

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი ვახტანგაძე

**საქართველოს ელექტროსისტემის სატრანზიტო
ფუნქციის ანალიზი**

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი
2014 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის
ელექტროენერგეტიკის, ელექტრონიკისა და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტის
ელექტროენერგის წარმოების, გადაცემის და განაწილების მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი მიხეილ რუხვაძე
რეცენზენტები: ვახტანგ გიორგობიანი
არჩილ კობტაშვილი

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს
სხდომამზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს
ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

სრული პროფესორი

/გ. ხელიძე/

რეზიუმე

საქართველო პატარა ქვეყანაა, რომლის ელექტრული ქსელი დღითიდღე ფართოვდება. დღესდღეობით საქართველოს აქვს პარალელური სინქრონული კავშირი რუსეთის და აზერბაიჯანის სისტემებთან, ასევე, პარალელური ასინქრონული (მუდმივი დენის ჩანართით) კავშირი თურქეთთან და ახლო მომავალში სომხეთთანაც ამგვარი კავშირი შედგება. ეს ნიშნავს, რომ ახლო მომავალში განხორციელებული იქნება საქართველოს ელექტროსისტემის გავლით სიმძლავრის ტრანზიტი რუსეთიდან, აზერბაიჯანიდან ან სომხეთიდან თურქეთში.

რადგან თურქეთი დაკავშირებულია ევროპის გაერთიანებულ ქსელთან, ამიტომ საქართველოს სისტემა დაკავშირებულია თურქეთთან მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით, რომელიც მდებარეობს ახალციხის ქვესადგურში. ამ მომენტისთვის მუშაობისთვის მზადაა ორი ბლოკი, ახლო მომავალში კი დაგეგმილია მესამე ბლოკის დადგმა. აქტიური სიმძლავრის ნომინალური გადადინება თითოეული ბლოკისთვის არის 350 მგვტ. მომავალში, რეჟიმზე დამოკიდებულებით, შესაძლოა მოქმედებაში იყოს სამივე ბლოკი ან ორი მათგანი. ამგვარად, ჯამური გადადინება იქნება 700-1000 მგვტ-ის ფარგლებში.

ნაშრომის I თავი მოიცავს ელექტრული სისტემის კონტროლისა და ანალიზის მიმოხილვას. ამ თავში წარმოდგენილია გარდამავალი პროცესების ზოგადი მიმოხილვა, სისტემის მდგრადობის არსი და ანალიზი, ელექტრული სისტემის კონტროლის მეთოდები.

ნაშრომის II და III თავები მოიცავს სტატიკური და დინამიური მდგრადობის ანალიზს საქართველოს სისტემაში მუდმივი დენის ჩანართ(ებ)ის რეგულირების გათვალისწინებით. როგორც ზემოთ აღინიშნა, განიხილება სიმძლავრის ტრანზიტი აზერბაიჯანიდან თურქეთში. ამ შემთხვევაში ექსპორტირებული სიმძლავრის ის ნაწილი, რომელიც საქართველოზე მოდის, იქნება 300-350 მგვტ. დანარჩენი 400-650 მგვტ საქართველოში შემოვა აზერბაიჯანიდან როგორც აზერბაიჯანის ექსპორტი და შემდეგ საქართველოს თურქეთში საექსპორტო სიმძლავრესთან (300-350 მგვტ) დაჯამებული გადაიცემა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით თურქეთში. აქედან გამომდინარე, საჭიროა თავიდან იქნას აცილებული სისტემის არასტაბილური მუშაობა მნიშვნელოვანი სიდიდის სიმძლავრის უბალანსობის წარმოქმნისას. ამგვარი შემთხვევა შესაძლოა იყოს საქართველოსა და აზერბაიჯანის დამაკავშირებელი სისტემათაშორისი ხაზის ავარიული გამორთვა ან ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით გამავალი სიმძლავრის დაბლოკვა რაიმე მიზეზით (მოკლე შერთვით, მაგალითად). ამგვარად საჭიროა გამოყენებული იქნას დროული ღონისძიებები სისტემის სტაბილურობის შესანარჩუნებლად. ასეთი ზომები შესაძლოა იყოს

სიხშირის რეგულირების, მბრუნავი რეგერვის ან სასისტემო ავტომატიკის გამოყენება. თუმცა ყველა მათგანი დამოკიდებულია გარკვეულ მდგომარეობაზე. მაგალითად, სანამ სიხშირის მნიშვნელობა საქართველოში არ შემცირდება/გაიზრდება რეგულირების დანაყენამდე, სიხშირის რეგულირების ან სასისტემო ავტომატიკა არ მოვა მოქმედებაში. მბრუნავი რეგერვის ამოქმედება მოითხოვს გარკვეულ დროს, სიჩქარის რეგულატორების დროის მუდმივის არსებობიდან გამომდინარე. ზოგიერთ შემთხვევაში, სერიოზული უბალანსობის წარმოქმნიდან 2-3 წამის შემდეგ სიხშირის სიდიდე ხდება არასასურველი, რაც იწვევს მნიშვნელოვანი სიდიდის დატვირთვის/გენერაციის გამორთვას საქართველოში და საბოლოოდ, დინამიური მდგრადობის დარღვევას. ამგვარად, საჭიროა სწრაფი რეაქცია ნებისმიერი სერიოზული სიდიდის უბალანსობის შემთხვევაში. დინამიური მდგრადობის შენარჩუნების ერთერთ საუკეთესო საშუალებას მუდმივი დენის ჩანართის აქტიური სიმძლავრის კონტროლი წარმოადგენს. იმ შემთხვევაში, თუ ჩანართის თითოეული ბლოკით გამავალი სიმძლავრე 350 მგვტ-ია, რეგულატორს შეუძლია მათი შემცირება თითქმის ნულამდე. მუდმივი დენის ჩანართს არ გააჩნია დროის მუდმივა. თუ იმუშავებს სამი ბლოკი, მაშინ მთლიანობაში შესაძლებლობა იქნება შემცირდეს მათზე გადადინებული აქტიური სიმძლავრე 1000 მგვტ-ით, დროის დაყოვნების გარეშე. ამ მეთოდის გამოყენებით, ჩვენ დაგვჭირდება გამოვრთოთ 100-200 მგვტ-ის მომხმარებელი, ნაცვლად 500-600 მგვტ-ისა (როდესაც ჩანართის რეგულირება არაა მოქმედებაში). მოკლე პერთვის შემთხვევაში, რეგულატორი მყისიერად შეამცირებს ჩანართით გამავალ აქტიურ სიმძლავრეს თითქმის ნულამდე, რომელიც აღდგენილი იქნება დაზიანებული ხაზის ამორთვისთანავე. ამ დროისთვის, მბრუნავი რეგერვი ამოქმედდება და სიხშირე შენარჩუნდება ნომინალური სიდიდესთან (50 ჰც) ახლოს.

ნაშრომის IV თავი მოიცავს საქართველოს ელექტრული სისტემის სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ალგორითმის დამუშავებას. ახლო მომავალში შეიქმნება 1000-1400 მგვტ სიმძლავრის ტრანზიტი საქართველოს გავლით. სიმძლავრის ასეთი დიდი ნაკადები ქმნიან საქართველოს სისტემისათვის გარკვეულ პრობლემებს დინამიური მდგრადობის შენარჩუნების თვალსაზრისით. მუდმივი დენის ჩანართის ნებისმიერი ავარიული გამორთვა შექმნის საქართველოს სისტემაში სიმძლავრის დეფიციტს ან ნაჭარბს. სისტემის დინამიური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის საჭიროა არსებობდეს სასისტემო ავტომატიკა, რომელიც კრიტიკულ სიტუაციებში გამორთავს ტვირთის ან გენერაციის ნაწილს. ასეთი ავტომატიკის ლოგიკა შემუშავებული უნდა იყოს მუდმივი დენის ჩანართების სიმძლავრის რეგულირების შესაძლებლობების გათვალისწინებით. ჩანართების სიმძლავრის ავტომატური რეგულირება ხორციელდება საქართველოს სისტემის სიხშირის გადახრის და

სიხშირის წარმოებულის პროპორციულად. სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ლოგიკა დამოკიდებულია ჩანართების სიმძლავრეზე და ამ სიმძლავრის მიმართულებაზე. ჩანართის ავარიული გამორთვისას გამოსართავი სიმძლავრის დასადგენად მოხდა საქართველოს ელექტრული სისტემის მოდელირება PSS/E პროგრამის მეშვეობით. განხილული იყო სიმძლავრის გაცემის სხვადასხვა რეჟიმი და სისტემის გენერატორების სხვადასხვა შემადგენლობა (სისტემის სხვადასხვა ჯამური T_j). მოდელირების შედეგების საფუძველზე მიღებული იქნა ანალიზური დამოკიდებულება. აღნიშნული გამოსახულებით მიღებული გამოსართავი გენერაციის სიდიდე შედარდა პროგრამა PSS/E-თი გარდამავალ პროცესში გამართულ გენერაციას და საკმაოდ მაღალი სიზუსტით (93-94%) დაემთხვა მას. ამასთან, ალგორითმით მომუშავე სასისტემო ავტომატიკა მოქმედებს ადეკვატურად და სისტემის სიხშირე არ აღწევს 51 ჰერცს. აღნიშნული ლოგიკა შემუშავებულ იქნა რეჟიმისთვის, როდესაც საქართველოს სისტემა მუშაობს იზოლირებულად. რუსეთთან ან აზერბაიჯანთან პარალელური მუშაობისას მთელ უბალანსობას, რომელიც გამოწვეულია მუდმივი დენის ჩანართის ავარიული გამორთვით, თავის თავზე იღებს ეგზ კავკასიონი (რუსეთთან პარალელური სინქრონული მუშაობისას) ან მუხრანი (აზერბაიჯანთან პარალელური სინქრონული მუშაობისას).

ნაშრომის ბოლო, V თავში განხილულია ჰარმონიკული ანალიზის საქართველოს სისტემაში. ელექტრული სისტემის ნორმალური მუშაობისათვის გასათვალისწინებელია მასში არსებული ისეთი მონაცობილობების პარამეტრები, რომლებსაც შეუძლია მკვეთრი ზეგავლენა მოახდინოს რეჟიმზე, კონკრეტულად, სისტემაში არსებული ძაბვების სიდიდეებზე, მონაცობილობები, რომლებიც წარმოადგენენ ჰარმონიკების წყაროს. ჩვენს სქემაში ამგვარი მონაცობილობაა მუდმივი დენის ჩანართი, რომელიც უკვე მუშაობს ახალციხის 500 კვ-იან ქვესადგურში. ჩანართი გენერირებს სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკებს, რაც ამახინჯებს სისტემაში არსებულ ძაბვებს და აძლევს მათ სინუსოიდისაგან განსხვავებულ ფორმას. საქართველოს ქსელში არსებული ზოგიერთი ობიექტის მუშაობისათვის პრობლემას წარმოადგენს კონკრეტული რიგის ჰარმონიკა. ამდენად მნიშვნელოვნად მიგვაჩნია განვიხილოთ ჰარმონიკული ანალიზი ჩვენს ელექტროსისტემაში, გავიანგარიშოთ ჰარმონიკების რიგები, ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება და საჭიროების შემთხვევაში შევიმუშავოთ დამატებითი ღონისძიებები. აღნიშნულ თავში განხილულია ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის და მარნეულის ჩანართების გათვალისწინებით. ნაჩვენებია მათი ზეგავლენა ჰარმონიკების სიდიდეებზე ელექტრული ქსელის ცალკეულ პუნქტებში. ნაშრომის დასასრულს გაკეთებულია შესაბამისი დასკვნები.

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

კვლევის აქტუალობა. საქართველოს მდიდარი ჰიდროენერგეტიკული რესურსების ათვისება და მაღალი ძაბვის ქსელის განვითარება საშუალებას იძლევა განხორციელდეს ელექტრული ენერჯის ექსპორტი და ტრანზიტი მეზობელ ქვეყნებში (აზერბაიჯანი, თურქეთი, სომხეთი, რუსეთი). თურქეთში ექსპორტის მოცულობამ უახლოეს მომავალში შეიძლება მიაღწიოს 1000 მგვტ-ს და მეტს. ექსპორტი განხორციელდება არა მარტო საქართველოს ჰიდრორესურსების, არამედ საქართველოს გავლით აზერბაიჯანიდან, სომხეთიდან ან რუსეთიდან მიღებული ენერჯის ხარჯზე. თურქეთის ელექტროსისტემა მუშაობს სინქრონულად ევროპის ზონასთან. რადგანაც საქართველოს ელექტროსისტემა ჯერჯერობით ვერ აკმაყოფილებს ევროპის ზონის მოთხოვნებს, კავშირი საქართველოსა და თურქეთის ელექტრულ სისტემებს შორის განხორციელებულია მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით. ამასთან, საქართველოსა და სომხეთის სისტემებს შორის შედგება 400 კვ-იანი კავშირი ასევე მუდმივი დენის ჩანართით.

საქართველოს სისტემა სინქრონულად მუშაობს რუსეთისა და აზერბაიჯანის სისტემებთან. ცალკეულ ენერჯოსისტემაში არსებობს ისეთი ავარიები, რომელთაც შეუძლიათ გამოიწვიონ ამ სისტემის მდგრადობის დარღვევა. სწორედ ასეთ დაზიანებად შეიძლება განვიხილოთ რომელიმე სისტემათაშორისი გადაცემის ხაზის გამორთვა რაიმე მიზეზით, როდესაც მასზე გადადინება იქნება 600, 700 მგვტ და მეტი.

არსებული მეთოდების ნაკლოვანება. ბუნებრივია, ნებისმიერ რეჟიმში სისტემას გააჩნია მბრუნავი რეზერვი, რომლის ამოქმედებასაც აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევის შემთხვევაში უზრუნველყოფს გენერატორების სიჩქარის რეგულატორები. ამასთან აღსანიშნავია, რომ მიუხედავად ტურბინის სიჩქარის რეგულატორების სახესხვაობისა, უეცრად წარმოქმნილ დეფიციტზე მყისიერი რეაგირება არცერთ მათგანს არ შეუძლია მათი მნიშვნელოვანი ინერციულობის გამო.

გარდამავალ პროცესს, როდესაც ადგილი აქვს მნიშვნელოვან უბალანსობას, თან სდევს სიხშირის მნიშვნელოვანი ცვლილება. სისტემის ნორმალური მუშაობის შენარჩუნების მთავარი ამოცანაა: 1) სიმძლავრის დეფიციტის დროს სიხშირე არ დაეარდეს გარკვეულ სიდიდემდე (48.8 ჰც), რაც გამოიწვევს საქართველოს ელ. ენერჯის მომხმარებლების გამორთვას აქტიური სიმძლავრის ბალანსის აღდგენის მიზნით; 2) სიმძლავრის ნაჭარბისას სიხშირე არ გაიზარდოს 51 ჰც-მდე, რაც წარმოადგენს საქართველოში გენერატორების სიხშირის რეღეების დანაყენს. თუკი საქართველოს სისტემაში დაზიანების

შემდგომ გარდამავალ პროცესში სიხშირე გაიზრდება 51 ჰც-ზე მეტად, სიხშირის რეგულაციები გენერატორებს ქსელიდან გამორთავენ.

ნაშრომის მიზანი. ტურბინის სიჩქარის რეგულატორების დიდი ინცერციულობიდან გამომდინარე, რეკომენდებულია მოიძებნოს ისეთი ღონისძიებები, რომლებიც საჭიროებისდა მიხედვით, აქტიური სიმძლავრის უეცარი დეფიციტისა/ნაჭარბის პირობებში შეინარჩუნებენ საქართველოს დატვირთვებს/გენერატორებს მუშაობაში და ამასთან უზრუნველყოფენ დინამიურ მდგრადობას შენარჩუნებას. სწორედ ასეთ ღონისძიებად მიგვაჩნია მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირება, რისი საკითხების შესწავლაც წარმოადგენს ნაშრომის ერთერთ მიზანს. მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირების პროცესს თან არ ახლავს ინერცია, რაც ნიშნავს, რომ რეგულატორს, საჭიროებისდა მიხედვით, სიხშირესა და სიხშირის წარმოებულზე დამოკიდებულებით, შეუძლია მყისიერად, ნულოვანი დროის დაყოვნებით სიმძლავრის დეფიციტის შემთხვევაში შეამციროს და პირიქით, სიმძლავრის ნაჭარბის პირობებში თითოეული ჩანართის ბლოკისთვის მაქსიმუმამდე (350 მგვტ) გაზარდოს მათზე სიმძლავრის გადაღინება.

მეცნიერული სიახლე. ახალციხისა და ბათუმის მუდმივი დენის ჩანართები, რომლებიც ასინქრონულად აკავშირებს საქართველოსა და თურქეთის ელექტროსისტემებს, წარმოადგენს პირველ ჩანართებს მთელ კავკასიაში და მის მეზობელ ენერგოსისტემებში. ამგვარად, ნაშრომში წარმოდგენილი საკითხები პირველი მცდელობაა შესწავლილ იქნას მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირების საკითხები. ნაშრომში განხილულია რამოდენიმე ძირითადი რეგულატორი, რომელიც აღებულია პროგრამა PSS/E-ს ბიბლიოთეკიდან. განხილულია რიგი სტატიკური და დინამიური მდგრადობის შემთხვევებისა და შემუშავებულია მდგრადობის შენარჩუნების პირობები. ასევე პირველი შემთხვევაა პროგრამა DIGSILENT-ის საშუალებით საქართველოს სისტემაში ენერჯის ხარისხის შეფასება, რაც მოიცავს როგორც ახალციხის, ასევე ახალციხისა და რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართების ზეგავლენის შესწავლას ძაბვებზე საქართველოს სისტემის 500 კვ-იან პუნქტებში და შესაბამისი რეკომენდაციების გაკეთებას.

პრაქტიკული მნიშვნელობა. ნაშრომში ჩატარებული ანალიზის შედეგების საფუძველზე შესაძლოა გაიყოს რეკომენდაციები ახალციხისა და მუდმივი დენის ჩანართების რეგულირების კუთხით, რაც უზრუნველყოფს მდგრადობის შენარჩუნებას მთელი რიგი დიდი შემფოთებების შემთხვევაში, იქნება ეს მოკლე შერთვები, ხაზების ავარიული გათიშვა, გენერატორების ქსელიდან გამოყოფა თუ სხვა. აღნიშნული მიიღწევა იმის საფუძველზე, რომ მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულატორს შეუძლია საჭიროებისდა მიხედვით მყისიერად

ფაქტიურად ნულამდე შეამციროს ან მაქსიმუმამდე (350 მგვტ) გაზარდოს თითოეული ჩანართის ბლოკით გამავალი სიმძლავრე, სიმძლავრის დეფიციტისა თუ ნაჭარბის აღმოფხვრის შემდეგ, ასევე მყისიერად დააბრუნოს ავარიისწინა ნორმალურ რეჟიმში გამავალი სიმძლავრის სიდიდე თითოეული ჩანართის ბლოკზე. ამით საქართველოს სისტემა შეინარჩუნებს მნიშვნელოვანი სიდიდის მომხმარებლებსა თუ გენერატორებს გარდამავალ პროცესში.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მუდმივი დენის ჩანართებით იგეგმება ენერჯის მიმოცვლა საქართველოსა და სომხეთის სისტემებს შორისაც. აქედან გამომდინარე, სიმძლავრის უეცარი დეფიციტის ან ნაჭარბის აღმოფხვრის ერთერთ საშუალებად შესაძლოა ამ ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირებაც იქნას განხილული.

დღესდღეობით ელ. ენერჯის მიმოცვლისას უფრო და უფრო მეტს მნიშვნელობას იძენს ენერჯის ხარისხი. ნაშრომში განხილულია ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში მუდმივი დენის ჩანართის გათვალისწინებით. ნაჩვენებია მეთოდები, რაც უზრუნველყოფს ქსელის ნებისმიერ წერტილში როგორც ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების, ასევე კონკრეტული რიგის ჰარმონიკების სიდიდეების დასაშვებ ფარგლებში არსებობას.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თემატურ სემინარებზე და მოწონებულ იქნა ფაკულტეტის სამეცნიერო საბჭოს მიერ. აგრეთვე, წარმოდგენილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე:

2013 წელი, ენერჯეტიკის სექცია - I ადგილი.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია სტატიები საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 158 გვერდისაგან. იგი შეიცავს შესავალს, ხუთ თავს, დასკვნასა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას.

ექსპერიმენტული ნაწილის შესახებ

ნაშრომის II, III, IV და V თავები წარმოადგენს კვლევისა და ექსპერიმენტის შედეგებს. ექსპერიმენტები ჩატარებული იქნა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში (ელექტრული ენერჯის გადაცემა და განაწილების მიმართულება) და საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემის დისპეტჩერიზაციის დეპარტამენტში.

თავი 1

ელექტრული სისტემის ანალიზი და კონტროლი

ელექტრული სისტემის მდგრადობა წარმოადგენს სინქრონული მანქანების უნარს, შეშფოთების შედეგად სინქრონიზაციის დაკარგვის გარეშე გადავიდნენ ერთი დამყარებული რეჟიმის წერტილიდან მეორე დამყარებული რეჟიმის წერტილზე. არსებობს ელექტრული სისტემის მდგრადობის სამი სახე: სტატიკური, გარდამავალი და დინამიური.

სტატიკური მდგრადობა გულისხმობს ნელ ანუ საფეხურებრივ ცვლილებებს ელექტრული სისტემის მუშა რეჟიმში. რიგ შემთხვევებში, არამდგრადობა და შემდგომი სინქრონიზაციის დაკარგვა გამოწვეულია მცირე შეშფოთებით სისტემაში, რაც იწვევს რხევებს და მისი არჩაქრობის შემთხვევაში ამ პროცესმა შესაძლოა მიიღოს განმლადი სახე. ამგვარი მცირე შეშფოთებების ტიპური მაგალითებია: მცირე ცვლილება გენერატორის დადგეგმილ გამომომავებულ სიმძლავრეში, რაც იწვევს ასევე მცირე ცვლილებას მისი როტორის კუთხეში; ქსელის დატვირთვის მცირე სიდიდით გაზრდა (დაახლოებით სისტემის ჯამური სიმძლავრის 1%-ით ან ნაკლებით).

სტატიკური მდგრადობის შესწავლა, რომელიც როგორც წესი ხდება ნაკადგანანნილების გამომთვლელი პროგრამის საშუალებით, რომელიც აკეთებს დაშვებას, რომ ფაზური კუთხეები გადამცემი ხაზების გასწვრივ არ არის ძალიან დიდი, კვანძური ძაბვები ახლოსაა მათ ნომინალურ მნიშვნელობებთან, გენერატორები, ელექტროგადამცემი ხაზები, ტრანსფორმატორები და სხვა მონყობილობები არაა გადატვირთული.

გარდამავალი მდგრადობა გულისხმობს მნიშვნელოვანი სიდიდის შეშფოთებებს, მაგალითად გენერაციის დაკარგვას, ხაზის გადართვის ოპერაციებს, დაზიანებებს, დატვირთვის უეცარ ცვლილებას, ასევე მეხის დაცემით

გამონწვეულ დაზიანებებს. შეშფოთების შედეგად, სინქრონული მანქანების სიხშირე განიცდის გარდამავალ გადახრას სინქრონული სიხშირის დონისგან (50 ჰც) და გენერატორის ელექტრულ კუთხზე იცვლება. გარდამავალი მდგრადობის შესწავლის მიზანია განისაზღვროს, დაბრუნდება თუ არა ელექტრული მანქანა სინქრონულ სიხშირეზე ახალი დამყარებული რეჟიმის ელექტრულ კუთხეზე. სიმძლავრის გადაღინებები და სალტის ძაბვები ასევე მნიშვნელოვანია.

დინამიური მდგრადობა მოიცავს კიდევ უფრო გძელვადიან პროცესებს, რომლებიც როგორც წესი რამოდენიმე წუთის განმავლობაში მიმდინარეობს. დინამიური მდგრადობა შესაძლოა დაირღვეს იმ შემთხვევაშიც კი თუ გარდამავალი მდგრადობა მიღწეულია. ტურბინის რეგულატორის, აგზნების სისტემების, დატვირთვის ქვეშ რეგულირებადი ტრანსფორმატორების და ელექტროსისტემის სადისპეტჩერო ცენტრის საკონტროლო ქმედებებმა შესაძლოა ზეგავლენა მოახდინოს ელექტრული სისტემის სტაბილურობასა თუ არასტაბილურობაზე რამოდენიმე წუთის შემდეგაც კი მას შემდეგ, რაც შეშფოთება წარმოიქმნა.

ელექტრული სისტემის კონტროლი წარმოადგენს ავტომატური და ოპერატიული პერსონალის მიერ შესრულებული პროცესების ერთობლიობას და მისი დანიშნულებაა უზრუნველყოს ელექტრული სისტემის ერთიანობა და მისი დაბრუნება ნორმალურ მუშა მდგომარეობაში, რომელზეც ზეგავლენა მოახდინა ფიზიკურმა (მცირე ან ძლიერი) შეშფოთებამ. სხვა სიტყვებით, ელექტრული სისტემის კონტროლი ნიშნავს ელექტრული სისტემის სასურველი პარამეტრების და სტაბილურობის შენარჩუნებას მას შემდეგ, რაც სისტემაში მოხდა ისეთი სახის შეშფოთება, როგორცაა მოკლე შერთვა, გენერაციის ან დატვირთვის დაკარგვა და ა.შ.

თავდაპირველად ელექტრული სისტემის მდგრადობა და კონტროლი მნიშვნელოვან ამოცანად მიჩნეულ იქნა XX საუკუნის 20-იან წლებში. დღემდე ინჟინრული ძალისხმევითა და ინტერესის უდიდესი ნაწილი კონცენტრირებულია სინქრონული მანქანის როტორის კუთხის სტატიკური და დინამიური მდგრადობის შესწავლაზე. დღესდღეობით ამ მიზნით, სრულფასოვანი მოდელირების და სიმულაციის უამრავი მძლავრი პროგრამაა უკვე შექმნილი, კონტროლისა და დაცვის სხვადასხვა სქემებია შემუშავებული.

1990 წლიდან მოყოლებული, გენერატორების აგზნების სისტემების, სტატიკური რეგულირებადი კომპენსატორების და მაღალი ძაბვის მუდმივი დენის ჩანართის კონვერტორების დამატებითი კონტროლი უფრო და უფრო ხშირად გამოიყენება ელექტრულ სისტემაში არსებული რხევების ჩასახშობად. ასევე იყო გამოხატული საერთო ინტერესი ძალურ ელექტრონიკაზე აგებული კონტროლერების (ცნობილია როგორც ცვლადი დენის გადაცემის მოქნილი სისტემები - FACTS, flexible AC transmission system) გამოყენების მხრივ სისტემური რხევების ჩასაქრობად. რამოდენიმე სისტემური ავარიის ხასიათიდან გამომდინარე, 90-იანი წლებში ძაბვის სტაბილურობას ექცეოდა მეტი ყურადღება. შემუშავებულ იქნა მძლავრი ანალიტიკური ინსტრუმენტები და სინთეზური მეთოდოლოგიები.

დღესდღეობით სიხშირის რეგულირება იძენს უფრო და უფრო მეტ მნიშვნელობას, გამომდინარე იქიდან, რომ იზრდება ელექტრული სისტემების ფარგლები, იცვლება ურთიერთდაკავშირებული ელექტრული სისტემების სტრუქტურა და კომპლექსურობა. თანამედროვე ელექტრულ სისტემებში დატვირთვა-სიხშირული რეგულირება თამაშობს ფუნდამენტურ როლს, როგორც დამხმარე მომსახურება, რაც ხელს უწყობს სისტემებს შორის ენერგომომოცვლას და უზრუნველყოფს უკეთეს პირობებს ელექტროენერჯით ვაჭრობისათვის.

თავი 2

სტატიკური მდგრადობის ანალიზი

საქართველოდან და აზერბაიჯანიდან ან საქართველოდან და რუსეთიდან ენერჯის დიდი რაოდენობით ექსპორტი თურქეთში იგეგმება ახალციხის ქვესადგურში მშენებარე მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით. იგეგმება 800-1000 მგვტ სიმძლავრის გაცემა. ვინაიდან საქართველოს ელექტრული სისტემის უდიდეს ნაწილს შეადგენენ ჰიდროსადგურები, მოსალოდნელია ენერჯის ექსპორტში საქართველოს წილის მერყეობა საკმაოდ დიდ ფარგლებში. კერძოდ, წყალუხვობის პერიოდში ეს წილი იქნება 70-90% ღონებზე, ხოლო წყალმცირობის პერიოდში კი 30-40%-ს ღონებზე. ეს ყველაფერი სამართლიანია 2016-2017 წლებისათვის, როცა მწყობრში შევა ახალი ჰიდროსადგურების გარკვეული რაოდენობა.

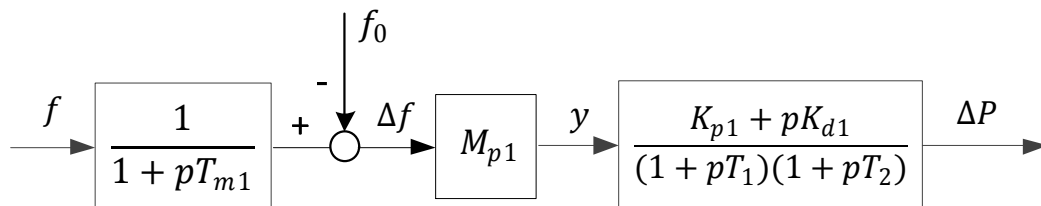
საქართველოს ელექტრული სისტემა ამჟამად დაკავშირებულია აზერბაიჯანის სისტემასთან 330 კვ ძაბვის ხაზით “გარდაბანი”. ამ ხაზის გამტარუნარიანობაა 350 მგვტ. შენდება ქვესადგურ “გარდაბანი-500”-ისა და “სამუხ-500”-ის დამაკავშირებელი 500 კვ ძაბვის ხაზი „მუხრანი“. ამ ხაზის გამტარუნარიანობა 1500-1700 მგვტ იქნება.

2017 წლისათვის საქართველოს ზამთრის მაქსიმალური რეჟიმი ხასიათდება 2300-2400 მგვტ გენერაციით და 2000-2200 მგვტ მოხმარებით. ამ პერიოდში ენერჯის ექსპორტის მხოლოდ 300-350 მგვტ მოდის საქართველოს წილად, დანარჩენი 400-650 მგვტ ტრანზიტით გავა ან აზერბაიჯანიდან ანდა რუსეთიდან. ასეთ შემთხვევაში რუსეთთან შემაერთებელი ხაზის “კავკასიონის” ანდა აზერბაიჯანთან 500 კვ ხაზის ავარიული გამორთვა გამოიწვევს აქტიური სიმძლავრის დიდ დეფიციტს საქართველოს ელექტრულ სისტემაში. სიხშირის

სწრაფი შემცირების პირობებში სისტემის მდგრადობის შენარჩუნება შესაძლებელია:

1. სასისტემო ავტომატიკით ან საგ-ებით დეფიციტის შესაბამისი ტვირთის გამორთვა საქართველოში;
2. თურქეთში გაცემული სიმძლავრის შემცირება წარმოქმნილი დეფიციტის სიდიდით;
3. გარკვეული პროპორციით თურქეთში გაცემული სიმძლავრის შემცირებითა და საქართველოს დატვირთვების ერთდროული გამორთვით.

ანალიზის პირველ ეტაპზე განვიხილეთ რეგულირებადი ჩანართის გავლენა სისტემის სტატიკურ მდგრადობაზე. ჩანართის მიერ გაცემული სიმძლავრის რეგულირება სიხშირის მიხედვით შესაძლებელია CHAAT ტიპის რეგულატორით.



ნახ. 1 CHAAT რეგულატორის ბლოკ-სქემა

სადაც:

T_{M1} – მრიცხველის დროის მუდმივია; $M_{P1} \left[\frac{MW}{Hz} \right]$ – სიმძლავრის ცვლილების სიჩქარეა (მგვტ/ჰერცი); K_{p1}, K_{d1} – რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტებია; T_1, T_2 – რეგულატორების დროის მუდმივებია. ΔP – სიმძლავრის ნაზრდი გამოწვეული ჩანართის რეგულატორით (მგვტ). T_{M1} ჩავთვალოთ ნულის ტოლად.

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორში აღწერილია შემდეგი დიფ. განტოლებით:

$$\Delta f \cdot M_{p1} \cdot (K_{p1} + pK_{d1}) = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P \quad (2.1)$$

ჩვენერთ ეს განტოლება ფარდობით ერთეულებში:

$$f_o \left(\frac{\Delta f}{f_o} \right) \cdot \frac{M_{p1}}{S_b} \cdot (K_{p1} + pK_{d1}) = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \frac{\Delta P}{S_b}$$

$$s * K_1 + psK_2 = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P_*$$

აქ $K_1 = f_o \frac{M_{p1}}{S_b} K_{p1}$, $K_2 = f_o \frac{M_{p1}}{S_b} K_{d1}$

ეკვივალენტური სისტემის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე:

$$T_j \frac{ds}{dt} = \frac{P_0}{1+s} - P_{გლ} - \Delta P$$

$$s * K_1 + psK_2 = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P_*$$

შენიშვნა: დრო და დროის მუდმივები წამებშია, სიმძლავრე - ფარდობით ერთეულებში. სისტემაში უსასრულოდ მცირე შემფოთების შემოტანის და მარტივი მათემატიკური გარდაქმნების ჩატარების შემდეგ მივიღებთ:

$$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (2.2)$$

სადაც:

$$a_0 = T_j T_1 T_2; \quad a_1 = T_j (T_1 + T_2) + P_0 T_1 T_2; \quad a_2 = T_j + P_0 (T_1 + T_2) + K_2; \quad a_3 = P_0 + K_1$$

ოთხივე კოეფიციენტი დადებითია სისტემის ნებისმიერ რეჟიმში (ნებისმიერი P_0 -ის დროს), რადგან რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტები თავისთავად დადებითი რიცხვებია. ეს მდგრადობის აუცილებელი პირობაა, მაგრამ არასაკმარისი. მაგალითისათვის განვიხილოთ კონკრეტული შემთხვევა:

საქართველოს სისტემა მუშაობს იზოლირებულად. რეჟიმის პარამეტრები აღებულია ფარდობით ერთეულებში და მოცემულია ქვემოთ:

$$T_j = 277 \text{ წმ}, M_{p1} = 80, f_0 = 50, T_1 = 0.05, T_2 = 0.05, P_0 = 28, K_1 = 50, K_2 = 0$$

(2.2) მახასიათებელ განტოლებას ეწენება სახე:

$$0,6925 \cdot p^3 + 27,84 \cdot p^2 + (279,8 + K_2) \cdot p + 28 + K_1 = 0$$

თუ $K_1 = 50$, მაშინ K_2 -ს ცვლილებისას 0-დან 10000-მდე ფესვების სიდიდები იცვლება $p_1 = -0,287$, $p_2 = -22,34$, $p_3 = -17,56$ -დან

$$p_1 = -0,0015, p_2 = -20,1 + j268, p_3 = -20,2 - j268 \text{ -მდე}$$

სამივე ფესვი უარყოფითია, ან აქვს უარყოფითი ნამდვილი ნაწილი. ამ პირობებში სისტემა სტატიკურად მდგრადია.

ავიღოთ $K_2 = 50$ და ვცვალოთ K_1 0-დან 13260-მდე

$K_1 = 0$ – სათვის მივიღეთ შემდეგი ფესვები:

$$p_1 = -0,085, p_2 = -20,05 + j8,39, p_3 = -20,05 - j8,39$$

$K_1 = 13260$ – სათვის კი:

$$p_1 = -40,2 p_2 = 0,0108 + j21,8, p_3 = 0,0108 - j21,8$$

K_1 –ს შემდგომი ზრდა გვაძლევს კომპლექსურ ფესვებს დადებითი ნამდვილი ნაწილით, რაც არამდგრადობის ნიშანია. დასადგენია მოცემულ რეჟიმში რეგულირების კოეფიციენტების დასაშვები ზღვრები.

ამ ამოცანის გადაწყვეტა შესაძლებელია ნაიკვისტის, ანუ D-დანაწილების მეთოდის გამოყენებით. ამისათვის მახასიათებელ განტოლებაში p შევცვალოთ $j\omega$ –თი:

$$0,6925 \cdot p^3 + 27,84 \cdot p^2 + (279,8 + K_2) \cdot p + 28 + K_1 = 0$$

შევიტანოთ p –ს მაგივრად $j\omega$.

$$0,6925 \cdot (j\omega)^3 + 27,84 \cdot p(j\omega)^2 + (279,8 + K_2) \cdot (j\omega) + 28 + K_1 = 0$$

განვაცალკევოთ პოლინომის ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილები:

$$-j0,6925 \cdot \omega^3 - 27,84 \cdot \omega^2 + j\omega 279,8 + j\omega K_2 + 28 + K_1 = 0$$

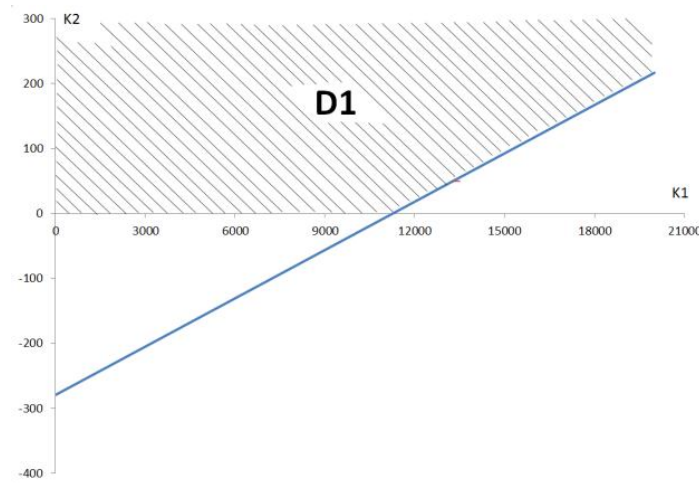
ანუ

$$-27,84 \cdot \omega^2 + 28 + K_1 = 0$$

$$-j0,6925 \cdot \omega^3 + j\omega 279,8 + j\omega K_2 = 0$$

აქედან: $K_2 = -279,1 + 0,0248K_1$

ეს მრუდი ნაჩვენებია ნახ. 2-ზე.



ნახ. 2 D-დანაწილების (ნაიკვისტის) მრუდი იზოლირებულად მომუშავე საქართველოს სისტემის შემთხვევაში

ვინაიდან კოეფიციენტების უარყოფით მნიშვნელობებს აზრი არა აქვს, ხოლო $K_1 = 13260$ და $K_2 = 50$ –ის დროს სისტემა სტატიკურად არამდგრადია, გამოდის, რომ კოეფიციენტები უნდა შევარჩიოთ D_1 არედან.

თავი 3

დინამიური მდგრადობის ანალიზი

პროგრამა PSS/E-ს საშუალებით ჩატარდა დინამიური მდგრადობის ანალიზი 2017 წლის რეჟიმისთვის, სადაც საქართველო მუშაობს პარალელურად აზერბაიჯანის სისტემასთან და მუდმივი დენის ჩანართებით (ახალციხესა და ბათუმში) ანუ სიხშირულად გაყოფილად თურქეთის სისტემასთან. რეჟიმის პარამეტრები: ჯამური გენერაცია 2300 მგვტ, დატვირთვა 1920 მგვტ, ექსპორტი თურქეთში 1050 მგვტ, იმპორტი აზერბაიჯანიდან 725 მგვტ. განხილული იქნა ორი ვარიანტი:

- 1) სისტემაში ჩართულია სიჩქარის რეგულატორები და სასისტემო ავტომატიკა. გამორთულია მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორი და საგ-ები.
- 2) სისტემაში ჩართულია სიჩქარის რეგულატორები, მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორი და საგ-ები. გამორთულია სასისტემო ავტომატიკა.

შეშფოთება – აზერბაიჯანისა და საქართველოს სისტემების გაყოფა. ქვემოთ ცხრილებში მოცემულია ორივე ვარიანტის გაანგარიშებებიდან მიღებული შედეგები.

T_j წმ	$P_{რგვ}$ მგვტ	$\Delta P_{დატ}$ მგვტ	$\Delta P_{გეგ}$ მგვტ	$f_{მინ}$ ჰც
200	34	380	315	49.08
267	710	335	393	49.03
295	1056	328	410	49.05
351	1695	284	458	49.03
454	2900	248	538	49.07

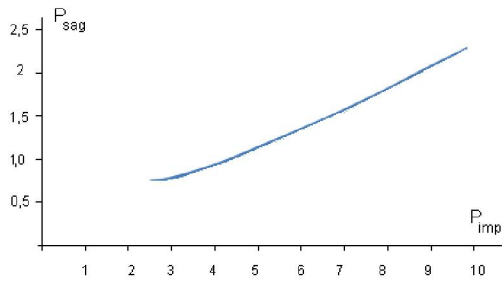
ცხრ. 1 საქართველოს სისტემაში სიჩქარის რეგულატორებისა და სასისტემო ავტომატიკის არსებობით მიღებული შედეგები

T_j მგვტ	$P_{რეგ}$ მგვტ	$\Delta P_{მეფ.}$ მგვტ	ΔP_{b2b} მგვტ	$f_{მინ}$ ჰც
200	34	316	510	49.20
267	710	350	423	49.24
295	1056	360	400	49.25
351	1695	380	380	49.27
454	2900	430	350	49.32

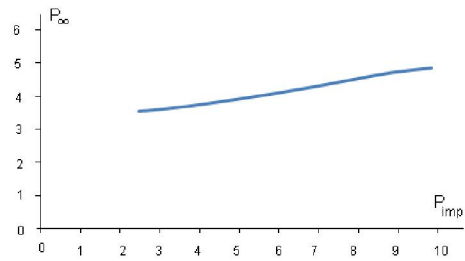
ცხრ. 2 საქართველოს სისტემაში სიჩქარის, ჩანართის რეგულატორებისა და საგ-ების არსებობით მიღებული შედეგები

იმის დასადგენად, თუ რა პროპორციით ნაწილდება საგ-ებით გამორთული დატვირთვა და ჩანართზე სიმძლავრის შემცირება, შევისწავლეთ, თუ როგორ წარიმართება გარდამავალი პროცესი ენერჯის იმპორტის შეწყვეტისას (უბალანსობის წარმოქმნა) და რა რეჟიმი დამყარდება ექსპორტის, გენერაციის შემადგენლობის, სისტემის გენერაციის მაქსიმუმის და დატვირთვის სიდიდის მუდმივობისას იმპორტის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს.

სისტემის ზემოთაღწერილი გამარტივებული მოდელის გამოყენებით ჩატარდა რეჟიმის მოდელირება იმპორტირებული $P_{imp} = 2.5 \div 10 pu$ სიმძლავრისათვის. (ბაზისური სიმძლავრე $S_B = 100 MVA$). მიღებულია შემდეგი რეზულტატები: იმპორტირებული სიმძლავრის 250-დან 1000 მგვტ-მდე ცვლილებისას, სიხშირე სისტემაში (არსებული დაშვებების ფარგლებში) იცვლება უმნიშვნელოდ 48.97-49.58 ჰერცის ფარგლებში. ჩანართის რეგულატორის გავლენით, ჩანართის სიმძლავრე დროებით მცირდება, 700 მგვტ-ის ტოლი იმპორტის დროს გარდამავალ პროცესში ეს სიმძლავრე მცირდება ნულამდე. გარდამავალი პროცესის განმავლობაში საგ-ები გამორთავენ ტვირთის ნაწილს (ნახ. 3) და ჩანართის რეგულატორი შეამცირებს მის სიმძლავრეს ახალ დამყარებულ რეჟიმში, ნახ. 4.

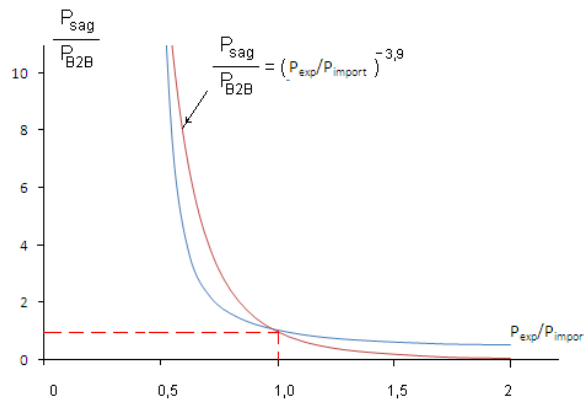


ნახ. 3 საგ-ებით გამორთული დატვირთვა
საქართველოში



ნახ. 4 ჩანართის სიმძლავრე

მიღებული რეზულტატები საშუალებას გვაძლევენ ვიპოვოთ, თუ რა დამოკიდებულებაა საგ-ებით გამორთული დატვირთვის ჯამური სიდიდის ფარდობას ჩანართის სიმძლავრის შემცირებასთან და ექსპორტ/იმპორტის სიმძლავრეთა თანაფარდობას შორის: $\frac{P_{sag}}{P_{B2B}} = f\left(\frac{P_{exp}}{P_{imp}}\right)$, ნახ. 5. ამ მრუდიდან ჩანს - თუ იმპორტირებული სიმძლავრე ტოლია ექსპორტირებულის, მაშინ იმპორტის ავარიული გამორთვისას საგ-ებით გამორთული მომხმარებლების ჯამური სიმძლავრე დაახლოებით ტოლი იქნება ჩანართის სიმძლავრის შემცირებისა.



ნახ. 5 P_{sag}/P_{B2B} თანაფარდობის დამოკიდებულება

P_{exp}/P_{imp} თანაფარდობასთან

თავი 4

ენერგოსისტემის სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის

ალგორითმის დამუშავება

საქართველოს ელექტრული სისტემის სწრაფი განვითარება ზრდის ელექტრული სისტემის სატრანზიტო და საექსპორტო შესაძლებლობებს. მგზობელ სისტემებთან (რუსეთი, აზერბაიჯანი) ოპერირება ხდება პარალელურ, სინქრონულ რეჟიმში, ხოლო თურქეთთან ასინქრონულად და სომხეთთანაც მომავალში შედგება ასინქრონული კავშირი, მუდმივი დენის ჩანართების საშუალებით. ახალციხის 500 კვ ძაბვის ქვესადგურში ენცობა სამი ჩანართი, თითოეული 350 მგვტ სიმძლავრის. აქედან 400 კვ ძაბვის ხაზით სიმძლავრე გადაიცემა თურქეთში. ბათუმში, 220 კვ ძაბვის ქვესადგურში, შენდება კიდევ ერთი 350 მგვტ სიმძლავრის ჩანართი და აქედან სიმძლავრე გადაიცემა თურქეთში 154 კვ ძაბვის ხაზით. სომხეთში, ქვესადგურ „ალავერდთან“ იგეგმება 700 მგვტ სიმძლავრის მუდმივი დენის ჩანართის აგება. ეს ჩანართი შეუერთდება საქართველოს ელექტროსისტემას 400 კვ ძაბვის ხაზით. სიმძლავრის ასეთი დიდი ნაკადები ქმნიან საქართველოს სისტემისათვის გარკვეულ პრობლემებს დინამიური მდგრადობის შენარჩუნების თვალსაზრისით. მუდმივი დენის ჩანართის ნებისმიერი ავარიული გამორთვა შექმნის საქართველოს სისტემაში სიმძლავრის დეფიციტს ან ნაჭარბს. სისტემის დინამიური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის საჭიროა არსებობდეს სასისტემო ავტომატიკა, რომელიც კრიტიკულ სიტუაციებში გამორთავს ტვირთის ან გენერაციის ნაწილს. ასეთი ავტომატიკის ლოგიკა უნდა იყოს შემუშავებული მუდმივი დენის ჩანართების სიმძლავრის რეგულირების შესაძლებლობების გათვალისწინებით.

საქართველოს დატვირთვის რეჟიმის უცვლელობის პირობებში, აღებულ იქნა ბათუმისა და რაზდანის ჩანართებით გამავალი სიმძლავრის რამოდენიმე ვარიანტი, საქართველოს სისტემის ინერციის მუდმივის რამოდენიმე სიდიდისათვის (ჯამური გენერაციის უცვლელად). განხილულ იქნა რამოდენიმე სცენარი, სადაც ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით თურქეთში გამავალი სიმძლავრე იყო $700 \div 1100$ მგვტ. შედეგების საფუძველზე მივიღეთ ანალიზური გამოსახულებები, რომელიც აკავშირებს გარდამავალ პროცესში გამოსართავ გენერაციას საქართველოს სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივასთან:

$$P_{გაღ} = 700 \text{ მგვტ} \rightarrow P_{გაშ} = (0.0008 \cdot \Delta P_{რგვ} - 0.6641) \cdot T_j + (-1.305 \cdot \Delta P_{რგვ} + 652.92),$$

$$P_{გაღ} = 800 \text{ მგვტ} \rightarrow P_{გაშ} = (0.00009 \cdot \Delta P_{რგვ} - 0.4186) \cdot T_j + (-1.0396 \cdot \Delta P_{რგვ} + 653.63),$$

$$P_{გაღ} = 900 \text{ მგვტ} \rightarrow P_{გაშ} = (0.0001 \cdot \Delta P_{რგვ} - 0.4267) \cdot T_j + (-1.1541 \cdot \Delta P_{რგვ} + 802.52),$$

$$P_{გაღ} = 1000 \text{ მგვტ} \rightarrow P_{გაშ} = (-0.0002 \cdot \Delta P_{რგვ} - 0.3289) \cdot T_j + (-1.1434 \cdot \Delta P_{რგვ} + 908.15),$$

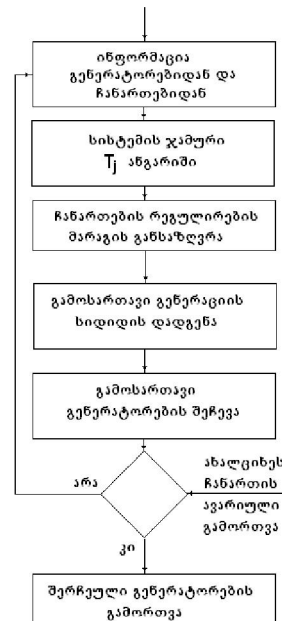
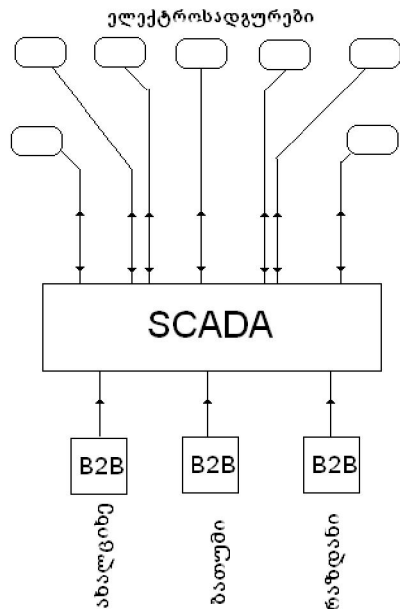
$$P_{გაღ} = 1100 \text{ მგვტ} \rightarrow P_{გაშ} = (0.0001 \cdot \Delta P_{რგვ} - 0.3662) \cdot T_j + (-1.2805 \cdot \Delta P_{რგვ} + 1063.2).$$

მოყვანილი ფორმულების საშუალებით, კონკრეტულ რეჟიმში, როცა ცნობილია სისტემის ჯამური ინერციის მუდმივა და ჩანართების რეგულირების მარაგი, შეიძლება ვიპოვოთ გამოსართავი გენერაციის სიდიდე. მოთხოვნა, რომ სისტემის სიხშირემ არ გადააჭარბოს 51 ჰერცს, რჩება ძალაში.

დავუშვათ რაღაც რეჟიმში ცნობილია $\Delta P_{რგვ}$ და T_j . ზემოთ მოყვანილი ფორმულებით ვპოულობთ გამოსართავი გენერაციის ხუთ სიდიდეს. აღნიშნულ პირობებში გამოსართავი გენერაცია ფუნქციას მხოლოდ თურქეთში გადადინების სიდიდისა. უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენებით, შესაძლებელია ეს ფუნქცია გამოვსახოთ პოლინომით:

$$P_{გაშ1} = a_0 * P_{გაღ}^2 + a_1 * P_{გაღ} + a_2 \quad (4.1)$$

სასისტემო ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის მოქმედება ავხსნათ ნახ. 6-ზე ნაჩვენები სქემის საშუალებით.

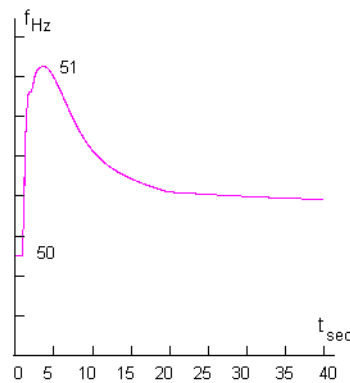


ნახ. 6 ავარიის საწინააღმდეგო ავტო- ნახ. 7 Visual Basic-ში დანერგილი

მატიკის მოქმედების პრინციპი პროგრამის მუშაობის ალგორითმი

საინფორმაციო სისტემა SCADA-სთან ინტეგრირებულ კომპიუტერში, ელექტროსადგურებიდან ოპტიკური კაბელებით შედის სიგნალი სადგურის გენერატორების მდგომარეობის (ჩართული/გამორთული) და გენერატორების დატვირთვის შესახებ. ამავე კომპიუტერში შედის სიგნალი - მუდმივი დენის ჩანართების დატვირთვის პროპორციული. ამ სიგნალების განახლება ხდება მცირე დროის (2-3 წამი) ინტერვალით. კომპიუტერში ჩატვირთული პროგრამა მუშაობს ნახ. 7-ზე ნაჩვენები ალგორითმით. მოცემული ალგორითმის მიხედვით, პროგრამულ ენა **Visual Basic**-ზე დაინერა პროგრამა. ამ პროგრამით და PSS/E პროგრამული კომპლექსით ხდებოდა სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის მოდელირება. განხილული იყო რეჟიმი, სადაც საქართველოს სისტემის ჯამური გენერაცია შეადგენდა 2475 მგვტ-ს, ჯამური დატვირთვა 1477 მგვტ-ს.

სომხეთიდან შემოდინება იყო 300 მგვტ. გაცემა თურქეთში: ახალციხიდან 1000 მგვტ და ბათუმიდან 250 მგვტ. სისტემის ჯამური ინერციის მუდმივა ტოლია 270 წამის (დაყვანილი 100 მგვტ-ზე). ზემოთმოყვანილი პროგრამით გამოსართავია 400 მგვტ ტოლი გენერაცია. პროგრამამ გამოსართავად შეარჩია შემდეგი სადგურების გენერატორები: ენგურჰესი გენერატორი N1 - 212 მგვტ, ნენსკრა ჰესი გენერატორი N1 - 89 მგვტ, ხულონი ჰესი გენერატორი N2 - 50 მგვტ და ნამახვანი ჰესი გენერატორი N1 - 60 მგვტ. გარდამავალი პროცესის მიმდინარეობა იყო შემდეგნაირი: ახალციხის ქვესადგურის 500 კვ მხარეს, მუდმივი დენის ჩანართზე სამთაზა მოკლე შერთვა გრძელდებოდა 0,12 წამი. ამის შემდეგ ჩანართი გამოირთო და სისტემაში შეიქმნა 1000 მგვტ-ის ტოლი სიმლავრის ნაჭარბი. სასისტემო ავტომატიკამ გამორთო ზემოთ ჩამოთვლილი გენერატორები და სიხშირემ მიაღწია 51 ჰერცს, რის შემდეგაც დაიწყო მისი შემცირება, ნახ. 8.



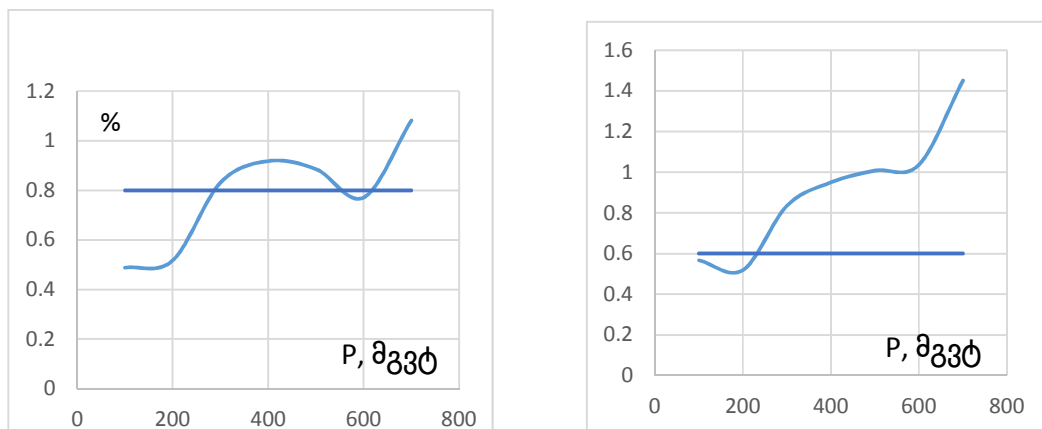
ნახ. 8 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

ამრიგად, ალგორითმით მომუშავე სასისტემო ავტომატიკა მოქმედებს ადეკვატურად და გარდამავალ პროცესში სიხშირე არ ცდება დასაშვებ ფარგლებს, შესაბამისად არ ხდება შესაბამისი დაცვებით დამატებითი გენერატორების გამორთვა.

თავი 5

ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს ელექტრულ სისტემაში

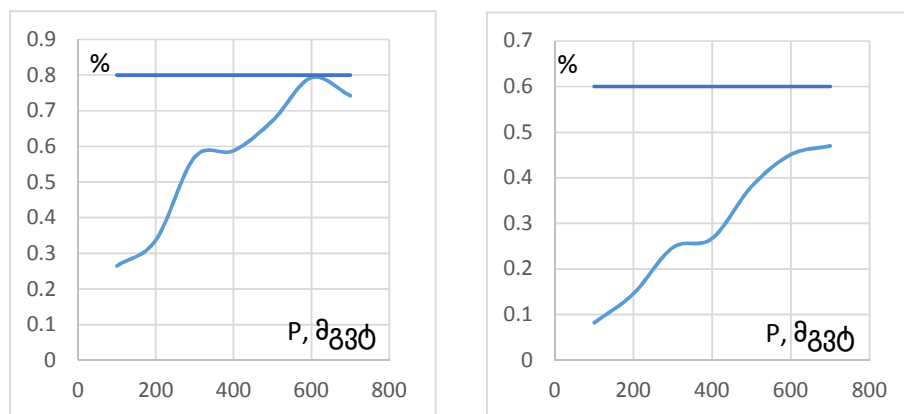
ჰარმონიკული ანალიზისთვის შეირჩა საქართველოს ელექტროსისტემის 2013 წლის ზამთრის ერთერთი რეჟიმი. ახალციხის ქვესადგურში არსებული მუდმივი დენის ჩანართი დამონტაჟებულ იქნა კომპანია „SIEMENS“-ის მიერ. მათივე რეკომენდაციაში ქართული მხარის მიმართ შედიოდა ცვლადი ძაბვის ფილტრების შემადგენლობა, რომელთაგან თითოეული ახშობს კონკრეტული რიგის ჰარმონიკას და ამით უზრუნველყოფენ ჩანართზე სხვადასხვა სიმძლავრის გადაღინების შემთხვევაში ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონის სასურველ ფარგლებში არსებობას. ანალიზის მიზანი იყო გვენახა, თუ რამდენად ადეკვატურად მოქმედებენ ფილტრები და საჭიროა თუ არა დამატებითი ღონისძიებები. შერჩეული რეჟიმის პარამეტრები იყო შემდეგი: ჯამური გენერაცია 1100 მგვტ, ჯამური დატვირთვა 1090 მგვტ, საქართველოს სისტემას აქვს პარალელური ასინქრონული კავშირი თურქეთთან ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით და პარალელური სინქრონული კავშირი აზერბაიჯანის სისტემასთან 500 კვ-იანი ხაზით „მუხრანი“. განვიხილეთ შვიდი რეჟიმი, სადაც თურქეთში სიმძლავრის გაცემა 100 მგვტ-იანი ბიჯით ვცვალებთ 100-დან 700 მგვტ-მდე და თითოეული რეჟიმის დროს თურქეთში ექსპორტის სიდიდე ტოლი იყო აზერბაიჯანიდან ეგზ „მუხრანით“ შემოსული იმპორტისა. ნახ. 9-ზე მოცემულია მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების რიგის ჰარმონიკები, რომელთა სიდიდეებიც 300 მგვტ და მეტის გაცემისას გაცდნენ დასაშვებ ზღვრებს. ლურჯი ჰორიზონტალური ხაზით ნაჩვენებია შესაბამისი რიგის ჰარმონიკის დასაშვები დონე. რაც შეეხება ჯამურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას, მისი დონე დასაშვებ ფარგლებშია.



ნახ. 9 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები

ახალციხის 500 კვ-იან სალტეზე

როგორც ვხედავთ, რეკომენდებულია დაიდგას ისეთი ფილტრები, რომლებიც შეზღუდავენ ზემოთხსენებული რიგის ჰარმონიკებს. ანალიზისათვის შეირჩა ფილტრი სიმძლავრით 55 მგვარ და სიხშირით 630 ჰც, რაც ნიშნავს, რომ იგი შედარებით მკვეთრად ჩაახშობს მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკებს.



ნახ. 10 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხის

500 კვ-იან სალტეზე

ნახ. 10-დან ჩანს, რომ ორივე რიგის ჰარმონიკის სიდიდე მოექცა დასაშვებ ფარგლებში სიმძლავრის მთელი (100-700 მგვტ) დიაპაზონის დროს.

დასკვნა

1. თუ მუდმივი დენის ჩანართის სიხშირის მიხედვით რეგულირების გაძლიების კოეფიციენტების სიდიდეები იქნება დადებითი და ამავდროულად რეალურ ფარგლებში, ეს უზრუნველყოფს როგორც სტატიკურ, ასევე დინამიურ მდგრადობას;
2. ალგორითმით მომუშავე სასისტემო ავტომატიკა მოქმედებს ადეკვატურად და სისტემის სიხშირე არ აღწევს 51 ჰერცს; აღნიშნული გამოსახულებით მიღებული გამოსართავი გენერაციის სიდიდე შედარდა პროგრამა PSS/E-თი გარდამავალ პროცესში გამორთულ გენერაციას და საკმაოდ მაღალი სიზუსტით (93-94%) დაემთხვა მას;
3. განხილულ იქნა აზერბაიჯანის სისტემასთან პარალელური მუშაობაც ეგზ „მუხრანით“. ბათუმის და მარნეულის ჩანართები იყო არარეგულირებადი. გამოყენებული არ იქნა სასისტემო ავტომატიკა გენერაციის გამოსართავად საქართველოში. გარდამავალ პროცესში სიხშირე საქართველოში გაიზარდა მხოლოდ 50,6 ჰერცამდე. ერთადერთი პრობლემაა სიმძლავრის რყევები ეგზ „მუხრანზე“ საკმაოდ დიდ ფარგლებში;
4. ახალციხის ქვესადგურში კომპანია „სიმენსის“ მიერ დამონტაჟებული ფილტრების არსებობის შემთხვევაში კონკრეტული რიგის ჰარმონიკების სიდიდეები (მე-11 და მე-13) ცდება დასაშვებ ფარგლებს. ამისათვის დამატებით ჩვენს მიერ ახალციხეში ჩართული იქნა 55 მგვარ სიმძლავრის ფილტრი სიხშირით 630 ჰც, რომელმაც შეამცირა და დასაშვებ ფარგლებში მოაქცია ზემოთხსენებული ჰარმონიკები;
5. საქართველოს სისტემასთან ალავერდის მუდმივი დენის ჩანართის კავშირის შემთხვევაში მარნეულში, მხოლოდ მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ცდება დასაშვებ ზღვარს 600 და 700 მგვტ-ის ექსპორტ/იმპორტის დროს. ახალციხის ანალოგიურად, ალავერდშიც შეირჩა დამატებითი ფილტრი (25 მგვარ სიხშირით 580 ჰც), რამაც უზრუნველყო მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდის მოქცევა დასაშვებ ზღვრებში;
6. ქსანსა და ენგურში მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე მნიშვნელოვნად აღემატებოდა დასაშვებ დონეს, ხოლო მე-11 ჰარმონიკის სიდიდე ახლოს იყო დასაშვებ დონესთან. ახალციხეში ერთი 55 მგვარ 630 ჰც ფილტრის ნაცვლად ჩავრთეთ ორი ფილტრი: 1) 25 მგვარ 550 ჰც და 2) 35 მგვარ 650 ჰც და ქსანში ერთი ფილტრი: 35 მგვარ 650 ჰც. შედეგად ქსანსა და ენგურში ორივე რიგის ჰარმონიკის სიდიდე მოექცა დასაშვებ ფარგლებში.

გამოქვეყნებული ლიტერატურა

1. საქართველო-აზერბაიჯანის გაერთიანებული სისტემის სტატიკური მდგრადობის ანალიზი, გ. ვახტანგაძე, მ. რუხვაძე, ჟურნალი „ენერჯია“, №2 (62), 2012
2. საქართველოს ელექტროსისტემის ავარიისსაწინააღმდეგო ავტომატიკის შესახებ, გ. ვახტანგაძე, მ. რუხვაძე, ჟურნალი „ენერჯია“, №4 (64), 2012
3. სტატიკური მდგრადობის ანალიზი სისტემაში რამოდენიმე რეგულირებადი მუდმივი დენის ჩანართის არსებობისას, გ. ვახტანგაძე, ჟურნალი „ენერჯია“, №2 (66), 2013
4. ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის არსებობისას, გ. ვახტანგაძე, ჟურნალი „ენერჯია“, №1 (69), 2014

Abstract

Georgia is a small country, power grid of which goes to expand day-by-day. Nowadays Georgia has the parallel synchronous connections with Russia and Azerbaijan. In addition, Georgia will have parallel asynchronous connections (through HVDC back-to-back station) with Armenia and Turkey. This means that in near future, power transit from Russia, Azerbaijan or Armenia to Turkey through Georgian system will be implemented.

Because of connection of Turkey with united European grid, Georgian system is connected to Turkey through Back-to-Back (B2B) station, which is located in Akhaltsikhe substation. In present time, two blocks are ready for operation, installation of third one in near future is planned. Nominal active power of each B2B block is 350 MW. In future, depending on scenario, there may be all three or two blocks in operation. Hence, the summary power flow will be in range of 700-1000 MW.

First chapter of Diploma work consists from overview of power system analysis and control. Basic overview of transient processes, concept and analysis of system stability, methods of power system control are represented here.

Second and third chapter of this Diploma work include respectively small signal and transient stability of Georgian system in case of regulation of back-to-back station(s). As it was mentioned above, Power transit from Azerbaijan to Turkey is also considered. In this case that part of exported capacity, which comes from Georgia will be about 300-350 MW. The remained 400-650 MW goes from Azerbaijan to Georgia as export and then, assumed with the capacity to be exported to Turkey (300-350 MW) goes to Turkey through Akhaltsikhe B2B station. Hence, it is necessary to avoid system instability in case of arising an important amount of power unbalance. Such a case may be the tripping of interconnection line between GE and AZ or blocking of Akhaltsikhe B2B station due some reasons (short circuit, for example). Because of this we have to use timely measures in order to maintain system stability. This measure may be use of frequency relays, spinning reserve or system automatic. But all of them are depended on some conditions. For example, until frequency level in Georgia reduce/increase to/up to the relays setting, frequency relays or system automatic will not work. Utilization of spinning reserve requires a specific time, because of existing of time constants of speed regulators. In some case, after 2-3 second of serious unbalance frequency value becomes unacceptable which causes tripping of important part of Georgian load/generation and finally violation of transient stability. According to this, we need fast response in case any serious unbalance. One of the best ways to achieve transient stability is control active power of B2B station. In this case, if seteval

MW for each block is 350 MW, regulator can immediately reduce it almost to zero. B2B station does not have time constant. If we have three blocks of this B2B station, then there is a possibility to reduce their power flow by 1000 MW – without time delay. Using this approach, we will need to trip 100-200 MW load instead of 500-600 MW (without regulation of B2B station). In case of short circuit, regulator of B2B station will immediately reduce active power almost to zero, which will be recovered just after faulted branch is tripped. For this time, spinning reserve goes in action and frequency is near to its nominal level (50 Hz).

The working algorithm of system automatic of Georgian system is processed in fourth chapter of this Diploma work. In near future 1000-1400 MW power transit through Georgian system will be implemented. Such large power flows may cause some kinds of problems in maintain transient stability for Georgian system. Any emergency outage of back-to-back station will cause deficit or abundance of power in Georgian system. To maintain transient stability in this cases there is need of existence of system automatics in Georgian system, which will trip part of load or generation in case of critical situations. The working logic of this automatic should be implemented with the possibility of the regulation of power of the back-to-back stations. Regulation of active power of B2B station is possible by frequency and frequency deviation. The working logic of this automatic will take in consideration power flow and its direction on back-to-back station. In order to determine amount of the power to be tripped in case of emergency outage of back-to-back station the modeling of Georgian power grid in PSS/E has been implemented. Various level of exported power to Turkey and composition of generators in service (summary inertia T_j of Georgian system) had been considered. Corresponding to the modeling results appropriate formula had been achieved, which describes the dependence of amount of generation to be tripped to summary inertia of Georgian system and summary regulation reserve of back-to-back stations. Generation amount tripped by above mentioned formula had been compared to the amount of power tripped in PSS/E software. Similarities is about 93-94%. In addition, system automatic with above mentioned algorithm works adequately and frequency level is below 51 HZ during transients. This logic was implemented for the scenario when Georgian system operates as isolated. If Georgia works as parallel with Russia or Azerbaijan, whole active power unbalance caused by losing connection with back-to-back station is being liquidated by change of power flow on OHL Kavkasioni (in case of parallel synchronous connection with Russia) or OHL Mukhrani (in case of parallel synchronous connection with Azerbaijan).

Harmonic analysis in Georgian system is considered in the last, fifth chapter. For normal operation of electrical system there is need of take in consideration parameters of such kind of equipment, which may have significant influence on

regime, for example, on voltage levels and their shape in system. These are harmonic source. Such kind of equipment is back-to-back station in our system, which has already been working in 500 kV s/s Akhaltsikhe. B2B station generates various orders of harmonic, which distort voltages in system and give them shape different from sinusoid. Specific order of harmonic is problematic for some object in Georgian grid. Hence, it is recommended to analyze harmonic distortion in our electro system, calculate harmonic orders, total harmonic distortion and if necessary develop additional measures. Harmonic analysis in case of existing of Akhaltsihke and Marneuli back-to-back stations in Georgian system has been carried out. Their influences on levels of harmonic orders at specific points of Georgian grid are shown. Respective conclusions are done at the end of the work.