we will get:

$$\begin{aligned} Q_{ci}X_{ii} + Q_{cj}X_{ij} + Q_{ck}X_{ik} + Q_{cm}X_{im} &= (U_{req,MAX} - U_i) \cdot U_n \\ Q_{ci}X_{ji} + Q_{cj}X_{jj} + Q_{ck}X_{jk} + Q_{cm}X_{jm} &= (U_{req,MIN} - U_j) \cdot U_n \\ Q_{ci}X_{ki} + Q_{cj}X_{kj} + Q_{ck}X_{kk} + Q_{cm}X_{km} &= (U_{req,MAX} - U_k) \cdot U_n \\ Q_{ci}X_{mi} + Q_{cj}X_{mj} + Q_{ck}X_{mk} + Q_{cm}X_{mm} &= (U_{req,MIN} - U_m) \cdot U_n \end{aligned}$$

It is expected that at this stage the goal set in terms of voltage regulation across the whole network will be achieved.

Thus, we have a mathematical model of voltage management in the nodes of backbone network, the methodology of which is as follows:

1. Calculation of steady-state mode of network and find operating nodal voltages.
2. Detection of nodes where the operating voltages are outside the corresponding allowable limit value. (where (9) inequality is met) and:

2.1 If it is found that (9) type inequality is satisfied for several nodes but only on one side, then we write the (7) equation for the node, where operating voltage value is the lowest/highest. If there is several such nodes, then we write the (7) equation for that one node, which own reactance is bigger. Let's solve this equation and check the operating voltage values in the nodes: If all nodal voltages are within the norm, then calculation process is over. If we find that the voltage at any of the other nodes in the network has exceeded its allowable limit, we will write (7) equations for pre-selected and newly identified nodes. This procedure will continue until the goal is reached.

2.2 If it is found that (9) type inequality is satisfied for several nodes but on both side, then we write the (7) equation for the two nodes, where operating voltage value is the lowest/highest. If there is several such nodes, then we will write the

(7) equation for that one node, which own reactance is bigger. Let's solve this equation and check the operating voltage values in the nodes: If all nodal voltages are within the norm, then calculation process is over. If we find that the voltages at any of the other nodes in the network has exceeded its allowable limit, we write (7) equations for pre-selected and newly identified nodes. This procedure will continue until the goal is reached.

The third paragraph presents a mathematical model that we developed for the selection of additional reactive power sources in the distribution network.

As we mentioned, according to the voltage quality criterion, an additional source of reactive power of a certain magnitude is required in one of the nodes of this network, then this power will be optimally distributed among the distribution network nodes connected to the given node of the backbone network. This redistribution should be carried out in such a way that the effect of reducing power losses in the distribution network is maximized.

Therefore, we have a task: "Optimal rescheduling of the additional source of reactive power selected in a backbone network to a distribution network".

The initial data for this task are:

- ✓ Redistribution reactive power  $Q_c$ , MVar;
- ✓ Nodal reactive powers of consumption nodes  $Q_i$ , where  $i = 1, 2, \dots, n$  are nodes of distribution network;
- ✓ Own and mutual resistances of the distribution network  $R_{ij}$ .

Optimization equations of the task are:

- ❖ *Objective function* – minimization of active power losses caused by nodal reactive powers in the distribution network:

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

- ❖ *Equation of constraint:*

$$W = (Q_{c1} + Q_{c2} + \dots + Q_{ci} + \dots + Q_{cn}) - Q_c = 0 ;$$

- ❖ *Inequality of constraint* with respect to load nodes:

$$0 \leq Q_{ci} \leq -Q_i \quad (11)$$

In the network active power losses caused by nodal reactive powers before compensation of reactive power is calculated by (4) equation, but after compensation the objective function should be written as:

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

❖ *Optimization equation* is written by Lagrange's function:

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

where:  $\lambda$  – Lagrange multiplier.

The searchable  $Q_{ci}$  capacities in the load nodes are determined by the following condition:

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

So:

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

We have got  $n$  equations with  $n$   $Q_{ci}$  variables and one  $\lambda$  multiplier. With this system of equations we consider the equation of constraint and we have  $n + 1$  equations with  $n + 1$  variables:

$$\begin{cases} \frac{2}{U_n^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{cj}) R_{ij} + \lambda = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ (Q_{c1} + Q_{c2} + \dots + Q_{ci} + \dots + Q_{cn}) - Q_c = 0 \end{cases} \quad (12)$$

The first equation of above (12) system might be written as follow:

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

This equation might be written by matrix form:

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

where:  $|R| = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}$  – Matrix of own and mutual resistances;

$$|Q_{cj}| = \begin{bmatrix} Q_{c1} \\ Q_{c2} \\ \vdots \\ Q_{cn} \end{bmatrix} - \text{Column-matrix of variables; } |\lambda| = \begin{bmatrix} \lambda \\ \lambda \\ \vdots \\ \lambda \end{bmatrix} - n \times 1 \text{ column-matrix of}$$

Lagrange's multipliers;

$$|Q_j| = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} - \text{Column-matrix of nodal reactive loads of the distribution network;}$$

Therefore the developed mathematical model (12) in matrix form will be:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & \frac{U_n^2}{2} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & \frac{U_n^2}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & \frac{U_n^2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_{c1} \\ Q_{c2} \\ \vdots \\ Q_{cn} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ \vdots \\ -Q_n \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Note that, when we have a generation  $n$  node in a distribution network with  $Q_m$  variable, then  $Q_{cm} = 0$  and remove the corresponding row and column of number  $m$  from the system of equations (12). The stepwise solution of this system of equations must be continued until all variables with respect to the load nodes meet the constraint (11) inequalities.

The last fourth chapter of the paper is entirely devoted to the Georgian power grid, mostly the backbone network.

The first and second paragraph describes the general current situation and future challenges of Georgian power system.

In the third paragraph the own and mutually active and reactive impedances of the prospective backbone network of the Georgian power grid were calculated and obtained.

In the fourth paragraph in the backbone network of the Georgian power grid, calculations were made taking into account the prospective projects and the obtained mathematical model, and the reactive power compensating devices were selected at the control nodes. These calculations were performed during the operation of the Georgian power grid in three scenarios (autonomous mode, parallel synchronous regime with the

Azerbaijani power grid, and parallel synchronous regime with the Russian power grid) taking into account two marginal load modes (maximum, minimum).

Finally, I would like to express my deepest appreciation to Professor of Georgian Technical University Guram Makharadze for collaboration and fruitful discussions.



## Basic results and general conclusions

During the process of working on the dissertation paper general conclusions and the following important results were obtained:

1. The task of reactive power compensation is a sharply defined systemic problem that encompasses and covers the whole electric network and a number of side effects caused by it: Voltage adjustment; Improvement of power quality; Increase stability of power system etc. There is almost no analogy to this problem in electric power system in terms of the necessary consideration of the whole network.
2. In this paper, the issue of selecting the capacity of the reactive power compensation equipment and the installation site is considered according to the following strategy:
  - The principle of the system approach will be applied to the backbone network, and the quality of voltage in the nodes of the mentioned network will be considered to the criterion for selecting the capacity of the compensating equipment in the nodes of this network and the place of installation;
  - If we find that according to the voltage quality criterion, an additional source of reactive power of a certain magnitude is required in one of the nodes of this network, then this power will be optimally distributed among the distribution network nodes connected to the given node of the backbone network.
3. A mathematical model for the selection of the reactive power compensation equipment in the backbone network nodes is obtained, which was developed using the resultant generation/loads of the network nodes and their inherent and mutually active and reactive resistances. The basis of this model is the magnitude of the operating voltage deviation in the given characteristic mode in a particular node, and the criterion is the required value of voltage in the node being under consideration.
4. The mathematical model obtained for selecting the reactive power compensation equipment in a backbone network is very convenient and efficient, it allows us to select the most critical nodes (node) after analyzing the operating voltages, as well as to work out a system of equations for them and obtain the required components in

these nodes. The model takes into account the interconnection of each node of the backbone network and can successfully eliminate the voltage-related problems in almost all nodes.

5. In the maximum and near operating modes of the power grid, in some nodes of the backbone network, where a relatively large total load distribution network is connected, it may be necessary to place the reactive power compensation equipment, the criterion of which is the required voltage at this node. From a technical-economic point of view, in particular in terms of minimizing active power losses, it is advisable to optimally distribute this power between the nodes of the lower level voltage distribution network connected to this node using the efficiency criterion.
6. The mathematical model of the optimal redistribution (according to the efficiency criterion) of reactive power  $Q_c$  selected according to the voltage criterion for the backbone network node between the nodes of the distribution network is obtained.
7. Using the mathematical model obtained in the paper the issue of optimal selection of an additional source of reactive power in the perspective network of a 500-kV extra-high-voltage of the Georgian power grid has been resolved. We discussed this problem while operating three possible scenarios of the Georgian power grid (autonomous mode, synchronous parallel connection with Russia, synchronous parallel connection with Azerbaijan). Each scenario is considered according to two marginal (maximum, minimum) modes of perspective loading of the Georgian power grid.
8. As the calculations have shown, when operating the Georgian 500 kV-voltage prospective system in different modes, we have reactive power surplus and voltage problems in the control nodes, especially in the minimum load modes. Therefore, it is necessary to place the reactive power compensation equipment in the network in order to keep the working values of voltages in the control nodes within the allowable range.

## List of main publications and presentations related to the dissertation paper

1. Makharadze G., Japaridze D. Criteria and mathematical model for selecting an additional source of reactive power in a backbone network. Collection of scientific works of Georgian Technical University ISSN: 1512-0996, N4 (518), December 2020. - pp. 105-112.
2. Zivzivadze O., Japaridze D. Optimal redistribution of the additional source of reactive power selected in a backbone network to the distribution network. Collection of scientific works of Georgian Technical University ISSN: 1512-0996, N3 (521), September 2021. - pp. 123-129.
3. Japaridze D. Impact of reactive power compensation equipment in a backbone network on active power losses. Akaki Tsereteli State University Scientific Journal "Moambe" ISSN: 2233-3711, №2 (18), 2021. - pp. 153-160.
4. Japaridze D. Criteria and strategy for selection of the reactive power compensation equipment. II International Scientific-Technical Conference "Modern Energy Problems and Ways to Address Them", Georgian Technical University, Tbilisi. Journal "ENERGIA" ISSN: 1512-0120, N4 (96), 2020. - pp. 5-8.
5. Japaridze D. One-way connection mode of the extra-high-voltage power lines. III International Scientific-Technical Conference "Modern Energy Problems and Ways to Address Them", Georgian Technical University, Tbilisi. Journal "ENERGIA" ISSN: 1512-0120, N2 (98), 2021. - pp. 62-67;

