

გიორგი ვახტანგაძე

**საქართველოს ელექტროსისტემის სატრანზიტო
ფუნქციის ანალიზი**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივლისი, 2014

საავტორო უფლება © 2014

გიორგი ვახტანგაძე, 2014

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი ვახტანგაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „საქართველოს ელექტროსისტემის სატრანზიტო ფუნქციის ანალიზი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის“ ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: მიხეილ რუხვაძე

რეცენზენტი: ვახტანგ გიორგობიანი

რეცენზენტი: არჩილ კობტაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2014

ავტორი: გიორგი ვახტანგაძე

დასახელება: „საქართველოს ელექტროსისტემის სატრანზიტო ფუნქციის ანალიზი“

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

ნაშრომი ეძღვნება ჩემს მშობლებს

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) დაჭამებული გადაიყვება 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 რეზერვის ან სასისტემო ავტომატიკის გამოყენება. თუმცა

ყველა მათგანი დამოკიდებულია გარკვეულ მდგომარეობაზე. მაგალითად, სანამ სიხშირის მნიშვნელობა საქართველოში არ შემცირდება/გაიზრდება რელევების დანაყენამდე, სიხშირის რელევები 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 გამორთვის 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 გამორთულ 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 მონოცილობების პარამეტრები, რომლებსაც შეუძლია მკვეთრი ზეგავლენა მოახდინოს რეჟიმზე, კონკრეტულად, სისტემაში არსებული ძაბვების სიდიდეებზე, მონოცილობები, რომლებიც წარმოადგენენ ჰარმონიკების წყაროს. ჩვენს სქემაში ამგვარი მონოცილობაა 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.

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 these 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.

შინაარსი

	რეზიუმე -----	v
	Abstract -----	viii
	შინაარსი -----	xi
	ცხრილების ნუსხა-----	xiii
	ნახაზების ნუსხა -----	xv
	დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები-----	xix
	მადლიერება -----	xx
	შესავალი -----	21
თავი 1	ელექტრული სისტემის ანალიზი და კონტროლი -----	24
§ 1.1	გარდამავალი პროცესები. ზოგადი მიმოხილვა -----	24
§ 1.2	ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები სინქრონული მანქანის გრაგნილებში -----	29
§ 1.3	ელექტრული სისტემის მდგრადობა -----	31
§ 1.4	გარდამავალი მდგრადობის ანალიზი: დროულ-სივრცითი მეთოდი -----	35
§ 1.5	ელექტრული სისტემის კონტროლი. ზოგადი მიმოხილვა -----	39
§ 1.5.1	გენერაციის ავტომატური რეგულირება ელექტრულ სისტემაში -	41
§ 1.5.2	სიხშირის რეგულირება ელექტრულ სისტემაში -----	44
თავი 2	სტატიკური მდგრადობის ანალიზი -----	47
§ 2.1	მუდმივი დენის ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება სიხშირის მიხედვით -----	47
§ 2.1.1	ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება გაერთიანებულ საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემაში -----	55
§ 2.1.2	ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება სისტემაში სიჩქარის რეგულატორის გათვალისწინებით -----	57
§ 2.1.3	სიმძლავრის ექსპორტი თურქეთიდან საქართველო-აზერბაიჯანის გაერთიანებულ სისტემაში -----	60
§ 2.1.4	ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება სისტემაში ორი რეგულატორით -----	61
§ 2.1.5	D-დანაწილების მრუდით მიღებული წერტილების შემოწმება სტატიკურ მდგრადობაზე პროგრამა PSS/E-ში -----	66
§ 2.2	ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება სიხშირის წარმოებულის მიხედვით -----	66
§ 2.3	ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება სქემის კვანძის ძაბვის კუთხის ცვლილების მიხედვით -----	68
თავი 3	დინამიური მდგრადობის ანალიზი -----	73
§ 3.1	დინამიური მდგრადობის ანალიზი აზერბაიჯანისა და საქართველოს სისტემების გაყოფის შემთხვევაში -----	73

§ 3.2	საგ-ებისა და მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორების ერთობლივი მოქმედება -----	78
თავი 4	ენერგოსისტემის სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ალგორითმის დამუშავება -----	86
§ 4.1	სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ალგორითმის შემუშავების მიზანი -----	86
§ 4.2	ახალციხის ჩანართის ავარიული გამორთვა საქართველოსა და სომხეთის სისტემების ასინქრონული კავშირის შემთხვევაში -----	88
§ 4.3	ახალციხის ჩანართის ავარიული გამორთვა საქართველოს სისტემის ექსპორტ/იმპორტის განსხვავებული სიდიდეების შემთხვევაში -----	98
§ 4.4	ჩანართის რეგულირების კოეფიციენტების სიდიდის დადგენა PSS/E პროგრამაში გარდამავალი პროცესების მოდელირებით -	100
§ 4.5	სასისტემო ავტომატიკის ალგორითმის დამუშავება საქართველოში სიმძლავრის ნაჭარბის წარმოქმნის შემთხვევაში -----	104
თავი 5	ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს ელექტრულ სისტემაში	119
§ 5.1	ზოგადი ცნობები -----	119
§ 5.2	ჰარმონიკული შემადგენლობა -----	122
§ 5.3	ჰარმონიკული დენის ნაკადი -----	127
§ 5.4	ჰარმონიკების გავლენა ელექტრული სისტემის ელემენტებზე ---	128
§ 5.5	ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გათვალისწინებით -----	132
§ 5.6	ჰარმონიკების კონტროლი -----	137
§ 5.7	ფილტრების შერჩევა მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების ჩასახშობად -----	141
§ 5.8	ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის და ალავერდის ჩანართების არსებობისას -----	142
§ 5.9	ჰარმონიკული ანალიზის საქართველოს სისტემის 500 კვ-იანი ძაბვის ქსელში -----	145
§ 5.10	რეზონანსი ელექტრულ ქსელებში -----	146
	დასკვნა -----	156
	გამოყენებული ლიტერატურა -----	157

ცხრილების ნუსხა

ცხრ. 1	მდგრადობის ანალიზისთვის შერჩეული 2017 წლის ერთერთი რეჟიმი -----	73
ცხრ. 2	საქართველოს სისტემაში სიჩქარის რეგულატორებისა და სასისტემო ავტომატიკის არსებობით მიღებული შედეგები -----	74
ცხრ. 3	საქართველოს სისტემაში სიჩქარის, ჩანართის რეგულატორებისა და საგ-ების არსებობით მიღებული შედეგი -----	76
ცხრ. 4	ანალიზისთვის შერჩეული რეჟიმის (გაზრდილი ექსპორტ/იმპორტი) პარამეტრები -----	77
ცხრ. 5	მიღებული შედეგები მოდელირების I ვარიანტისთვის -----	77
ცხრ. 6	მიღებული შედეგები მოდელირების II ვარიანტისთვის -----	78
ცხრ. 7	სიხშირის შესაბამისი საგ-ების ქმედება საქართველოს სისტემაში	78
ცხრ. 8	სრიალის შესაბამისი საგ-ების ქმედება საქართველოს სისტემაში	79
ცხრ. 9	საქართველოს სისტემის გაზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები -----	88
ცხრ. 10	გაზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია -----	89
ცხრ. 11	საქართველოს სისტემის გაზაფხულის მინიმუმის რეჟიმის პარამეტრები -----	92
ცხრ. 12	გაზაფხულის მინიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია -----	92
ცხრ. 13	საქართველოს სისტემის ზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები -----	93
ცხრ. 14	ზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია -----	94
ცხრ. 15	საქართველოს სისტემის ზაფხულის მინიმუმის რეჟიმის პარამეტრები -----	95
ცხრ. 16	ზაფხულის მინიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია -----	95
ცხრ. 17	საქართველოს სისტემის ზამთრის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები -----	96
ცხრ. 18	გამორთული გენერაცია განსხვავებული რეჟიმების შემთხვევაში	97
ცხრ. 19	ანალიზისათვის შერჩეული 2020 წლის გაზაფხულის პერსპექტიული რეჟიმის პარამეტრები -----	99
ცხრ. 20	საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია სისტემის ჯამური ინერციის მუმდივის სხვადასხვა სიდიდისას -----	108
ცხრ. 21	საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია მოდელირების ოთხი ვარიანტისთვის -----	109
ცხრ. 22	საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია მოდელირების დამატებითი (მე-5) ვარიანტისთვის -----	111
ცხრ. 23	PSS/E-თი და ფორმულით გამორთული გენერაციის სიდიდეები -	111
ცხრ. 24	გამოსართავი გენერაციის ოდენობა თურქეთში ექსპორტის სხვადასხვა მნიშვნელობისას -----	112

ცხრ. 25	ახალციხის ქვესადგურში არსებული ცვლადი ძაბვის ფილტრების პარამეტრები -----	134
ცხრ. 26	ცვლადი ძაბვის ფილტრების ჩართვის კომბინაცია ქ/ს ახალციხეში -----	135
ცხრ. 27	ჩართული რეაქტორების კომბინაცია სიმძლავრის მთელ დიაპაზონში -----	136
ცხრ. 28	ზესტაფონი-500-ში მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდის დამოკიდებულება „ზეკარის“ პარამეტრების განაწილების რიგზე -----	152

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1	PAUX1T რეგულატორის ბლოკ-სქემა -----	48
ნახ. 2	CHAAUT რეგულატორის ბლოკ-სქემა -----	51
ნახ. 3	D-დანაწილების (ნაიკვისტის) მრუდი იზოლირებულად მომუშავე საქართველოს სისტემის შემთხვევაში -----	55
ნახ. 4	D-დანაწილების (ნაიკვისტის) მრუდი გაერთიანებულ საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემის შემთხვევაში -----	57
ნახ. 5	CHAAUT რეგულატორის გამარტივებული ბლოკ-სქემები -----	61
ნახ. 6	სიხშირე საქართველოს სისტემაში მცირე შემფოთებისას -----	66
ნახ. 7	CPAAUT რეგულატორის ბლოკ-სქემა -----	67
ნახ. 8	PAUX2T რეგულატორის ბლოკ-სქემა -----	68
ნახ. 9	D-დანაწილების მრუდი -----	71
ნახ. 10	ჩანართის სიმძლავრე გარდამავალ პროცესში -----	72
ნახ. 11	მბრუნავი რეზერვის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	74
ნახ. 12	გამორთული დატვირთვის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	75
ნახ. 13	მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	75
ნახ. 14	მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	76
ნახ. 15	მუდმივი დენის ჩანართზე შემცირებული სიმძლავრის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	76
ნახ. 16	გამორთული დატვირთვის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	77
ნახ. 17	მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	77
ნახ. 18	მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	78
ნახ. 19	მუდმივი დენის ჩანართზე შემცირებული სიმძლავრის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე -----	78
ნახ. 20	საგ-ების მოქმედება საქართველოში -----	79
ნახ. 21	ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ფარგლები -----	80
ნახ. 22	სიხშირის მინიმუმი $K_1 = 25 \div 200$ –ის შემთხვევაში -----	81
ნახ. 23	საგ-ებით გამორთული დატვირთვა $K_1 = 25 \div 200$ –ის დროს ---	81
ნახ. 24	ჩანართის სიმძლავრის შემცირების მაქსიმუმები $K_1 = 25 \div 200$ – სთვის -----	81
ნახ. 25	ჩანართის სიმძლავრის შემცირება დამყარებულ რეჟიმში $K_1 = 25 \div 200$ –სთვის -----	81
ნახ. 26	სისტემის დატვირთვის ჯამური შემცირება $K_1 = 25 \div 200$ –სთვის	82

ნახ. 27	სისტემის ამაჩქარებელი სიმძლავრე $K_1 = 25 \div 200$ –სთვის -----	82
ნახ. 28	სიხშირე საქართველოში სხვადასხვა სიდიდის იმპორტის (უბალანსობის) შემთხვევაში -----	84
ნახ. 29	ჩანართის სიმძლავრე გარდამავალ პროცესში სხვადასხვა სიდიდის იმპორტის (უბალანსობის) შემთხვევაში -----	84
ნახ. 30	საგ-ებით გამორთული დატვირთვა საქართველოში -----	84
ნახ. 31	ჩანართის სიმძლავრე -----	84
ნახ. 32	P_{sag}/P_{B2B} თანათარდობის დამოკიდებულება P_{exp}/P_{imp} თანათარდო- ბასთან -----	85
ნახ. 33	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში მოდელირების I და II ვარიანტისთვის -----	90
ნახ. 34	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში მოდელირების III ვარიანტისთვის -----	90
ნახ. 35	სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე -----	91
ნახ. 36	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	93
ნახ. 37	სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე -----	93
ნახ. 38	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	94
ნახ. 39	სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე -----	94
ნახ. 40	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	95
ნახ. 41	სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე -----	96
ნახ. 42	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	96
ნახ. 43	საქართველოს სისტემის მექანიკური სიმძლავრე -----	96
ნახ. 44	გამოსართავი გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება წარმოქმნილ ნაჭარბზე -----	99
ნახ. 45	სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე -----	100
ნახ. 46	სიხშირის ცვლილება სომხეთის სისტემაში -----	100
ნახ. 47	ახალციხის ჩანართის და საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთ- ვის ცვლილება -----	102
ნახ. 48	საქართველოს დატვირთვის საგ-ებით გამორთული ნაწილი ----	102
ნახ. 49	ახალციხის ჩანართის და საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთ- ვის ცვლილება -----	102
ნახ. 50	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	103
ნახ. 51	სისტემის ჯამური მექანიკური სიმძლავრე და გადაღინება ახალციხის ჩანართზე -----	103
ნახ. 52	საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთვა -----	104
ნახ. 53	სისტემათაშორის სიმძლავრის ნაკადების შესაძლო მიმართულება საქართველოს სისტემაში -----	105
ნახ. 54	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	106
ნახ. 55	ბათუმისა და რაზდანის ჩანართების სიმძლავრეები -----	107
ნახ. 56	გამოსართავი სიმძლავრის დამოკიდებულება სისტემის ჯამურ ინერ- ციის მუდმივაზე -----	108

ნახ. 57	გამოსართავი გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივაზე -----	110
ნახ. 58	ფორმულით და PSS/E-თი გამორთული გენერაციის სიდიდეების შედარება -----	111
ნახ. 59	ავარიისანინაალმდევო ავტომატიკის მოქმედების პრინციპი -----	113
ნახ. 60	Visual Basic-ში დანერგილი პროგრამის მუშაობის ალგორითმი --	114
ნახ. 61	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	115
ნახ. 62	სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში -----	116
ნახ. 63	სიმძლავრის გადადინება ეგზ „მუხრანზე“ -----	116
ნახ. 64	სიმძლავრის გადადინება ეგზ „მუხრანზე“ -----	117
ნახ. 65	სიმძლავრის რყევები ეგზ „მუხრანზე“ -----	117
ნახ. 66	იდეალური 50 ჰერცი სიხშირის დაბვა -----	119
ნახ. 67	სისტემის დაბვა ჰარმონიკული კომპონენტებით -----	120
ნახ. 68	50 ჰერციან მდგენელზე მე-3 რიგის ჰარმონიკის ზედდებით მიღებული დაბვა -----	121
ნახ. 69	ფუნდამენტალური, მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე და 25-ე ჰარმონიკების ჯამი -----	122
ნახ. 70	სტატიკური ვარ კომპენსატორი -----	125
ნახ. 71	სტატიკური ვარ კომპენსატორი -----	127
ნახ. 72	A1-A2 ცვლადი დაბვის ფილტრების მოდელი DIGSILENT-ში ----	132
ნახ. 73	B1-B2 ცვლადი დაბვის ფილტრების მოდელი DIGSILENT-ში ----	133
ნახ. 74	C ცვლადი დაბვის ფილტრის მოდელი DIGSILENT-ში -----	133
ნახ. 75	ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე -----	136
ნახ. 76	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე -----	137
ნახ. 77	ავტოტრანსფორმატორი მესამეული გრაგნილით -----	138
ნახ. 78	ჰარმონიკული ფილტრი -----	139
ნახ. 79	HVDC კონვერტორი მარტივი ფილტრებით -----	140
ნახ. 80	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე -----	141
ნახ. 81	ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე -----	142
ნახ. 82	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე -----	143
ნახ. 83	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები მარნეულის 500 კვ-იან სალტებზე -----	143
ნახ. 84	მე-13 რიგის ჰარმონიკა მარნეულის 500 კვ-იან სალტებზე -----	144
ნახ. 85	ჰარმონიკული მდგენელები ზესტაფონის 500 კვ-იან სალტებზე ---	146
ნახ. 86	ზესტაფონი-500-ზეკარი-ახალციხე-500-ის ჩანაცვლების სქემა ---	148

ნახ. 87	ელექტრული ქსელის R-L-C პარამეტრებიანი ზესტაფონი-500- ზეკარი-ახალციხე-500 უბანი -----	149
ნახ. 88	R-L-C პარამეტრებიანი ზესტაფონი-500-ზეკარი-ახალციხე-500 უბნის გამარტივებული სქემა -----	150
ნახ. 89	ზესტაფონი-ახალციხის რეზონანსული კონტურის რეაქტიული წინაღობები -----	151
ნახ. 90	ზესტაფონი-ახალციხის რეზონანსულ კონტურში გამავალი დენი	151
ნახ. 91	ზესტაფონი-500-ში მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდის დამოკიდებულება ზეკარის პარამეტრების განაწილების რიგზე --	152
ნახ. 92	მე-11 რიგის ჰარმონიკების სიდიდე ახალციხე-500-ში -----	153
ნახ. 93	მე-13 რიგის ჰარმონიკების სიდიდე ახალციხე-500-ში -----	153
ნახ. 94	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების სიდიდე ზესტაფონი-500-ში -	153
ნახ. 95	ჰარმონიკული მდგენელები გარდაბანი-500-ში -----	154
ნახ. 96	ჰარმონიკული მდგენელები ქსანი-500-ში -----	154
ნახ. 97	ჰარმონიკული მდგენელები ენგური-500-ში -----	154
ნახ. 98	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების ქსანი-500-ში -----	155
ნახ. 99	მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების ენგური-500-ში -----	155

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

- T-D** – Time-domain (დროულ-სივრცითი)
- CCT** – Critical clearing time (ლიკვიდაციის კრიტიკული დრო)
- IEEE** – Institute of Electrical and Electronic Engineers (საინჟინრო ინსტიტუტი ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის განხრით)
- FACTS** – Flexible AC transmission system (მოქნილი ცვლადი ძაბვის გადაცემის სისტემები)
- ACE** – Area control error (არეის რეგულირების დარღვევა)
- AGC** – Automatic generation control (გენერაციის ავტომატური რეგულირება)
- SCADA** – Supervisory control and data acquisition (დისპეტჩერული მართვა და მონაცემების შეგროვება)
- EMS** – Energy management system (ენერჯის მართვის სისტემა)
- RAS** – Remedial action scheme (ავარიის საწინააღმდეგო სქემების სისტემა)
- LFC** – load-frequency control (დატვირთვა-სიხშირული რეგულირება)
- ეგბ** - ელექტროგადაცემის ხაზი
- PSS/E** – Power System Simulation for Engineering (ელექტრული სისტემების საინჟინრო მოდელირების პროგრამა)
- საგ** - სიხშირით ავტომატური განტვირთვა
- მშ** - მოკლე პერთვა
- THD** – Total Harmonic Distortion (ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი)
- HVDC** – High Voltage Direct Current (მაღალი ძაბვის მუდმივი დენი)
- SVC** – Static Var Compensator (სტატიკური კომპენსატორები)
- TSC** – Thyristor switched capacitors (ტირისტორით ჩართვადი კონდენსატორები)
- TCR** – Thyristor controlled reactors (ტირისტორით მართვადი რეაქტორები)
- SSR** – Subsynchronous resonance (ქვესინქრონული რეზონანსი)

მადლიერება

მადლობას ვუხდით გიორგი არზიანს და არჩილ კობტაშვილს კვლევის პროცესში გაწეული კონსულტაციებისა და თანამშრომლობისთვის.

შესავალი

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 დავარდეს 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 რეღების დანაყენს. თუკი საქართველოს სისტემაში დაზიანების შემდგომ გარდამავალ პროცესში სიხშირე გაიზარდება 51 ჰც-ზე მეტად, სიხშირის რეღები 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 გადადინება.

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 გაიცეს 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.

თავი 1

ელექტრული სისტემის ანალიზი და კონტროლი

1.1 გარდამავალი პროცესები. ზოგადი მიმოხილვა

გარდამავალი პროცესების ანალიზი ელექტრულ სისტემებში ისევე მნიშვნელოვანია, როგორც დამყარებული რეჟიმების ანალიზი. გარდამავალ პროცესისას დენებისა და ძაბვების მნიშვნელობებმა ქსელის ზოგიერთ ნაწილში შესაძლოა რამდენიმეჯერ გადააჭარბოს თავიანთ ნორმალურ მნიშვნელობებს. ამან შესაძლოა გამოიწვიოს ქსელის რომელიმე მოწყობილობის დაზიანება. ელექტრული ქსელის გარდამავალი პროცესი გამოიხატება ყველა პარამეტრის - დენების, ძაბვების, სიმძლავრეების, ენერჯის ცვლილებით დროში, მაშინ, როდესაც დამყარებულ რეჟიმში ყველა ეს პარამეტრი უცვლელია - არის მუდმივი (მუდმივი დენით გადაცემისას) ან პერიოდულად ცვლადი, მუდმივი ამპლიტუდითა და ფაზური კუთხით. [1]

გარდამავალი პროცესის წარმოქმნის მიზეზს ქსელის პარამეტრების თუ მისი კონფიგურაციის ნებისმიერი სახის ცვლილება წარმოადგენს, რაც როგორც წესი განპირობებულია გადართვებით (კომუტაციით), ქსელის შტოების დამოკლებით თუ გახსნით, ცვლილებებით გენერაციის ობიექტების მუშაობაში და ა.შ. დენების, ძაბვებისა და ა.შ. ცვლილება არ არის მყისიერი, საჭიროებს გარკვეულ დროს, იმ შემთხვევაშიც კი, თუ ეს ხდება ექსტრემალურად სწრაფად, მაგალითად მილი ან მიკროწამებში. ეს განპირობებულია იმით, რომ გარდამავალი პროცესები გამოწვეულია ენერჯის ცვლილებით, რასაც ადგილი აქვს ინდუქციურობის მაგნიტურ და/ან ტევადობის ელექტრულ ველში. ენერჯის ნებისმიერი ცვლილება არამყისიერია, წინააღმდეგ შემთხვევაში იარსებებდა უსასრულო სიმძლავრე (რადგანაც ეს უკანასკნელი წარმოადგენს ენერჯის ცვლილებას დროში:

$p = \frac{dw}{dt}$), რაც რეალობასთან ახლოს არაა. ყველა გარდამავალი ცვლილება, რომელსაც ასევე გარდამავალ რეაქციას უწოდებენ (ან უბრალოდ რეაქციას), მიიღევა და, მათი გაქრობის შემდეგ ახალი დამყარებული რეჟიმი ღვება. აქედან გამომდინარე, შესაძლებელია ითქვას, რომ გარდამავალი პროცესი აღწერს ქსელის რეჟიმს ორ დამყარებულ რეჟიმს შორის: ძველი რეჟიმი, რომელიც არსებობდა ცვლილებებამდე და ახალი, რომელიც წამოიქმნა ცვლილებების შემდეგ.

ნებისმიერი ელექტრული ქსელი შედგება სამი ტიპის პარამეტრისგან: წინაღობა R , ინდუქციურობა L და ტევადობა C . ენერგოსისტემის თითოეული კომპონენტი, იქნება ეს სისტემური მონწყობილობა, საწარმოო ქსელი თუ სხვა, შეიცავს თითოეულს ამ პარამეტრთაგან დიდი ან მცირე ოდენობით. დამყარებული რეჟიმის პირობებში, ერთერთი მათგანი იქნება შედარებით მეტი სიდიდის, მაგალითად, ინდუქციურობა რეაქტორში. მიუხედავად ამისა, გარდამავალ რეჟიმში შესაძლოა მდგომარეობა ძალზედ განსხვავებული იყოს. გარკვეულ მყისიერ მომენტში რეაქტორის გრავილის განაწილებული ტევადობა იქნება მისი ყველაზე მნიშვნელოვანი პარამეტრი. [3]

ქსელის წინაღობა, ინდუქციურობა და ტევადობა წარმოადგენს განაწილებულ სიდიდეებს; ე.ი. სქემის თითოეულ მცირე ნაწილს საკუთარი წილი შეაქვს მთლიან ქსელში. თუმცა ხშირ შემთხვევაში ისინი განიხილება, როგორც „შეყურსული“ მუდმივა, კონცენტრირებული ცალკეულ შტოში, რაც არ იწვევს გაანგარიშებების სიზუსტის მნიშვნელოვან ცდომილებას. იმ პირობებში, როდესაც ტექნიკის გამოყენება ვერ ხერხდება, ისევე როგორც გრძელ გადამცემ ხაზებთან მუშაობისას, ხორციელდება განსხვავებული მეთოდების გამოყენება.

ინდუქციურობა L და ტევადობა C ხასიათდება მათ მიერ ენერჯის შენახვის შესაძლებლობით შესაბამისად მაგნიტურ და ელექტრულ ველებში. ეს შენახული ენერჯიები მყისი დენისა I და ძაბვის V ფუნქციებია: $\frac{1}{2}LI^2$ და

$\frac{1}{2}CV^2$. მათგან განსხვავებით, წინალობა ენერჯის გამფანტს, RI^2 – გაფანტვის სიჩქარეს წარმოადგენს დროის ნებისმიერ მომენტში.

დამყარებული რეჟიმის დროს, მუდმივი დენის წრედებში, სხვადასხვა ინდუქციურობასა და ტევადობაში დაგროვილი ენერჯია მუდმივია; ცვლადი დენის წრედებში ხდება ამ ენერჯის პერიოდული გადაადგილება ქსელის ინდუქციურობებსა და ტევადობებში იმ პერიოდში, როდესაც დენი და ძაბვა იზრდება ან მცირდება კვების წყაროს სიხშირით. ეს უკანასკნელი პროცესი ხასიათდება გარკვეული დანაკარგებით, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია წრედში არსებულ წინალობაზე. ეს დანაკარგები მომარაგებული იქნება სისტემის სხვადასხვა კვების წყაროდან.

როდესაც წრედში ადგილი აქვს ნებისმიერ უეცარ ცვლილებას, ეს ძირითადად წარმოადგენს ენერჯის გადანაწილებას, რათა დაკმაყოფილებულ იქნას ახალი მდგომარეობა, და გარკვეულ წილად, ეს ის პროცესია, რასაც ჩვენ შევისწავლით, როდესაც ჩვენ ვიკვლევთ გარდამავალი პროცესების ბუნებას. ძალზედ მნიშვნელოვანია გააზრებულ იქნას, რომ შეუძლებელია ენერჯის ამგვარ გადანაწილებას პქონდეს მყისიერი ხასიათი ორი მიზეზის გამო:

1. მაგნიტური ენერჯის ცვლილება მოითხოვს დენის ცვლილებას. თუმცა ინდუქციურობაში დენის ცვლილებას ეწინააღმდეგება $L \frac{di}{dt}$ სიდიდის ემძ. ამიტომაც, დენის მყისიერი ცვლილება მოითხოვს, რომ ამ ცვლილების გამომწვევი ძაბვა იყოს უსასრულოდ დიდი. რადგანაც ეს პრაქტიკულად არარეალურია, ამიტომ ინდუქციურობაში დენების ცვლილებას მკვეთრი ხასიათი არ აქვს და შესაბამისად, დაგროვებულ მაგნიტურის ენერჯისაც არ ახასიათებს მკვეთრი ცვლილება. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, წრედის მაგნიტურ ნაკადს არ შეუძლია უეცარი ცვლილება.

2. ელექტრული ენერჯიის ცვლილებისათვის აუცილებელია ძაბვის ცვლილება. ძაბვა კონდენსატორზე $V = \frac{Q}{C}$, სადაც Q არის მუხტი, რომლის ცვლილების სიჩქარე იანგარიშება შემდეგნაირად:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{I}{C}$$

ძაბვის მყისიერი ცვლილებისთვის საჭიროა უსასრულოდ დიდი დენის გავლა. ეს არარეალურია. აქედან გამომდინარე, ძაბვა კონდენსატორზე, ისევე, როგორც ელექტრულ ველთან დაკავშირებული დაგროვილი ენერჯია, ვერ შეიცვლება მკვეთრად.

წრედში ცვლილებების შედეგად ენერჯიის გადანაწილებისთვის საჭიროა სასრული დრო, და პროცესი დროის ამ ინტეგრალის განმავლობაში, ისევე როგორც ნებისმიერ სხვა დროს, ემორჩილება ენერჯიის შენახვის პრინციპს, ანუ, მიწოდებული ენერჯია ესაა მოხმარებულ ენერჯიას დამატებული ენერჯიის დანაკარგები.

ზემოთ განხილული სამი ფაქტორი - ინდუქციურობაში გამავალი დენი შეუძლებელია უეცრად შეიცვალოს; კონდენსატორზე ძაბვის ცვლილებას არ აქვს მყისიერი ხასიათი; ენერჯიის შენახვის კანონი დაცულია ნებისმიერ დროს - არის ფუნდამენტური და აუცილებელი ელექტრული გარდამავალი პროცესების შესასწავლად.

ცნობილია გარდამავალი პროცესების ანალიზის რამდენიმე მეთოდი: კლასიკური მეთოდი, კოში-ჰევისაიდის (C-H) ოპერატორული მეთოდი, ფურიეს და ლაპლასის გარდაქმნების მეთოდები. კოში-ჰევისაიდის მეთოდი დამყარებულია წარმოებულის S სიმბოლოთი ($\frac{d}{dt} \leftrightarrow S$) და ინტეგრალის $\frac{1}{S}$ სიმბოლოთი ($\int dt \leftrightarrow \frac{1}{S}$) აღნიშვნაზე. ამგვარი აღნიშვნები გამოყენებულია ლაპლასის გარდაქმნებშიც, თუმცა კოში-ჰევისაიდის ოპერატორული მეთოდი არაა იმდენად სისტემატური გამოყენების და ამავდროულად ზუსტი, როგორც ლაპლასის მეთოდი. კლასიკური და გარდაქმნების მეთოდის

შედარებისას აღსანიშნავია, რომ ეს უკანასკნელი მოითხოვს მათემატიკის უფრო ღრმა ცოდნას და ნაკლებად დაკავშირებული ელექტრული ქსელის გარდამავალი პროცესის ფიზიკურ საკითხებთან. კლასიკური მეთოდი დამყარებულია დიფერენციალური განტოლებების განსაზღვრაზე და ამონახსნის დაყოფაზე ორ ნაწილად: ბუნებრივ და იძულებით რეაქციად. ეს მეთოდი საკმაოდ რთულია მათემატიკურად, თუმცა მარტივია ინჟინრული პრაქტიკის კუთხით. ასევე აღსანიშნავია, რომ არსებობს დამყარებული რეჟიმების ანალიზის რამდენიმე მეთოდი, რომლების საშუალებას იძლევა გამარტივდეს გარდამავალი პროცესების ანალიზის კლასიკური მეთოდი.

ელექტრული სისტემა მეტად არანრთივია და უწყვეტად განიცდის შეშფოთებებს. სტაბილურობის კუთხით, ეს შესაძლებელია ორ კატეგორიად დაიყოს: [2]

1. გაუთვალისწინებელი შეშფოთებები, გამონვეული ელვის დაცემისაგან, მოკლე შერთვებისაგან, იზოლაციის დაზიანებისგან ან რელეს არასწორი მოქმედებისგან. ამ კატეგორიას ასევე ეწოდება დიდი შეშფოთებები ან დარღვევის შემთხვევები;
2. დატვირთვის შეშფოთებები, გამონვეული დატვირთვის მოხმარებაში შემთხვევითი ცვლილებებით.

ენერგოსისტემის მდგრადობის ბევრი განმარტება არსებობს. თუმცა, დაზიანებისშემდგომი შეშფოთებებისა და დაზიანებისწინა დამყარებული რეჟიმის წონასწორობის მდგომარეობის მიხედვით, ესაა შესაძლებლობა ავარიისწინა მიმართულების გადასვლისა ახალ დამყარებულ მდგომარეობაზე დასაშვებ დამყარებულ რეჟიმში. საბოლოო დამყარებული რეჟიმის განსაზღვრა მნიშვნელოვანია. მაგალითად, თუ ავარიისწინა რეჟიმს ექნება პერიოდული რხევები, ეს იქნება მიუღებელი. ძაბვისა და სიხშირის მცირე გადახრებიც კი არასასურველია, ასევე სუბსინქრონული რეზონანსიც, რომელიც წარმოიქმნება მექანიკური ენერჯის გარდაქმნისას ელექტრულ ენერჯიაში, რომელიც დაკავშირებულია სუბჰარმონიკულ რეჟიმთან ანუ

ელექტრომაგნიტურ რხევებთან (მაგნიტური ველების ურთიერთქმედების გამო). [2, 15]

1.2 ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები

სინქრონული მანქანის გრაგნილებში

ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების შესწავლის მეთოდი სინქრონული მანქანის გრაგნილებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გათვალისწინებით მოყვანილია [30]-ში.

გარდამავალი პროცესის დიფერენციალური განტოლებებს სამუაზა ქსელის ფაზებისა და როტორის გრაგნილისთვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{d\psi_a}{dt} + R_a i_a = U_a$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} + R_b i_b = U_b$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} + R_c i_c = U_c$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f = U_f$$

სამუაზა ქსელის ნაკადუმბები სამივე ფაზისა და აგზნების გრაგნილისთვის, თუ გენერატორის რკინის გაუღენტვა უგულვებლყოფილი იქნება, გაიანგარიშება შემდეგნაირად:

$$\psi_a = i_a L_a + i_b M_{ab} + i_c M_{ac} + i_f M_{af}$$

$$\psi_b = i_a M_{ba} + i_b L_b + i_c M_{bc} + i_f M_{bf}$$

$$\psi_c = i_a M_{ca} + i_b M_{cb} + i_c L_c + i_f M_{cf}$$

$$\psi_f = i_a M_{fa} + i_b M_{fb} + i_c M_{fc} + i_f L_f$$

L_a, L_b, L_c და L_f – ფაზების და აგზნების გრაგნილების ინდუქციურობებია;

$M_{ab} = M_{ba}, M_{bc} = M_{cb}, M_{ac} = M_{ca}, M_{af} = M_{fa}$ და ა.შ. - ფაზებს და ფაზასა და აგზნების გრაგნილს შორის ურთიერთინდუქციურობებია. თუ

დაშვებულ იქნება, რომ ფაზების გრაგნილები ერთნაირი და სიმეტრიულად განლაგებულია, მაშინ ერთსახელა კოეფიციენტები ერთმანეთის ტოლი იქნება. ანუ: $M_{ab} = M_{ba}, M_{bc} = M_{cb}, M_{af} = M_{fa}$ და ა.შ. აღსანიშნავია, რომ ეს კოეფიციენტები, ისევე როგორც გრაგნილების ინდუქციურობები ცვლადი სიდიდეებია და ისინი იცვლებიან როტორის მდებარეობასთან ერთად. ამიტომ თითო ფაზის გრაგნილის ინდუქციურობა იქნება:

$$L_a = l_0 + l_2 \cos 2\gamma$$

$$L_b = l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_c = l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)$$

ურთიერთინდუქციურობები:

$$M_{ab} = m_0 + m_2 \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$M_{bc} = m_0 + m_2 \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_{ac} = m_0 + m_2 \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_{af} = m_1 \cos \gamma$$

$$M_{bf} = m_1 \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$M_{cf} = m_1 \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right)$$

γ – კუთხე a ფაზისა და აგზნების გრაგნილის ღერძებს შორის.

ამ კოეფიციენტების შეტანით ნაკადშემების გამოსახულებებში და შემდეგ ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით გარდამავალი პროცესის დიფერენციალურ განტოლებები მიიღებენ საკმაოდ რთულ სახეს.

გამარტივების მიზნით a, b, c კოორდინატა სისტემის მაგივრად, რომელზე მბრუნავი რაღაც \vec{i}_s ვექტორის გევმილებს წარმოადგენდა i_a, i_b, i_c ფაზური დენები, შემოღებულ იქნა გენერატორის როტორზე დამაგრებული იმავე კუთხური სიჩქარით მბრუნავი d, q კოორდინატა. შესაბამისად, \vec{i}_s

ვექტორის ვეგმილები გახდება i_d და i_q . ანალოგიურად მოხდება ძაბვის ვექტორის შემთხვევაშიც. ამგვარი მიდგომა გაამარტივებს გრაგნილებში გარდამავალი პროცესის ამსახველ დიფერენციალურ განტოლებებს და დაიყვანს სახეზე:

$$d \text{ ლერძისთვის: } L_d \frac{di_d}{dt} + M_{afd} \frac{di_f}{dt} - (1 + s)L_q i_q + R i_d = U_d$$

$$q \text{ ლერძისთვის: } L_q \frac{di_q}{dt} + (1 + s)(L_d i_d + M_{afd} i_f) + R i_q = U_q$$

$$აგზნების გრაგნილის ლერძისთვის: L_f \frac{di_f}{dt} + M_{afd} \frac{di_d}{dt} + R_f i_f = U_f$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_f} (M_0 - i_f i_q M_{afd} - (L_d - L_q) i_d i_q)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = s$$

$$L_d = l_d + m_d$$

$$L_q = l_q + m_q$$

l_d, l_q – ფაზური გრაგნილების თვითინდუქციის მნიშვნელობებია შესაბამისად $\gamma = 0$ და $\gamma = 90^\circ$ –ის დროს;

m_d, m_q – M_{ab} ურთიერთინდუქციურობის მნიშვნელობებია შესაბამისად $\gamma = 0$ და $\gamma = 90^\circ$ –ის დროს;

$M_{afd} = m_d$ არის M_{af} ურთიერთინდუქციურობის მაქსიმალური მნიშვნელობა.

მიღებული განტოლებების საფუძველზე თუ მოხდება უმარტივესი სისტემის გარდამავალი პროცესის მოდელირება, გამოჩნდება, რომ გენერატორის სტატორისა და როტორის დენების ცვლილებას არ ექნება მყისიერი სახე.

1.3 ელექტრული სისტემის მდგრადობა

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. [5]

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 გამომოშავებულ სიმძლავრეში, რაც იწვევს ასევე მცირე ცვლილებას მისი როტორის კუთხეში; ქსელის დატვირთვის მცირე სიდიდით გაზრდა (დაახლოებით სისტემის ჯამური სიმძლავრის 1%-ით ან ნაკლებით). [12, 13]

სტატიკური მდგრადობის შესწავლა, რომელიც როგორც წესი ხდება ნაკადგანაწილების 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, ტრანზფორმატორები და სხვა მონყობილობები არაა გადატვირთული. [5]

გარდამავალი მდგრადობა გულისხმობს მნიშვნელოვანი სიდიდის შეშფოთებებს, მაგალითად გენერაციის დაკარგვას, ხაზის გადართვის ოპერაციებს, დაზიანებებს, დატვირთვის უეცარ ცვლილებას, ასევე მეხის დაცემით გამოწვეულ დაზიანებებს. შეშფოთების შედეგად, სინქრონული მანქანების სიხშირე განიცდის გარდამავალ გადახრას სინქრონული სიხშირის დონისგან (50 ჰც) და გენერატორის ელექტრულ კუთხე იცვლება. გარდამავალი მდგრადობის შესწავლის მიზანია განისაზღვროს, დაბრუნდება თუ არა ელექტრული მანქანა სინქრონულ სიხშირეზე ახალი დამყარებული

რეჟიმის ელექტრულ კუთხეზე. სიმძლავრის გადაღინებები და სალტის დაბევები ასევე მნიშვნელოვანია. [21]

არსებობს ელექტრული სისტემის გარდამავალი მდგრადობის პროგრამის მექანიკური ანალოგი. გარკვეული მასის მქონე რამდენიმე ბურთულა, რომლებიც წარმოადგენს სინქრონული მანქანების იმიტაციას, დაკავშირებული არიან ერთმანეთთან მოქნილი თოკებისგან შექმნილი ქსელით, რომელიც წარმოადგენს გადამცემი ხაზების იმიტაციას. ვთქვათ, ეს ქსელი საწყის მომენტში განონასწორებულია და თითოეულ თოკზე მოქმედი რეზულტიური ძალა ნაკლებია ამ თოკის განწყვეტის ძალაზე. ერთერთი თოკის განწყვეტა წარმოადგენს ელექტროგადამცემი ხაზის გათიშვის ანალოგიას. შედეგად, ბურთულები განიცდიან გარდამავალ მოკლევადიან რხევებს და ძალები თოკებზე განიცდიან შეშფოთებას. სისტემა ან გადავა ახალი დამყარებული რეჟიმის მუშა წერტილზე ახალი ძალების ზემოქმედებით თოკებზე, ან დამატებით განწყდება თოკ(ებ)ი, რაც გამოიწვევს ქსელის კიდევ უფრო შესუსტებას და სისტემის შესაძლო დაშლას. ამდენად, მომხდარი შეშფოთებისთვის სისტემა იქნება გარდამავლად მდგრადი ან პირიქით.

დღევანდელ რთულ ელექტროსისტემებში, ბევრი სინქრონული გენერატორით, რომელიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია რთული ელექტროგადამცემი ქსელით, გარდამავალი მდგრადობის ანალიზის ყველაზე კარგი მეთოდია კომპიუტერული პროგრამების გამოყენება. კონკრეტული შეშფოთებისთვის, პროგრამა საფეხურებრივად ანგარიშობს ალგებრული სახით ჩანერილ ნაკადგანაწილების განტოლებებს, რომლებიც წარმოადგენს ქსელს და არანრთვივ დიფერენციალურ განტოლებებს, ამსახავს სინქრონული მანქანებისა. პროგრამებში ხდება ყველა სტადიის - შეშფოთებამდე, შეშფოთების და შეშფოთების შემდგომი გაანგარიშება. გაანგარიშებიდან მიღებული შედეგები მოიცავს სინქრონული მანქანების ელექტრულ კუთხეების და სიხშირეების, კვანძების დაბევების, ნაკადგანაწილების მახასიათებლებს და ა.შ. ზემოთ აღნიშნული

კომპიუტერული პროგრამები შეიცავენ გენერატორების, მათი აგზნების სისტემების, სიჩქარის რეგულატორების, დატვირთვების და ქსელის სხვა კომპონენტების ელექტრულ მოდელების სხვადასხვაგვარ მოდელებს. ამდენად, სასურველია პროგრამის მომხმარებელმა სწორად აარჩიოს აღნიშნული მოდელები, რათა მოდელირების პროცესი ასახავდეს რეალურ სიტუაციას. [22]

ბევრ შემთხვევაში, გარდამავალი მდგრალობა დადგენილია მანქანის ელექტრული კუთხის პირველი რხევის განმავლობაში, რომელიც თან სდევს შეშფოთებას. ხშირად, პირველი რხევისას, რომელიც როგორც წესი 1 წამს გრძელდება, გენერატორის მექანიკური სიმძლავრე და ელექტრომაგნიტური ძალა ჩათვლილია მუდმივად. თუმცა, რამოდენიმე რხევა ხანგრძლივობით რამდენიმე წამი იწვევს შეშფოთებას, გრძელვადიანი გარდამავალი მდგრალობის ანალიზიდან მიღებული შედეგების სიზუსტისათვის იყენებენ ტურბინის რეგულატორების, აგზნების სისტემების და გენერატორის დეტალურ მოდელებს.

დინამიური მდგრალობა მოიცავს კიდევ უფრო გძლავადიან პროცესებს, რომლებიც როგორც წესი რამოდენიმე წუთის განმავლობაში მიმდინარეობს. დინამიური მდგრალობა შესაძლოა დაირღვეს იმ შემთხვევაშიც კი თუ გარდამავალი მდგრალობა 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.

დინამიური მდგრალობის ანალიზის გამარტივებისთვის მიმართავენ შემდეგი სახის დაშვებებს:

1. განიხილება მხოლოდ სიმეტრიული სამფაზა სისტემები და სიმეტრიული შეშფოთებები. ამდენად, გაანგარიშებები ტარდება მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის ქსელისთვის.
2. გენერატორის სიხშირის გადახრები ნომინალური სიდიდიდან (50 ჰც) არის მცირე, გამათანაბრებელი დენები და ჰარმონიკები უგულებელყოფილია. ამიტომ, გადამცემი ხაზების, ტრანსფორმატორების და დატვირთვების ქსელი სანყის მომენტში დამყარებულ რეჟიმშია; დაბრუნება, დენები და სიმძლავრეები გაიანგარიშება ნაკადგანაწილების ალგებრული განტოლებებით.

როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული, ნორმალურ მუშა პირობებში სამფაზა ელექტრული სისტემა შესაძლებელია წარმოვადგინოთ, როგორც ერთფაზა სისტემა თუ დატვირთვები, დაბრუნება და დენები დაბალანსებულია (სიმეტრიულია). თუ დავუშვებთ ტალღების გავრცელებას სადენებით (თუმცა მაქსიმალური განტოლებებიდან ცნობილია, რომ დანაკარგების არსებობისას ეს რეალობას არ შეესაბამება), ქსელის წარმოდგენა შეყურსული პარამეტრებით შესაძლებელი იქნება, თუკი ელექტრული სისტემის ან მისი ნაწილის ფიზიკური სიდიდე არის მცირე დაბრუნებისა და დენების მუხტის ტალღის სიგრძესთან შედარებით. ამგვარ შემთხვევაში სამართლიანი იქნება გაანგარიშებებისთვის სამფაზა ელექტრული სისტემის წარმოდგენა ერთფაზა შეყურსული პარამეტრების მქონე ელემენტებიან ქსელად. [8]

1.4 გარდამავალი მდგრადობის ანალიზი:

დროულ-სივრცითი მეთოდი

ტრადიციული დროულ-სივრცითი (T-D, Time-domain) მეთოდი განსაზღვრავს სისტემის საიმედოობას მიღებული შეშფოთების მიმართ შემდეგი ამოცანების გადანყვეტით: 1) არანრფივი განტოლებების საფეხურებრივი ამოხსნით, რომლებიც შედგენილია გარდამავალი

მდგრადობის პრობლემების ანალიზისთვის; 2) სისტემის სხვა მნიშვნელოვან პარამეტრებთან ერთად, სინქრონული მანქანის როტორის კუთხის მახასიათებლის განსაზღვრით. [7]

შეშფოთება ზოგადად შეიძლება განიმარტოს, როგორც შემთხვევების მიმდევრობა, რომლებიც იწყება t_0 მომენტიდან და სრულდება t_e დროის მომენტში, რა დროისთვისაც ელექტრული სისტემა აღწევს დაზიანების წინა კონფიგურაციას. ამასთან აღსანიშნავია, რომ აღნიშნული კონფიგურაცია დამოკიდებულია შეშფოთების აღმოფხვრის სქემაზე.

ამგვარად, სისტემის საიმედოობის ანუ მდგრადობის განსაზღვრისათვის მიღებული შეშფოთების მიმართ, დროულ-სივრცითი მეთოდი ახდენს სისტემის დინამიურ სიმულაციას ავარიისდროინდელი და ავარიისშემდგომი კონფიგურაციებით. ჩვეულებრივ, ავარიისდროინდელი პერიოდი საკმაოდ მცირეა (დაახლოებით 100 მწმ-მდე). რაც შეეხება ავარიისშემდგომ პერიოდს, ის შესაძლოა გაცილებით ხანგრძლივიც იყოს: როგორც წესი, ელექტრული სისტემა, რომელიც არ ჰკარგავს სინქრონიზაციას რამოდენიმე წამის შემდეგ, განიხილება, როგორც მდგრადი ანუ მიიღება, რომ მას შეუძლია გაუძლოს შეშფოთებას. სიმულაციის მაქსიმალური ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ელექტრული სისტემის მახასიათებლებსა და მოდელირების სირთულის დონეზე. საშუალოდ, სრული დეტალური მოდელირების დრო ჯამში 15 წამს არ აღემატება. გამარტივებული მოდელირებისთვის 3 წამიც საკმარისად ითვლება, იმ პირობით, რომ ამ დროში განისაზღვრება გარდამავალი მდგრადობის პირველი თვისებები (რომელიც შესაძლოა საერთოდაც არ ასახავდეს საბოლოო სურათს).

ელექტრული სისტემის მხრიდან სინქრონიზაციის დაკარგვის განსაზღვრის კრიტერიუმი დროის პარალელურად სამუშაო მეთოდებზეცაა მეტწილად დამოკიდებული; აქ იგულისხმება ის ფაქტი, რომ მოდელირება შესაძლოა ტარდებოდეს სხვადასხვა ელექტრო სისტემისთვის განსხვავებული

თავისუბურებებით, სხვადასხვა დროულ-სივრცითი მეთოდით საანგარიშო პროგრამა და ა.შ. ეს კრიტერიუმი ძირითადად დამოკიდებულია სინქრონული მანქანის როდორის ელექტრული კუთხის და სიჩქარის მაქსიმალურ გადახრაზე.

როგორც წესი, დროულ-სივრცითი მეთოდები განსაზღვრავენ სისტემის საიმედოობას მიღებული შეშფოთების შემთხვევაში:

- ❖ შეშფოთებ(ებ)ის ლიკვიდაციის t_e დროის დადგენით - ხდება დადგენა, ჰკარგავს სისტემა სინქრონიზაციას თუ პირიქით, ინარჩუნებს სტაბილურობას ინტეგრირების მაქსიმალური პერიოდის განმავლობაში;
- ❖ ან სტაბილურობის ზღვრების განსაზღვრით - სიმძლავრის ზღვარი მოცემული ლიკვიდაციის დროისთვის, ან ლიკვიდაციის კრიტიკული დრო (CCT, critical clearing time) დაზიანებისწინა მუშა რეჟიმში; ლიკვიდაციის კრიტიკული დრო წარმოადგენს დროის იმ მაქსიმალურ ხანგრძლივობას, რის განმავლობაშიც არის შესაძლებელი შეშფოთების გაგრძელება სისტემის მიერ უნარის შენარჩუნების პარალელურად, აღიდგინოს ნორმალური მუშა მდგომარეობა.

სტაბილურობის ზღვრების ძიება შესაძლოა ჩატარდეს სამუშაოს ორ ნაწილად დაყოფით. ნებისმიერ შემთხვევაში, საჭირო იქნება ბევრი ცდის ჩატარება (მაგალითად, 4 ცდის შედეგი იქნება სტაბილური, 5 ცდის კი არასტაბილური); მათ შორის, სტაბილური ცდები მოითხოვენ გაცილებით მეტ დროს მათ შესასრულებლად, რადგანაც ისინი გრძელდება სიმულაციის მაქსიმალური პერიოდისთვის. შესაბამისად, არასტაბილური შედეგით დამთავრებული ცდები ტარდება სწრაფად (მათი მიმდინარეობა ჩერდება დაახლოებით რამოდენიმე ასეულ მწმ-ში, რა შემთხვევაშიც სისტემის მდგომარეობა ითვლება შეუქცევადად); თუმცა აღსანიშნავია, რომ ეს მიდგომა სამართლიანია მხოლოდ პირველი ინტეგრირების

არასტაბილურობის მოვლენის დასადგენად. მრავალი ინტეგრირების შემთხვევაში არასტაბილურობის დადგენისათვის საჭიროა მეტი დრო, რადგანაც სისტემის სინქრონიზაციის დაკარგვას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს რამოდენიმე წამის შემდეგ.

განსაზღვრა იმისა, კონკრეტულ სიტუაციაში რომელი მეთოდის გამოყენებაა უკეთესი, შესაძლებელია დროულ-სივრცით მეთოდების უპირატესობების და ნაკლოვანებების დადგენის შემდეგ, რაც ქვემოთაა მოცემული. თუმცა ზოგადად აღსანიშნავია, სისტემის სტაბილურობის დადგენის დროულ-სივრცითი მეთოდი აუცილებელი, მაგრამ არასაკმარისია მდგრადობის საფუძვლიანი ანალიზისათვის.

დროულ-სივრცითი მეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია:

- მივიღოთ აუცილებელი ინფორმაცია სისტემის შესაბამისი პარამეტრების ცვლილების შესახებ დინამიკაში (სინქრონული მანქანის პარამეტრები - როტორის კუთხე, სიჩქარე, აჩქარება, სიმძლავრე და ა.შ.);
- განხილულ იქნას ელექტრული სისტემის ნებისმიერი სახის მოდელირება და მდგრადობის შემთხვევა;
- მივალწიოთ საჭირო სიზუსტეს, იმ პირობით, რომ ელექტრული სისტემის მოდელი სწორად არის წარმოდგენილი და მისი პარამეტრები რეალობას ასახავს.

დროულ-სივრცით მეთოდებს არ გააჩნია:

- პირდაპირი ეკრანირებული მოდულები, რომლის გამოყენებით შესაძლებელი იქნება არასაინტერესო და არასახიფათო შემთხვევების უგულებელყოფა;
- მდგრადობის ხმოვანი ზღვრები, რომლებიც იძლევიან ინფორმაციას თუ რამდენად (არა)სტაბილურია სისტემა და რომელიც

უზრუნველყოფენ მომხმარებელს მგრძობიარობის ანალიზისთვის განკუთვნილი შესაბამისი ხელსაწყოებით;

- მეთოდური მითითებები კონტროლისთვის.

შეჯამების სახით შესაძლებელია შემდეგის თქმა: დროულ-სივრცითი მეთოდი უკვე დიდი ხანია ითვლება ხანგრძლივი დროის მომთხოვნ მიდგომად. საინტერესოა ფაქტი, რომ ბოლო წლების განმავლობაში დრო, საჭირო ერთი მოდელირებისათვის ტიპური ელექტრული სისტემისთვის დიდი რაოდენობის და დეტალური მონაცემების მქონე მოდელეებით შემცირდა დაახლოებით ნახევარი საათიდან რამოდენიმე წამამდე. აღნიშნული მიღწეულ იქნა თანამედროვე გამომთვლელ დანესებულებებში (workstation) არსებული კომპიუტერების პროცესორების სიჩქარის გაზრდით. დღესდღეობით დროულ-სივრცითი მეთოდები ხდება „რეალურ დროზე სწრაფიც“ კი. თუმცა, ზემოთხსენებული ნაკლოვანებები კვლავ ძალაშია.

1.5 ელექტრული სისტემის კონტროლი.

ზოგადი მიმოხილვა

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. [9]

ავტომატური რეგულირებისა და კონტროლის კუთხით, ელექტრული სისტემა წარმოადგენს მძლავრ და ამავდროულად ძლიერ არანრთივ დინამიურ სისტემას, რომელსაც გააჩნია მრავალი შემავალი და გამომავალი სიგნალი, უამრავი ცვლადი, დაცვის მოწყობილობა და საკონტროლო რგოლი, რომელთაც თავის მხრივ აქვთ განსხვავებული დინამიური და სტატიკური მახასიათებლები. ტერმინი “ელექტრული სისტემის კონტროლი” მოიცავს ისეთ ცნებებს, როგორცაა ელექტროსისტემის მართვის თეორია და ტექნოლოგიები, ოპტიმიზაციის მეთოდოლოგია და ექსპერტული და ხელოვნური ინტელექტის მქონე სისტემები, რომელთა დანიშნულებას წარმოადგენს ელექტრული სისტემის მუშა მახასიათებლების გაუმჯობესება როგორც ნორმალურ, ისე ავარიულ სიტუაციებში. ამგვარად, ელექტრული სისტემის კონტროლის ფუნქციაა შეინარჩუნოს სისტემის უსაფრთხო მდგომარეობა და დაიცვას ის საშიში ზემოქმედებისგან.

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.

სიხშირის მდგრადობის ამოცანებს, მასთან დაკავშირებულ საკონტროლო ღონისძიებებს და გრძელვადიანი დინამიური სიმულაციის პროგრამებს განსაკუთრებული ყურადღება მიექცა 1970-80 წლებში, ამ პერიოდში კონკრეტულ სისტემებში მძიმე შემთვევების მოხდენიდან გამომდინარე. სასარგებლო რეკომენდაციები შემუშავდა IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers, USA) მუშა ჯგუფის მიერ

ელექტროსადგურის მხრიდან საპასუხო რეაქციის შესახებ სიხშირის ძლიერი დარღვევის დროს.

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.

1.5.1 გენერაციის ავტომატური რეგულირება ელექტრულ სისტემაში

თითქმის ყველა ენერგოგამომმუშავებელ კომპანიას აქვს მსგავს მეზობელ კომპანიებთან დამაკავშირებელი ელექტროგადამცემი ხაზები, რაც საშუალებას იძლევა ნორმალურ პირობებში დაზოვილ იქნას ხარჯები სიმძლავრის გამომუშავებაზე, ხოლო ავარიულ სიტუაციებში მოხდეს ენერგომიმოცვლა ამ კომპანიებს შორის. რეგულირების მიზნით მთელი ეს ურთიერთდაკავშირებული სისტემა დაყოფილია მარეგულირებელ არეებად, რომლებიც, როგორც წესი, შედიან ერთი ან რამოდენიმე ამგვარი კომპანიის მართვაში. სიმძლავრის გადადინება კონკრეტული არეის სხვა არეასთან დამაკავშირებელ სისტემათაშორისო ხაზზე წარმოადგენს ალგებრულ განსხვავებას შესაბამისი არეის ჯამურ გენერაციასა და დატვირთვას (დანაკარგების ჩათვლით) შორის. სისტემათაშორისო ხაზებზე სიმძლავრის

გადადინება წინასწარ გეგმით განსაზღვრულია მეზობელ არეებს შორის გადასადინებელი სიმძლავრეები. გამომდინარე იქიდან, რომ კონკრეტული არეა ინარჩუნებს ამ გეგმით გათვალისწინებულ გადადინებულ სიმძლავრეს, თავად ასრულებს მის ძირითად ვალდებულებას დააბალანსოს ცვლილებები საკუთარ დატვირთვაში. თუმცა რადგანაც თითოეული არეა სარგებლობს ურთიერთდაკავშირებული ფუნქციონირების უპირატესობებით, ამიტომ თითოეული მათგანი ასევე ვალდებულია საკუთარი წილი შეიტანოს სისტემის სიხშირის შენარჩუნებაში. [4]

სიხშირის ცვლილებას ადგილი აქვს გამომდინარე იქიდან, რომ სისტემის ჯამური დატვირთვა დღის განმავლობაში იცვლება გაუთვალისწინებლად და ამდენად დატვირთვის რეალური სიმძლავრის ზუსტი პროგნოზი შეუძლებელია. ამდენად, დატვირთვის ცვლილებაზე მინიმუმ ერთმა გენერატორმა უნდა მოახდინოს რეაგირება, რათა საბოლოოდ აღდგენილ იქნეს სიმძლავრის ბალანსი. გენერატორის მიერ გამომუშავებული ენერგია რეგულირდება გამომუშავებული მექანიკური სიმძლავრით, რასაც უზრუნველყოფს ჰიდროელექტროსადგურებში ჰიდროტურბინა, თბოელექტროსადგურებში კი ორთქლის ტურბინა. მექანიკური სიმძლავრე რეგულირდება მიწოდებული წლის ან ორთქლის ნაკადის რეგულირების გზით. [12]

უბალანსობა გამომუშავებულ გენერაციასა და დატვირთვას (დანაკარგების ჩათვლით) შორის დღიური დატვირთვის პერიოდის განმავლობაში განაპირობებს მუშაობაში არსებული გენერატორებისთვის კინეტიკური ენერჯის მიწოდებას ან ართმევას. აქედან გამომდინარე, სიხშირე მთელ ურთიერთდაკავშირებულ სისტემაში იცვლება. თითოეულ საკონტროლო არეას გააჩნია მთავარი ობიექტი - ენერჯის მარეგულირებელი ცენტრი, რომელიც აკვირდება სისტემის სიხშირეს და სიმძლავრის გადადინებებს მის და მეზობელ არეების დამაკავშირებელ ხაზებზე. შემდეგ სიხშირის რეალური სიდიდის გადახრა მისი სასურველი

სიდიდიდან ერთიანდება დაგეგმილ სისტემათაშორისო გადადინებისგან გადახრასთან და მიიღება კომპლექსური მახასიათებელი, ე.წ. „არეის რეგულირების დარღვევა“ (ACE, area control error). მის აღმოსაფხვრელად, ენერჯის მარეგულირებელი ცენტრი გზავნის მმართველ სიგნალს შესაბამისი არეის დაქვემდებარებაში მყოფ მაგენერირებელ ობიექტებზე ელექტროსადგურებში მათი გამომუშავებული სიმძლავრის დასარეგულირებლად, რაც უზრუნველყოფს არეებს შორის გადადინებების დაბრუნებას მათ დაგეგმილ სიდიდეებზე და სიხშირის ნომინალური სიდიდის მიღწევას. მონიტორინგი, პარამეტრების დისტანციური გაზომვა და მონაცემების გადაცემა, მათი დამუშავება და რეგულირების ფუნქციები ერთიანდება ერთი კონკრეტული არეის ფარგლებში კომპიუტერულ ბაზაზე დაფუძნებულ გენერაციის ავტომატური რეგულირების (გარ) სისტემაში, რომელიც მდებარეობს ენერჯის მარეგულირებელ ცენტრში. [4]

გენერაციის ავტომატური რეგულირება (AGC, automatic generation control) წარმოადგენს მართვის მნიშვნელოვან პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს უწყვეტად, რათა შენარჩუნებული იქნას ბალანსი გენერაციასა და დატვირთვას შორის მინიმალურ ფასად. გარ-ი პასუხისმგებელია სიხშირის რეგულირებასა და სიმძლავრის მიმოცვლაზე, ასევე დატვირთვის ეკონომიკურ განაწილებაზე. [6]

AGC თანამედროვე ელექტრულ სისტემებში

გენერაციის ავტომატური რეგულირების სისტემა ატარებს ეფექტურ ღონისძიებებს გენერაციის დონის შესარჩევად რათა მინიმიზირებულ იქნას სიხშირის გადახრა და დარეგულირდეს სიმძლავრის ნაკადები სისტემათაშორისო ხაზებზე. გარ-ის სისტემა ახდენს გენერაციის ცვლილებას შესაბამისი სიგნალების გაგზავნით კონკრეტულ, ამ სისტემისადმი დაქვემდებარებულ გენერაციის ობიექტებზე. ამ ოპერაციის წარმატებული შესრულება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული იმაზე, თუ როგორ ახდენს ზემოთხსენებულ მმართველ სიგნალზე რეაგირებას კონკრეტული

გენერაციის ობიექტი. კონკრეტულად კი, მისი რეაქციის მახასიათებელი დამოკიდებულია მოწყობილობის, სანვავის, რეგულირების ტიპზე, მუშა წერტილის მდებარეობაზე და ა.შ.

გარ-ი, უსაფრთხოების კონტროლი, ოპერატიულ-დისპეტჩინგული მართვისა და ინფორმაციის მიღების სისტემა (SCADA) და დატვირთვის მართვა წარმოადგენენ პროგრამული ღონის მთავარ ელემენტებს თანამედროვე ენერჯის მართვის სისტემებში (EMS). გენერაციის ავტომატური რეგულირების პროცესი ხორციელდება გენერაციის სადგურიდან მოშორებით, კონტროლის ცენტრში, რაც შეეხება გენერირებული სიმძლავრის მართვას, ის ხდება ტურბინის რეგულატორის მიერ, გენერაციის ობიექტის ფარგლებში. გარ-ს გააჩნია კავშირი SCADA-სთან, დატვირთვის მმართველ მოწყობილობასთან და უსაფრთხოების მმართველ ცენტრთან EMS-ში.

1.5.2 სიხშირის რეგულირება ელექტრულ სისტემაში

სიხშირის მცირე რყევა ელექტრულ სისტემაში შეიძლება გამოწვეულ იქნას სხვადასხვა ცდომილებით, მაგალითად გაუთვალისწინებელი განსხვავებით დატვირთვაში, რაც სადისპეტჩინგო ცენტრის მიერ დატვირთვის არასწორი პროგნოზის შედეგს წარმოადგენდა. ასევე სწრაფი ან ნელი გადახრებით სინქრონიზაციის გარეშე, რასაც მოჰყვება დატვირთვის რყევა, გენერაციის ავტომატური რეგულირების ამოქმედება და ა.შ. რაც შეეხება სიხშირის ძლიერ რყევებს, მათი გამომწვევი მიზეზებია პირველ რიგში გენერატორების ან დატვირთვების გაუთვალისწინებელი დაკარგვა, შედეგად ავარიის საწინააღმდეგო მოქმედების სქემების სისტემა (RAS, remedial action scheme) მოდის მოქმედებაში და უბალანსობის სახიდან გამომდინარე მისი აღმოფხვრის მიზნით რთავს მუშაობაში დარჩენილ გენერაციის ან დატვირთვის ნაწილს. [13]

ძლიერი შეშფოთება სისტემაში, რომელიც იწვევს უბალანსობას გენერაციასა და დატვირთვას შორის, მნიშვნელოვნად აუარესებს სისტემის მუშა (რეჟიმის) პარამეტრებს და საფრთხეს უქმნის მის მდგრადობას. აღნიშნული მოვლენა ვერ აღინერება გარდამავალი და ძაბვის მდგრადობის ჩვეულებრივი ანალიზით. ეს, როგორც წესი ნელი მოვლენა განხილულ უნდა იქნას ელექტრული სისტემის სიხშირის რეგულირების საკითხთან ერთად. [9]

ელექტრული სისტემის სიხშირის რეგულირება, რომელსაც ასევე დატვირთვა-სიხშირულ რეგულირებას უწოდებენ (LFC, load-frequency control), არის გენერაციის ავტომატური რეგულირების (გარ) მთავარი ფუნქცია და წარმოადგენს რეგულირების ერთერთ უმნიშვნელოვანეს საკითხს ელექტრული სისტემის პროექტირებასა და ფუნქციონირებაში. ნორმალური ზღვრებიდან გადახრილ სიხშირემ შეიძლება პირდაპირი ზეგავლენა მოახდინოს ელექტრული სისტემის ფუნქციონირებასა და მის მდგრადობაზე.

სიხშირის დიდმა გადახრამ შეიძლება გამოიწვიოს მონყობილიების დაზიანება, დატვირთვის მუშა მახასიათებლების გაუარესება, ელექტროგადამცემი ხაზების გადატვირთვა, მოქმედებაში მოდის სისტემის შესაბამისი დაცვები, რაც საბოლოოდ მთავრდება ელექტრული სისტემის გადასვლით არასტაბილურ მდგომარეობაში. [9]

დატვირთვა-სიხშირულ კონტროლს გააჩნია ორი უმთავრესი ამოცანა:

1) შეინარჩუნოს სიხშირე დასაშვებ ფარგლებში; 2) შეინარჩუნოს სიმძლავრის გადადინებები მეზობელ მარეგულირებელ არეებთან წინასწარ დაგეგმილ სიდიდეებზე. აღნიშნული ხორციელდება რეგულირების დარღვევის სიგნალის გაზომვით, რომელსაც არეის რეგულირების დარღვევა (არდ) ეწოდება (ACE, area control error) და წარმოადგენს რეალურ დროში სიმძლავრის უბალანსობას გენერაციასა და დატვირთვას შორის. იგი არის არეებს შორის სიმძლავრის გადადინებებისა და სიხშირის გადახრების წრფივი ფუნქცია.

გაზომვების შემდეგ არდ აფორმირებს მართვის შემავალ სიგნალებს პროპორციონალურ-ინტეგრალური კონტროლერისთვის. რეგულირების არეის მუშა მახასიათებლებთან დამოკიდებულებით, მართვის გამომავალი სიგნალი შეიძლება შეიცავდეს კონკრეტული პარამეტრ(ებ)ის შეზღუდვის, დროის დაყოვნების ან გაძლიერების კოეფიციენტების შეცვლის ფუნქციას. შემდეგ აღნიშნული სიგნალი ვრცელდება დატვირთვა-სიხშირულ კონტროლში მონაწილე გენერატორებს შორის მათი მონაწილეობის კოეფიციენტის მიხედვით, რათა უზრუნველყოფილ იქნას შესაბამისი მართვის ოპერაციები შესაბამისი სადგურების გენერატორების დანაყენებზე. გაუთვალისწინებელი ცდომილებები სიხშირისა და სიმძლავრის მიმოცვლის დონეებში შესაძლოა გამოწვეული იყოს ინტეგრალური მართვის გამოყენების გამო და მათი შესწორება უნდა მოხდეს კონტროლერის პარამეტრების დარეგულირების გზით, რომელიც შეთანხმებულია მთელი ურთიერთდაკავშირებული სისტემის ფარგლებში. დინამიური კონტროლერის დარეგულირება მნიშვნელოვანი ფაქტორია დატვირთვა-სიხშირული რეგულირების ოპტიმალური მახასიათებლების მიღებისათვის. კონტროლერის პარამეტრების ზუსტი რეგულირება აუცილებელია გენერატორების ზედმეტი მოძრაობის გარეშე კარგი რეგულირების მისაღებად.

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

2.1 მუდმივი დენის ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება სიხშირის მიხედვით

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% დონეზე, ხოლო წყალმცირობის პერიოდში კი 30-40%-ს დონეზე. 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

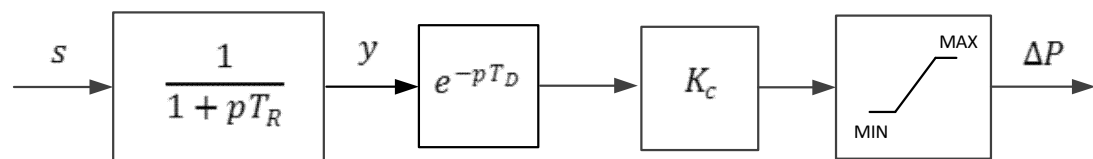
საქართველოს ელექტრულ სისტემაში. სიხშირის სწრაფი შემცირების პირობებში სისტემის მდგრადობის შენარჩუნება შესაძლებელია:

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 ვიხილავთ რეგულირებადი ჩანართის გავლენას სისტემის სტატიკურ მდგრადობაზე. ჩანართის მიერ გაცემული სიმძლავრის რეგულირება შესაძლებელია სხვადასხვა სახის რეგულატორებით, ასეთი რეგულირების ანალიზი მოყვანილია ქვემოთ.

მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება შეიძლება განხორციელდეს რამოდენიმე პარამეტრის მიხედვით – სიხშირის ცვლილების, სიხშირის ცვლილების სიჩქარისა და კვანძის ძაბვის კუთხის მიხედვით.

სიხშირით რეგულირება შესაძლებელია PAUX1T ტიპის რეგულატორით, რომელიც ადებულ იქნა პროგრამა PSS/E-ს ბიბლიოთეკიდან. ნახ. 1-ზე ნაჩვენებია მისი ბლოკ-სქემა.



ნახ. 1 PAUX1T რეგულატორის ბლოკ-სქემა

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორში აღწერილია შემდეგი დიფერენციალური განტოლებით:

$$\begin{cases} T_R \frac{dy}{dt} + y = s \\ \Delta P = yK_c \end{cases} \quad (1)$$

აქ T_R – რეგულატორის დროის მუდმივაა;

s – მოცემულ კვანძში ძაბვის ვექტორის სრიალია, $s = \frac{f-f_0}{f_0}$, $f_0 = 50 \text{ Hz}$

f – ამ კვანძის ძაბვის სიხშირე.

ბლოკი e^{-pT_D} აღწერს სიგნალის დაყოვნებას. ჩვეულებრივად $T_D < 0,1$ წმ.

K_c – რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტი. ΔP სიმძლავრის ნაზრდი ალგებრულად იჯამება სისტემის საწყის ნორმალურ რეჟიმში ჩანართის სიმძლავრესთან. თუ ჩანართი საწყის რეჟიმში მუშაობდა P_1 სიმძლავრით და მისი მაქსიმალური სიმძლავრეა P_{1max} , ხოლო მინიმალური კი $P_{1min} = 0$, მაშინ რეგულატორის max და min რეგულირების ზღვრები იქნება: $MAX = P_{1max} - P_1$ და $MIN = 0 - P_1$

აქედან გამომდინარე ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება განხორციელდება ფარგლებში:

$$P_{1max} > P_1 + \Delta P > 0$$

ჩვენი მიზანია შევისწავლოთ რეგულირების მდგრადობა. ელექტრული სისტემა განიხილება, როგორც ეკვივალენტური გენერატორი T_j ინერციის მუდმივით, P_o მექანიკური და P_{el} ელექტრული სიმძლავრით.

გარდამავალ პროცესში ელექტრულ (დატვირთვის) სიმძლავრეს დაემატება ΔP სიმძლავრის ნაზრდი გამონვეული ჩანართის რეგულირებით.

აქედან გამომდინარე, ეკვივალენტური სისტემის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება და (1) განტოლებები გვაძლევენ ახალ განტოლებათა სისტემას:

$$\begin{cases} T_j \frac{ds}{dt} = \frac{P_o}{1+s} - P_{el} - yK_c \\ T_R \frac{dy}{dt} + y = s \end{cases} \quad (2)$$

შემოვიტანოთ უსასრულოდ მცირე შემფოთების ცნება:

$$s = s_o + \Delta s ; y = y_o + \Delta y$$

ვინაიდან $s_o = 0$ და $y_o = 0$, ვღებულობთ:

$$T_j \frac{d\Delta s}{dt} = \frac{P_o}{1 + \Delta s} - P_{el} - \Delta y K_c$$

$$T_R \frac{d\Delta y}{dt} + \Delta y = \Delta s$$

ან

$$T_j \frac{d\Delta s}{dt} = \frac{P_o(1 - \Delta s)}{(1 + \Delta s)(1 - \Delta s)} - P_{el} - \Delta y K_c$$

$$T_R \frac{d\Delta y}{dt} + \Delta y = \Delta s$$

ვინაიდან $(1 + \Delta s)(1 - \Delta s) = 1 - \Delta s^2$ და $\Delta s^2 \cong 0$ როგორც მეორე რიგის უსასრულოდ მცირე და $P_o = P_{el}$, მივიღებთ:

$$T_j \frac{d\Delta s}{dt} + P_o \Delta s + \Delta y K_c = 0$$

$$T_R \frac{d\Delta y}{dt} - \Delta s + \Delta y = 0$$

ოპერატორული სახით ეს განტოლებები ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$T_j p \Delta s + P_o \Delta s + \Delta y K_c = 0$$

$$T_R p \Delta y - \Delta s + \Delta y = 0$$

მახასიათებელი განტოლება მიიღება შემდეგი დეტერმინანტის გაშლით:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p + P_o & K_c \\ -1 & T_R p + 1 \end{vmatrix}$$

ანუ

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

აქ

$$a_2 = T_j T_R; \quad a_1 = T_R P_o + T_j; \quad a_0 = P_o + K_c$$

ჩვენი მიზანია დავადგინოთ K_c კოეფიციენტის დასაშვები მნიშვნელობა სტატიკური მდგრადობის თვალსაზრისით. სისტემის ნებისმიერი

რეჟიმისათვის ($P_o > 0$ ყოველთვის), a_2 , a_1 და a_0 კოეფიციენტები დადებითი რიცხვებია ნებისმიერი $K_c > 0$ –სთვის. მაშასადამე (3) მახასიათებელ განტოლებას არ ექნება ნამდვილი დადებითი ფესვი. მაგრამ არ არის გამორიცხული კომპლექსური ფესვების არსებობა დადებითი ნამდვილი ნაწილით. ეს კი გამოიწვევს სისტემის მდგრადობის რყევით დარღვევას.

მახასიათებელი განტოლების ფესვებია:

$$p_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2}$$

ანუ

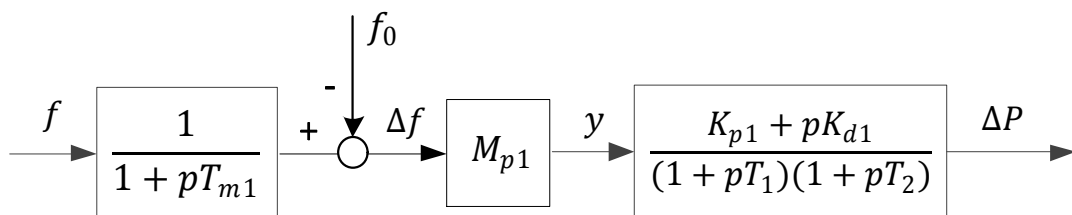
$$p_{1,2} = \frac{-(T_R P_o + T_j) \pm \sqrt{(T_R P_o + T_j)^2 - 4T_j T_R (P_o + K_c)}}{2T_j T_R}$$

ამ უკანასკნელი ფორმულიდან ჩანს, რომ ფესვების ნამდვილი ნაწილი ყოველთვის უარყოფითია. თუ P_o და K_c ისეთია, რომ სრულდება პირობა: $(T_R P_o + T_j)^2 > 4T_j T_R (P_o + K_c)$, სისტემის მდგრადობა იქნება აპერიოდული.

თუ $(T_R P_o + T_j)^2 < 4T_j T_R (P_o + K_c)$, პროცესს ექნება მილევადი რყევების ხასიათი.

დასკვნა: K_c –ს ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის სისტემა სტატიკურად მდგრადია.

ჩანართით გამავალი აქტიური სიმძლავრის რეგულირება სიხშირის მიხედვით შესაძლებელია ასევე CHAAT რეგულატორით.



ნახ. 2 CHAAT რეგულატორის ბლოკ-სქემა

სადაც:

T_{M1} – მრიცხველის დროის მუდმივაა;

$M_{p1} \left[\frac{MW}{Hz} \right]$ – სიმძლავრის ცვლილების სიჩქარეა (მგვტ/ჰერცი);

K_{p1}, K_{d1} – რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტებია;

T_1, T_2 – რეგულატორების დროის მუდმივებია.

ΔP – სიმძლავრის ნაზრდი გამონვეული ჩანართის რეგულატორით (მგვტ).

T_{M1} ჩავთვალოთ ნულის ტოლად.

განვიხილოთ სტატიკური მდგრადობა.

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორში აღწერილია შემდეგი დიფ.

განტოლებით:

$$\Delta f \cdot M_{p1} \cdot (K_{p1} + pK_{d1}) = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P \quad (4)$$

ჩავწეროთ ეს განტოლება ფარდობით ერთეულებში:

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

$$f_o s \cdot \frac{M_{p1}}{S_b} \cdot \left(K_{p1} + \frac{p}{\omega_o} \omega_o K_{d1} \right) = (1 + \frac{p}{\omega_o} \omega_o T_1)(1 + \frac{p}{\omega_o} \omega_o T_2) \cdot \frac{\Delta P}{S_b}$$

$$s * K_1 + p s K_2 = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P_*$$

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

ეკვივალენტური სისტემის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ

განტოლებას აქვს სახე:

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

$$s * K_1 + p s K_2 = (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P_*$$

შენიშვნა: დრო წამებშია და დროის მუდმივებიც წამებშია. სიმძლავრე - ფარდობით ერთეულებში.

შევიტანოთ უსასრულოდ მცირე შეშფოთებები: $f = f_0 + \Delta f$, $s = s_0 + \Delta s$.

იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებაში $\frac{P_0}{1+s}$ წევრი გავამრავლოთ და გავყოთ $1 - s - 8ე$. განტოლება მიიღებს სახეს:

$$T_j p \Delta s + P_0 \Delta s + \Delta P = 0 \gg (T_j p + P_0) \cdot \Delta s + \Delta P = 0$$

მივიღეთ განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} (T_j p + P_0) \cdot \Delta s + \Delta P = 0 \\ (K_1 + K_2 p) \cdot \Delta s - (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P = 0 \end{cases}$$

მახასიათებელი განტოლება მიიღება შემდეგი დეტერმინანტის გაშლით:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p + P_0 & 1 \\ K_1 + K_2 p & -(1 + pT_1)(1 + pT_2) \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} (T_j p + P_0)(1 + (T_1 + T_2) \cdot p + T_1 T_2 \cdot p^2) + K_1 + K_2 p = T_j T_1 T_2 \cdot p^3 + (T_j(T_1 + T_2) + \\ + P_0 T_1 T_2) \cdot p^2 + (T_j + P_0(T_1 + T_2) + K_2) \cdot p + P_0 + K_1 = 0 \end{aligned}$$

მახასიათებელ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (5)$$

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. უნდა გამოვიყენოთ მდგრადობის გურვიცის ან მიხაილოვის კრიტერიუმი. შესაძლებელია უშუალოდ ვიპოვოთ პოლინომის ფესვები, ვინაიდან პოლინომის ხარისხი ნაკლებია 6-ზე.

მაგალითისათვის განვიხილოთ კონკრეტული შემთხვევა.

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

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

(5) მახასიათებელი განტოლების კოეფიციენტები იქნება:

$$a_0 = 0,6925; \quad a_1 = 27,84; \quad a_2 = 279,8; \quad a_3 = 78$$

მახასიათებელ განტოლებას აქვს შემდეგი 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 სიდიდეები იცვლება $p_1 = -0,287$, $p_2 = -22,34$, $p_3 = -17,56$ -დან

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

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:

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

$K_1 = 13260$ - სათვის კი:

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

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

ამ ამოცანის გადანწყვეტა 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:

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

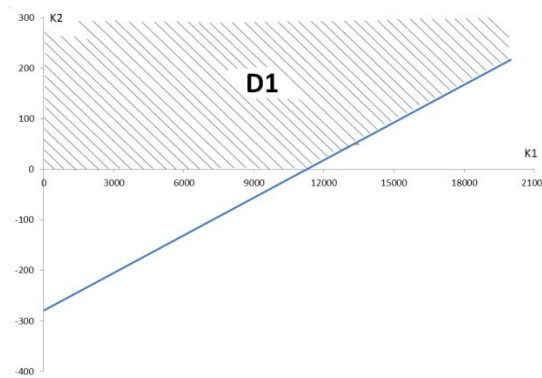
ანუ

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

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

აქედან: $K_2 = -279,1 + 0,0248K_1$

ეს მრუდი ნაჩვენებია ნახ. 3-ზე.



ნახ. 3 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. ასეთი არეები უნდა ავაგოთ ყველა შესაძლო რეჟიმში და კოეფიციენტები ავირჩიოთ, ისე, რომ ისინი ხვდებოდნენ ყველა რეჟიმის D_1 არეში.

2.1.1 ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება გაერთიანებულ საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემაში

განხილულ იქნა სტატიკური მდგრადობა გაერთიანებული საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემების შემთხვევაში. შედეგად ზემოთ განხილულ შემთხვევასთან შედარებით შეიცვლება ინერციის მუდმივა და ჯამური გენერაცია:

$$T_j = 895 \text{ წმ}, \quad M_{p1} = 80, \quad f_0 = 50, \quad T_1 = 0.05, \quad T_2 = 0,05, \quad P_0 = 58, \quad K_1 = 50, \quad K_2 = 0$$

მახასიათებელი განტოლების კოეფიციენტები იქნება;

$$a_0 = 2.2375; \quad a_1 = 89.645; \quad a_2 = 900.8; \quad a_3 = 108$$

მახასიათებელ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$2.2375 \cdot p^3 + 89.645 \cdot p^2 + (900.8 + K_2) \cdot p + 58 + K_1 = 0$$

ავიღოთ $K_1 = 50$, მაშინ K_2 -ს ცვლილებისას 0-დან 10000-მდე ფესვების სიდიდეები იცვლება $p_1 = -0.121$, $p_2 = -21.032$ $p_3 = -18.911$ -დან

$$p_1 = -0,0099, \quad p_2 = -20,027 + j66.861, \quad p_3 = -20,027 - j66.861\text{-მდე.}$$

სამივე ფესვი უარყოფითია, ან აქვს უარყოფითი ნამდვილი ნაწილი. ამ პირობებში სისტემა სტატიკურად მდგრადია. ავიღოთ $K_2 = 50$ და ვცვალოთ K_1 0-დან 38037-მდე. $K_1 = 0$ -სათვის მივიღეთ ფესვები:

$$p_1 = -0,061, \quad p_2 = -20,001 + j4.734, \quad p_3 = -20,001 - j4.734$$

$K_1 = 38037$ -სათვის კი:

$$p_1 = -40.065 \quad p_2 = 0.0001 + j20.614 \quad p_3 = 0.0001 - j20.614$$

K_1 - ის შემდგომი ზრდა გვაძლევს კომპლექსურ ფესვებს დადებითი ნამდვილი ნაწილით, რაც არამდგრადობის ნიშანია.

ავაგოთ D -დანაწილების მრუდი. მახასიათებელ განტოლებას ექნება სახე:

$$2.2375 \cdot (j\omega)^3 + 89.645 \cdot (j\omega)^2 + (900.8 + K_2) \cdot (j\omega) + 58 + K_1 = 0$$

განვაცალკევოთ პოლინომის ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილები:

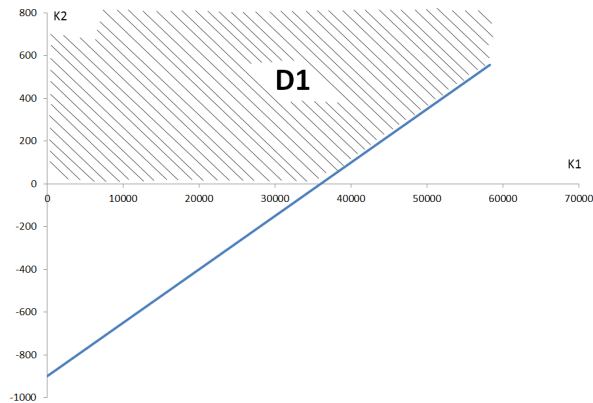
$$-89.645 \cdot \omega^2 + 58 + K_1 = 0$$

$$-j2.2375 \cdot \omega^3 + 900.8 \cdot j\omega + K_2 \cdot j\omega = 0$$

$$-2.2375 \cdot \omega^2 + 900.8 + K_2 = 0$$

აქედან ვიღებთ: $K_2 = -899.352 + 0.025K_1$

ეს მრუდი ნაჩვენებია ნახ. 4-ზე.



ნახ. 4 D-დანაწილების (ნაიკვისტის) მრუდი გაერთიანებულ საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემის შემთხვევაში

როგორც ვნახეთ, $K_1 = 38037$ და $K_2 = 50$ – ის დროს სისტემა სტატიკურად არამდგრადია, გამოდის, რომ კოეფიციენტები D_1 არედან მოიცავს სტატიკურად მდგრად წერტილებს.

2.1.2 ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება სისტემაში

სიჩქარის რეგულატორის გათვალისწინებით

განვიხილოთ 2.1.1 პარაგრაფში მოცემული შემთხვევა, ოღონდ ამჯერად სიჩქარის რეგულატორის გათვალისწინებით.

როტორის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება:

$$T_j \frac{ds}{dt} = \frac{(P_0 + \Delta P_0)(1 - s)}{1 - s^2} - (P_{გლ} + K_1 \frac{f - f_0}{f_0} \cdot f_0)$$

გავამარტივოთ ეს განტოლება და შემოვიტანოთ მცირე შეშფოთება:
 $s = s_0 + \Delta s$, $f = f_0 + \Delta f$ და ოპერატორული მეთოდი:

$$T_j p \Delta s = P_0 + \Delta P_0 - P_0 \Delta s - P_0 \Delta s - P_{გლ} - K_1 \Delta s f_0$$

$$[T_j p + (P_0 + K_1 f_0)] \cdot \Delta s + \Delta P_0 = 0$$

გარდამავალი პროცესი სიჩქარის რეგულატორში აღწერილია შემდეგი დიფ. განტოლებებით:

$$\Delta s [K_S \cdot (1 + p T_R)] - \Delta P_0 \cdot (1 + p T_G) \cdot (1 + 8 p T_R) = 0$$

K_S – სიჩქარის რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტი;

T_G – რეგულატორის დროის მუდმივა;

T_R – რეგულატორის დროის მუდმივა.

ავიღოთ: $T_G = 0$, $T_R = 5$ წმ

მივიღეთ განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} [T_j p + (P_0 + K_1 \cdot f_0)] \cdot \Delta s + \Delta P_0 = 0 \\ K_S (1 + p T_R) \cdot \Delta s - \Delta P_0 (1 + 8 p T_R) = 0 \end{cases}$$

მახასიათებელი განტოლება მიიღება შემდეგი დეტერმინანტის გაშლით:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p + (P_0 + K_1 \cdot f_0) & 1 \\ K_S (1 + p T_R) & -(1 + 8 p T_R) \end{vmatrix}$$

$$8 \cdot T_j \cdot T_R \cdot p^2 + [T_j + T_R \cdot (8 \cdot (P_0 + K_1 \cdot f_0) - K_S)] \cdot p + (P_0 + K_1 \cdot f_0 - K_S) = 0$$

მახასიათებელ განტოლებას ეწნება სახე:

$$a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$$

$$a_0 = 8 \cdot T_j \cdot T_R; \quad a_1 = T_j + T_R \cdot (8 \cdot (P_0 + K_1 \cdot f_0) - K_S); \quad a_2 = P_0 + K_1 \cdot f_0 - K_S$$

სტატიკური მდგრადობის ანალიზისას ამ შემთხვევაშიც აღებულია საქართველო-აზერბაიჯანის გაერთიანებული სისტემა და რეჟიმის პარამეტრები. ანგარიშები ჩატარებულია ფარდობით ერთეულებში.

$$T_j = 895 \cdot 314 = 281030; T_R = 5 \cdot 314 = 1570; P_0 = 58;$$

$$K_1 = 100; f_0 = 1; K_S = 20$$

მახასიათებელ განტოლებას ეყენება სახე:

$$3529736800 \cdot p^2 + 2234110 \cdot p + 138 = 0$$

$$p_1 = -0.000563; p_2 = -0.000069$$

ორივე ფესვი უარყოფითია, ანუ სტატიკური მდგრადობა შენარჩუნებულია. როგორც მახასიათებელი განტოლებიდან ჩანს, a_1 და a_2 კოეფიციენტებში შედიან K_1 (მუდმივი დენის ჩანართის გაძლიერების კოეფიციენტი) და K_S (სიჩქარის რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტი). მდგრადობა შენარჩუნდება ასევე, თუ $a_1 > 0$ და $a_2 > 0$. დავადგინოთ K_1 -ის დამოკიდებულება K_S -ზე.

$$T_j + T_R \cdot (8 \cdot (P_0 + K_1 \cdot f_0) - K_S) > 0 \Rightarrow K_1 > \frac{K_S \cdot T_R - 8 \cdot T_R \cdot P_0 - T_j}{8 \cdot T_R \cdot f_0} = -78$$

$$P_0 + K_1 \cdot f_0 - K_S > 0 \Rightarrow K_1 > \frac{K_S - P_0}{f_0} = -38$$

$$\text{მივიღეთ: } K_S = 20 \Rightarrow K_1 > -78 \text{ და } K_1 > -38$$

რაც ნიშნავს, რომ $K_S = 20$ -ის დროს K_1 -ის ნებისმიერი დადებითი სიდიდე უზრუნველყოფს დადებით a_1 -სა და a_2 -ს ანუ სტატიკურ მდგრადობას.

გავიანგარიშოთ K_1 -ის სიდიდე K_S -ის მინიმალურიდან მაქსიმალური მნიშვნელობების დროს.

$$K_S = 5 \gg K_1 > -53 \text{ და } K_1 > -80$$

$$K_S = 50 \gg K_1 > -8 \text{ და } K_1 > -74$$

დასკვნა:

- ❖ გაერთიანებული საქართველო-აზერბაიჯანის სისტემის შემთხვევაში ჩანართის რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტების ზღვრები შედარებით დიდია, ვიდრე იზოლირებული საქართველოს სისტემის დროს.

- ❖ გარდა ამისა, მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტის ნებისმიერი დადებითი მნიშვნელობა, რომელიც რეალურ ფარგლებში მოექცევა, უზრუნველყოფს სისტემის სტატიკურ მდგრადობას იმისგან დამოუკიდებლობით, განხილულ ანალიზში გათვალისწინებულია თუ არა სიჩქარის რეგულატორი.

2.1.3 სიმძლავრის ექსპორტი თურქეთიდან

საქართველო-აზერბაიჯანის გაერთიანებულ სისტემაში

განვიხილოთ რეჟიმი, სადაც პარალელურად მომუშავე საქართველოსა და აზერბაიჯანის სისტემებში ხორციელდება სიმძლავრის ექსპორტი თურქეთიდან. ეს ნიშნავს, რომ დიფერენციალურ განტოლებაში გაძლიერების კოეფიციენტი და სიმძლავრის ნაზრდი შევა საპირისპირო ნიშნით. ასევე გავითვალისწინოთ გაძლიერების კოეფიციენტი მხოლოდ სიხშირის მიხედვით.

$$(\Delta s \cdot f_0 \cdot M_{p1}) \cdot (-K_{p1}) = -(1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P$$

ეკვივალენტური სისტემის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე:

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

იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებაში $\frac{P_0}{1+s}$ წევრი

გავამრავლოთ და გავყოთ $1 - s -$ ზე. განტოლება მიიღებს სახეს:

$$T_j p \Delta s + P_0 \Delta s - \Delta P = 0 \gg (T_j p + P_0) \cdot \Delta s - \Delta P = 0$$

მივიღეთ განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} (T_j p + P_0) \cdot \Delta s - \Delta P = 0 \\ (-K_{p1} \cdot f_0 \cdot M_{p1}) \cdot \Delta s + (1 + pT_1)(1 + pT_2) \cdot \Delta P = 0 \end{cases}$$

მახასიათებელი განტოლება მიიღება შემდეგი დეტერმინანტის გაშლით:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p + P_0 & -1 \\ -K_{p1} \cdot f_0 \cdot M_{p1} & (1 + pT_1)(1 + pT_2) \end{vmatrix}$$

$$(T_j p + P_0)(1 + (T_1 + T_2) \cdot p + T_1 T_2 \cdot p^2) - K_{p1} \cdot f_0 \cdot M_{p1} = T_j T_1 T_2 \cdot p^3 +$$

$$(T_j(T_1 + T_2) + P_0 T_1 T_2) \cdot p^2 + (T_j + P_0(T_1 + T_2)) \cdot p + P_0 - K_{p1} \cdot f_0 \cdot M_{p1} = 0$$

მახასიათებელ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

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

სადაც

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

$$a_3 = P_0 - K_{p1} \cdot f_0 \cdot M_{p1}$$

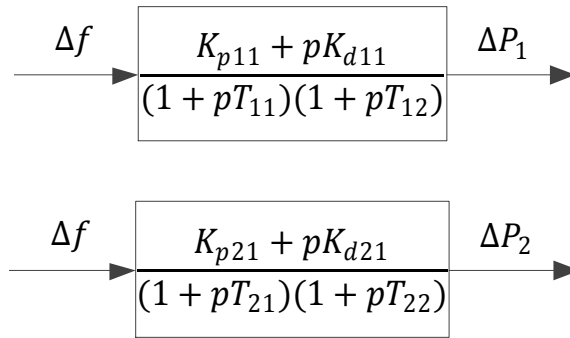
სტატიკური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის, მახასიათებელი განტოლების თითოეული კოეფიციენტი ნულზე მეტი უნდა იყოს. ამ პირობას a_3 კოეფიციენტის გამოსახულებიდან ექნება სახე:

$$K_{p1} < \frac{P_0}{f_0 \cdot M_{p1}} = 72.5$$

2.1.4 ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება სისტემაში

ორი რეგულატორით

დავუშვათ, რომ CHAUT რეგულატორში გამზომ ორგანოს არ აქვს დროის დაყოვნება არცერთ რეგულატორში. ორი ასეთი რეგულატორის ბლოკ-სქემებს ექნება ნახ. 5-ზე ნაჩვენები გამარტივებული სახე.



ნახ. 5 CHAUT რეგულატორის გამართივებული ბლოკ-სქემები

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორებში შეგვიძლია აღვწეროთ შემდეგი დიფერენციალური განტოლებებით :

$$\begin{cases} T_j p \Delta f + P_0 \Delta f + \Delta P_1 + \Delta P_2 = 0 \\ \Delta f \cdot (K_{p11} + pK_{d11}) = \Delta P_1 \cdot (1 + pT_{11})(1 + pT_{12}) \\ \Delta f \cdot (K_{p21} + pK_{d21}) = \Delta P_2 \cdot (1 + pT_{21})(1 + pT_{22}) \end{cases} \quad (6)$$

ΔP_1 – აქტიური სიმძლავრის ნაზრდი, გამონვეული პირველი ჩანართის რეგულატორით;

ΔP_2 – აქტიური სიმძლავრის ნაზრდი, გამონვეული მეორე ჩანართის რეგულატორით;

K_{p11}, K_{d11} – პირველი რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტები;

K_{p21}, K_{d21} – მეორე რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტები;

T_{11}, T_{12} – პირველი რეგულატორის დროის მუდმივები;

T_{21}, T_{22} – მეორე რეგულატორის დროის მუდმივები;

დავალაგოთ (6) განტოლების წევრები მასში შემავალი კოეფიციენტების ($\Delta f, \Delta P_1, \Delta P_2$) მიხედვით.

$$\begin{cases} \Delta f(T_j p + P_0) + \Delta P_1 + \Delta P_2 = 0 \\ \Delta f \cdot (K_{p11} + pK_{d11}) - \Delta P_1 \cdot (1 + pT_{11})(1 + pT_{12}) + 0\Delta P_2 = 0 \\ \Delta f \cdot (K_{p21} + pK_{d21}) + 0\Delta P_1 - \Delta P_2 \cdot (1 + pT_{21})(1 + pT_{22}) = 0 \end{cases}$$

მახასიათებელი განტოლება მიიღება შემდეგი პოლინომის გაშლით:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p + P_0 & 1 & 1 \\ K_{p11} + pK_{d11} & -(1 + pT_{11})(1 + pT_{12}) & 0 \\ K_{p21} + pK_{d21} & 0 & -(1 + pT_{21})(1 + pT_{22}) \end{vmatrix}$$

მახასიათებელ განტოლებას აქვს სახე:

$$D(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0 \quad (7)$$

(7) მახასიათებელი განტოლების კოეფიციენტები:

$$a_0 = T_j T_{11} T_{12} T_{21} T_{22}$$

$$a_1 = T_j \cdot (T_{22} \cdot (T_{11} T_{12} + T_{21} T_{22} (T_{11} + T_{12}))) + T_{11} T_{12} T_{21} + P_0 \cdot T_{11} T_{12} T_{21} T_{22}$$

$$a_2 = P_0 \cdot (T_{22} \cdot (T_{11} T_{12} + T_{21} (T_{11} + T_{12}))) + T_{11} T_{12} T_{21} + T_j \cdot (T_{11} T_{12} +$$

$$+ T_{22} (T_{11} + T_{12} + T_{21}) + T_{21} \cdot (T_{11} + T_{12})) + K_{d21} T_{11} T_{12} + K_{d11} T_{21} T_{22}$$

$$a_3 = T_j \cdot (T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}) + K_{d21} \cdot (T_{11} + T_{12}) + K_{d11} (T_{21} + T_{22}) +$$

$$+ P_0 \cdot (T_{11} T_{12} + T_{22} \cdot (T_{11} + T_{12} + T_{21}) + T_{21} \cdot (T_{11} + T_{12})) + K_{p21} \cdot T_{11} T_{12} +$$

$$+ K_{p11} T_{21} T_{22}$$

$$a_4 = K_{d11} + K_{d21} + T_j + P_0 \cdot (T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}) + K_{p21} \cdot (T_{11} + T_{12}) + K_{p11} \cdot$$

$$\cdot (T_{21} + T_{22})$$

$$a_5 = K_{p11} + K_{p21} + P_0$$

გავიანგარიშოთ სტატიკური მდგრადობა კონკრეტული პარამეტრების შემთხვევაში:

$$T_j = 277, T_{11} = 0.6, T_{12} = 0.8, P_0 = 28, K_{p11} = 50, K_{d11} = 100$$

$$T_{21} = 0.65, T_{22} = 0.85, K_{p21} = 40, K_{d21} = 80$$

მახასიათებელი განტოლების კოეფიციენტები მიიღებენ შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$a_0 = 73.46; a_1 = 413.7; a_2 = 961.35; a_3 = 1112.13; a_4 = 588; a_5 = 90$$

შემოვიტანოთ (7) – ში p –ს მაგივრად jw .

შევამოწმოთ სტატიკური მდგრადობა მიხაილოვის კრიტერიუმით. ლუნ და კენტხარისხიანი w – ს შემცველი წევრების ჯამები:

$$V(w) = a_0 w^5 - a_2 w^3 + a_4 w = 73.46 w^5 - 961.35 w^3 + 588 w = 0$$

$$U(w) = a_1 w^4 - a_3 w^2 + a_5 = 413.7 w^4 - 1112.13 w^2 + 90 = 0$$

$V(w)$

$$w \cdot (73.46 w^4 - 961.35 w^2 + 588) = 0$$

$$w_1 = 0$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა: $w^2 = x$

$$73.46 x^2 - 961.35 x + 588 = 0 \gg x_1 = 12.44; x_2 = 0.64$$

$$w_2 = \sqrt{12.44} = 3.53; w_3 = -3.53; w_4 = 0.8; w_5 = -0.8$$

$U(w)$

$$413.7 x^2 - 1112.13 x + 90 = 0 \gg x_3 = 2.6; x_4 = 0.08;$$

$$w_6 = 1.61; w_7 = -1.61; w_8 = 0.29; w_9 = -0.29$$

ყველა ფესვი ნამდვილია და გადანაცვლებადი. ე.ი. სტატიკური მდგრადობა სრულდება. როგორც ვნახეთ, თუ ელექტრულ სისტემაში გვაქვს ორი ჩანართი, რომლებიც აკავშირებენ მას მეზობელ სისტემასთან (მაგალითად ბათუმის და ახალციხის ჩანართები), მაშინ სისტემის

იძულებითი მოძრაობის განრთვივებული განტოლებები უსასრულოდ მცირე ნაზრდებისთვის მიიღებენ (6) განტოლებათა სისტემის სახეს. როგორც CHAUT რეგულატორის ბლოკ-სქემიდან ჩანს (ნახ. 5), T_{11} და T_{21} არის რეგულატორის სიხშირის გადახრის რგოლის დროის მუდმივები, T_{12} და T_{22} კი სიხშირის წარმოებულის შესაბამისი რგოლის დროის მუდმივები. თუ ჩანართების რეგულატორების დროის ეს მუდმივები ტოლია: $T_{11} = T_{21} = T_1$ და $T_{12} = T_{22} = T_2$, მაშინ (6) განტოლებები გამარტივდება. შევკრიბოთ წევრ-წევრად (6)-ის მეორე და მესამე განტოლებები:

$$\Delta f \cdot (K_{p11} + K_{p21} + p \cdot (K_{d11} + K_{d21})) - (1 + pT_1) \cdot (1 + pT_2) \cdot (\Delta P_1 + \Delta P_2) = 0$$

აღვნიშნოთ $K_{p11} + K_{p21} = K_{p1}$ და $K_{d11} + K_{d21} = K_{d2}$ და რადგანაც $\Delta P_1 + \Delta P_2 = \Delta P$, მივიღებთ:

$$\Delta f \cdot (K_{p1} + pK_{d2}) - \Delta P(1 + pT_1)(1 + pT_2) = 0 \quad (8)$$

ფაქტიურად მოვახდინეთ ჩანართების მათი რეგულატორების ეკვივალენტირება. ამოცანა დავიყვანეთ ზემოთ განხილულ შემთხვევაზე. n ჩანართის შემთხვევაში ანალოგიურად გვექნება:

$$K_{p1} = K_{p11} + K_{p21} + K_{p31} + \dots + K_{pn1}$$

$$K_{d1} = K_{d11} + K_{d21} + K_{d31} + \dots + K_{dn1}$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_n$$

საბოლოოდ გვაქვს ზემოთ განხილული განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} (T_j p + P_0) \Delta f + \Delta P = 0 \\ (K_{p1} + pK_{d1}) \Delta f - \Delta P(1 + pT_1)(1 + pT_2) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

თუ ჩვენ რაიმე მეთოდით ვიპოვეთ K_{p1} და K_{d1} –ს მაქსიმალურად დასაშვები სიდიდეები ან გვაქვს აღებული მოცემული რეჟიმისთვის, სადაც

სიდიდეები, რომლებიც აკმაყოფილებენ მდგრადობის პირობას. მაშინ რამოდენიმე ჩანართის პირობებში უნდა სრულდებოდეს პირობა:

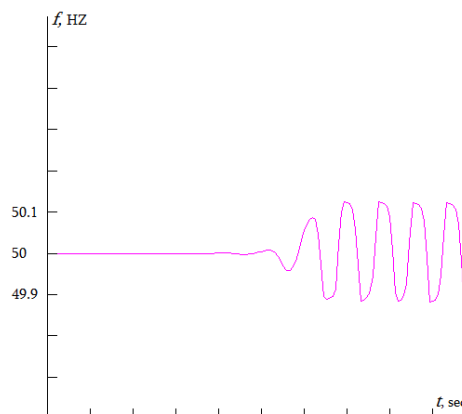
$$\begin{cases} K_{p11} + K_{p21} + K_{p31} + \dots + K_{pn1} = K_{p1} \\ K_{d11} + K_{d21} + K_{d31} + \dots + K_{dn1} = K_{d1} \end{cases} \quad (10)$$

დასკვნა:

სისტემაში ყოველი ახალი ჩანართის მუშაობაში შეყვანის წინ უნდა შემოწმდეს (10) პირობა.

2.1.5 D-დანაწილების მრუდით მიღებული წერტილების შემოწმება სტატიკურ მდგრადობაზე პროგრამა PSS/E-ში

აღებულ იქნა ერთი წერტილი D2-დან: $K_{p1} = 4000$, $K_{d1} = 500$ (ნახ. 3). (10) პირობის გათვალისწინებით შეირჩა რეგულატორების (ორი ჩანართი ახალციხეში, ერთი ბათუმში) პარამეტრები. სისტემაში მცირე შეშფოთების (3 მგვტ-იანი მატყოფიჭესის გამორთვა) შეტანის შედეგად მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე.



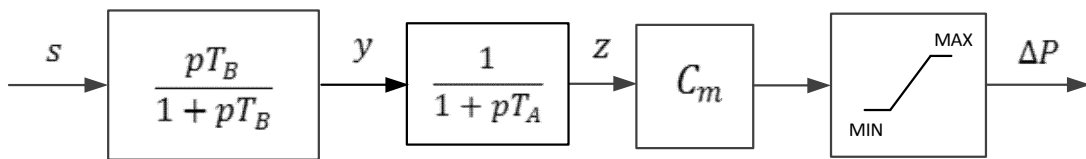
ნახ. 6 სიხშირე საქართველოს სისტემაში მცირე შეშფოთებისას

როგორც ნახაზიდან ჩანს, მცირე შეშფოთება იწვევს მდგრადობის დარღვევას, რაც უკვე დამტიცებული იქნა ზემოთ.

2.2 ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება

სიშირის წარმოებულის მიხედვით

მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირება შესაძლებელია სიშირის ცვლილების სიჩქარის (წარმოებულის) მიხედვით. შესაბამისი რეგულატორის ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ. 7-ზე.



ნახ. 7 CPAAUT რეგულატორის ბლოკ-სქემა

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორში გამოისახება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებებით:

$$\begin{cases} T_B \frac{ds}{dt} = T_B \frac{dy}{dt} + y \\ T_A \frac{dz}{dt} + z = y \\ \Delta P = zC_M \end{cases} \quad (11)$$

ეს განტოლებები, სისტემის იძულებითი მოძრაობის განტოლებებთან ერთად, ცვლადების უსასრულო მცირე ნაზრდებისათვის გვაძლევენ განწვავებულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას:

$$\begin{cases} T_j \frac{d\Delta s}{dt} + P_o \Delta s + \Delta z C_M = 0 \\ T_A \frac{d\Delta z}{dt} + \Delta z - \Delta y = 0 \\ T_B \frac{d\Delta s}{dt} - T_B \frac{d\Delta y}{dt} - \Delta y = 0 \end{cases}$$

ეს განტოლებები ოპერატორული ფორმით იქნება:

$$(T_j p + P_o) \Delta s + \Delta z C_M + 0 \Delta y = 0,$$

$$0 \Delta s + (T_A p + 1) \Delta z - 1 \Delta y = 0,$$

$$T_B p \Delta s + 0 \Delta z - (T_B p + 1) \Delta y = 0$$

ამ სისტემის დეტერმინანტის გაშლა გვაძლევს შემდეგ მახასიათებელ განტოლებას:

$$D(P) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

სადაც:

$$a_3 = T_j T_A T_B ;$$

$$a_2 = T_B T_A P_o + T_j T_A + T_B T_j ;$$

$$a_1 = T_B P_o + P_o T_A + T_j + T_B C_M ;$$

$$a_0 = P_o.$$

ყველა ეს კოეფიციენტი დადებითია ნებისმიერი P_o და C_M – სათვის.

კომპლექსური ფესვების ნამდვილი ნაწილის ნიშანს გავიგებთ გურვიცის კრიტერიუმის დახმარებით. შევადგინოთ გურვიცის მატრიცა:

a_1	a_0	0
a_3	a_2	a_1
0	0	a_3

ფესვების ნამდვილი ნაწილები რომ იყვნენ უარყოფითები, საჭიროა:

$$\Delta_1 = a_1 > 0 ;$$

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0 ;$$

$$\Delta_3 = a_3 \cdot (a_1 a_2 - a_3 a_0) > 0$$

ჩვენ შემთხვევაში ეს პირობა სრულდება ნებისმიერი P_o და C_M – სათვის.

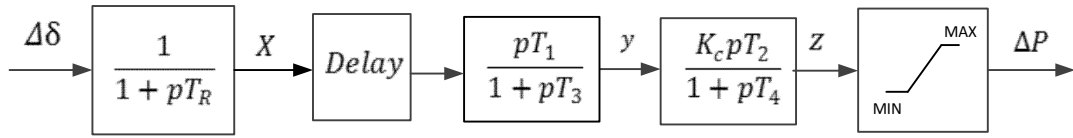
ესეგი ასეთი რეგულირება ყოველთვის იქნება სტატიკურად მდგრადი.

2.3 ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირება

სქემის კვანძის ძაბვის კუთხის ცვლილების მიხედვით

მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირება ეიძლება განხორციელდეს სისტემის რაიმე კვანძის ძაბვის ვექტორის კუთხის ცვლილების მიხედვით.

ასეთი რეგულატორის (PAU2XT) ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ. 8-ზე.



ნახ. 8 PAUX2T რეგულატორის ბლოკ-სქემა

გარდამავალი პროცესი ასეთ რეგულატორში აღინერება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებებით:

$$\begin{cases} \Delta\delta = T_R \frac{dx}{dt} + x \\ T_1 \frac{dx}{dt} = T_3 \frac{dy}{dt} + y \\ T_2 K_C \frac{dy}{dt} = T_4 \frac{dz}{dt} + z \\ T_j \frac{ds}{dt} = \frac{P_o}{1+s} - P_{el} - z \end{cases} \quad (12)$$

მარტივი გარდაქმნებით ამ განტოლებებს შეიძლება მივცეთ შემდეგი სახე. ვინაიდან:

$$\frac{d\delta}{dt} = T_R \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} \quad \text{და} \quad \frac{dx}{dt} = \frac{T_3}{T_1} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{T_1} y$$

ვღებულობთ:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{T_3}{T_1} T_R \frac{d^2y}{dt^2} + \left(\frac{T_3 + 1}{T_1} \right) \frac{dy}{dt} + \frac{y}{T_1}$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$\frac{dy}{dt} = v, \quad T_A = \frac{T_3}{T_1} T_R, \quad B = \frac{T_3 + 1}{T_1}$$

მივიღებთ შემდეგ განტოლებათა სისტემას:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{dt} = v \\ T_A \frac{dv}{dt} + Bv + \frac{y}{T_1} - s = 0 \\ T_4 \frac{dz}{dt} + z - T_2 K_C v = 0 \\ T_j \frac{ds}{dt} - \frac{P_o}{1+s} + P_{el} + z = 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

უსასრულო მცირე ცვლადებისათვის და განტოლებების განწოვივების შემდეგ გვექნება:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_A \frac{d\Delta v}{dt} + B\Delta v + \frac{\Delta y}{T_1} - \Delta s = 0 \\ \frac{d\Delta y}{dt} - \Delta v = 0 \\ T_4 \frac{d\Delta z}{dt} + \Delta z - T_2 K_C \Delta v = 0 \\ T_j \frac{d\Delta s}{dt} + P_o \Delta s + \Delta z = 0 \end{array} \right.$$

ამ სისტემის მახასიათებელი განტოლებაა:

$$D(P) = a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p = 0$$

სადაც

$$a_4 = T_A T_4 T_j;$$

$$a_3 = T_A T_4 P_o + T_A T_j + T_4 T_j B$$

$$a_2 = T_A P_o + T_4 P_o B + T_j B$$

$$a_1 = P_o$$

ყველა შესაძლო P_o და K_C – სათვის ეს კოეფიციენტები დადებითია.

ვადგენთ გურვიცის მატრიცას:

a_1	0	0	0
a_3	a_2	a_1	0
0	a_4	a_3	a_2
0	0	0	a_4

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= a_1 > 0; \\ \Delta_2 &= a_1 a_2 > 0; \\ \Delta_3 &= a_1 \cdot (a_2 a_3 - a_1 a_4) > 0 \\ \Delta_4 &= a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 > 0\end{aligned}$$

ან გამოვიყენოთ D-დანაწილების მეთოდი. ჩვენ მაგალითში გვაქვს:

$$\begin{aligned}a_4 &= T_A T_4 T_j = R_4; \\ a_3 &= T_A T_4 P_o + T_A T_j + T_4 T_j B = R_3 + Z_3 P_o; \\ a_2 &= T_A P_o + T_4 P_o B + T_j B = R_2 + P_o Z_2; \\ a_1 &= P_o\end{aligned}$$

სადაც:

$$\begin{aligned}R_4 &= T_j T_4 T_A; \\ R_3 &= T_j T_A + T_4 T_j B; \quad Z_3 = T_4 T_A; \\ R_2 &= T_j B + T_4 P_o; \quad Z_2 = T_4 B; \\ Z_1 &= B;\end{aligned}$$

$$T_R = 0.2 * 314; T_1 = 0.051 * 314; T_2 = 2.55 * 314; T_3 = 0.12 * 314$$

$$T_4 = 4.5 * 314; T_A = T_R * \frac{T_3}{T_1}; B = \frac{T_3 + 1}{T_1}$$

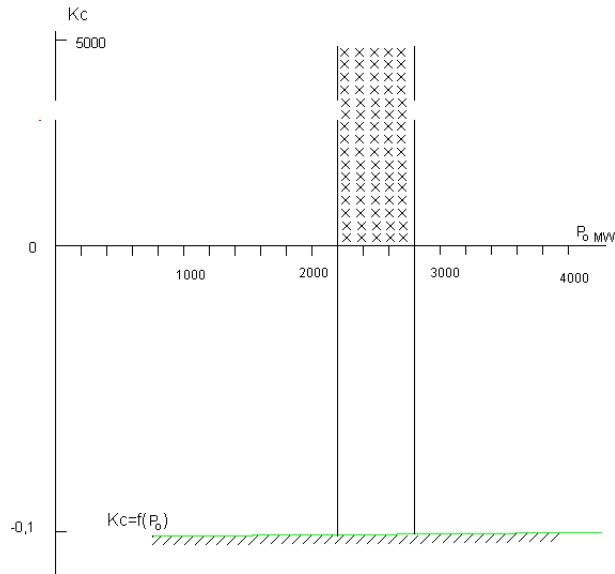
შევიტანოთ მახასიათებელ განტოლებაში p -ს მაგივრად $j\omega$. მივიღებთ:

$$D(\omega) = R_4 \omega^4 - j\omega^3 R_3 - j\omega^3 P_o Z_3 - R_2 \omega^2 - \omega^2 P_o Z_2 + P_o = 0$$

გამოვყოთ ამ გამოსახულების ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილები და მცირე გარდაქმნის შემდეგ მივიღებთ:

$$\begin{aligned}P_o &= \frac{\omega^3 R_3 - \omega R_1}{\omega Z_1 - \omega^3 Z_3} \\ K_c &= \frac{R_4 \omega^4 - R_2 \omega^2 - P_o \left(\frac{1}{T_1} - Z_2 \omega^2 \right)}{F_2 \omega^2}\end{aligned}$$

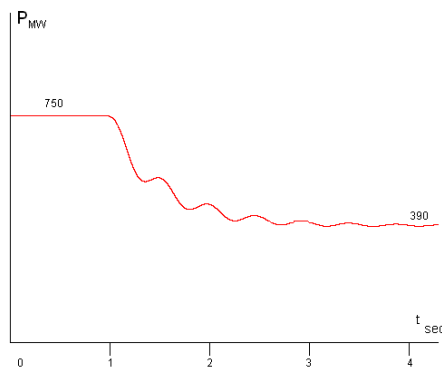
ვცვლით ω -ს 0-დან ∞ -მდე და ვაგებთ მრუდს $K_c = f(P_o)$, ნახ. 9



ნახ. 9 D-დანაწილების მრუდი

განხილული რეჟიმი შეიძლება არსებობდეს 2200 და 2800 მგვტ-ს შორის. იგულისხმევა გენერაციის ერთი და იგივე შემადგენლობა ანუ ერთი და იგივე ინერციის მუდმივა T_j . რეგულატორის უარყოფით მნიშვნელობას აზრი არა აქვს. მაშასადამე გაძლიერების კოეფიციენტის დასაშვები მნიშვნელობები შეიძლება აღებული იქნეს ჯვრებით დაპტრიხულ არედან.

ვირჩევთ $K_c = 5000$ და ვატარებთ დინამიური მდგრადობის მოდელირებას ზემოთ მოყვანილი მაგალითისათვის. რეზულტატები ნაჩვენებია ნახ. 10-ზე.



ნახ. 10 ჩანართის სიმძლავრე გარდამავალ პროცესში

თავი 3

დინამიური მდგრადობის ანალიზი

3.1 დინამიური მდგრადობის ანალიზი აზერბაიჯანისა და საქართველოს სისტემების გაყოფის შემთხვევაში

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 მოცემულია ცხრილ 1-ში.

გენერაცია, მგვტ	დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	იმპორტი აზერბაიჯანიდან, მგვტ
2300	1920	1050	725

ცხრ. 1 მდგრადობის ანალიზისთვის შერჩეული 2017 წლის ერთერთი რეჟიმი

მოცემული რეჟიმისთვის განხილულია ორი ვარიანტი:

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

შეშფოთება – აზერბაიჯანისა და საქართველოს სისტემების გაყოფა.

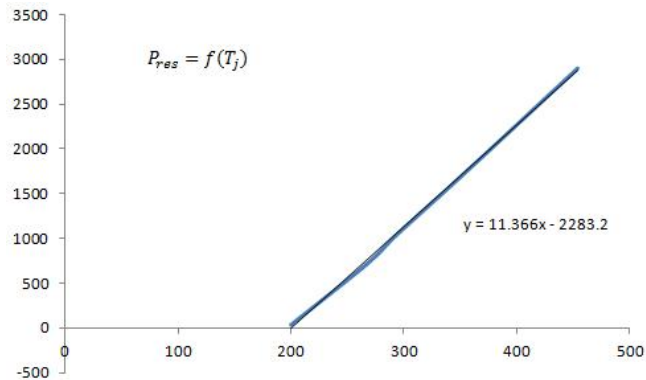
სისტემების გაყოფის შედეგად საქართველოში წარმოიქმნა მექანიკური სიმძლავრის დეფიციტი 725 მგვტ-ის ოდენობით, რისი ლიკვიდაციაც განხორციელდა გენერატორების სიჩქარის რეგულატორებითა და სასისტემო ავტომატიკით (მომხმარებლების გამორთვით). ეს პროპორცია კი შესაძლოა ვცვალოთ საქართველოს სისტემის ჯამური ინერციის

მუდმივისა და სიმძლავრის რეზერვის სიდიდის მიხედვით. დინამიური მდგრადობის ანალიზი ჩატარდა ცხრილ №1-ში მოცემული სიდიდეების მუდმივობის და სხვადასხვა T_j ინერციის მუდმივისა და $P_{რეზ}$ სიმძლავრის რეზერვის შემთხვევაში. შედეგები ნაჩვენებია ცხრილ 2-ში.

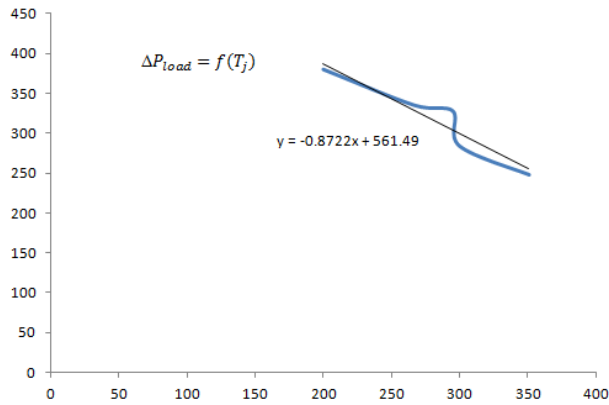
T_j წმ	$P_{რეზ}$ მგვტ	$\Delta P_{ლატ}$ მგვტ	$\Delta P_{მეჭ}$ მგვტ	$f_{მინ}$ ჰც
200	34	380	315	49.08
267	710	335	393	49.03
295	1056	328	410	49.05
351	1695	284	458	49.03
454	2900	248	538	49.07

ცხრ. 2 საქართველოს სისტემაში სიჩქარის რეგულატორებისა და სასისტემო ავტომატიკის არსებობით მიღებული შედეგები

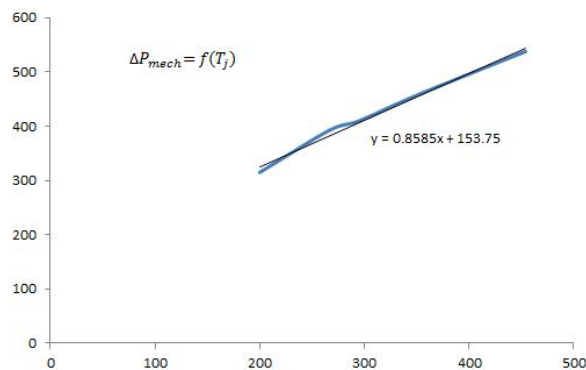
ქვემოთ ნახაზებზე ნაჩვენებია დამოკიდებულებები რეჟიმის პარამეტრებს შორის.



ნახ. 11 მბრუნავი რეზერვის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე



ნახ. 12 გამორთული დატვირთვის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე



ნახ. 13 მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე

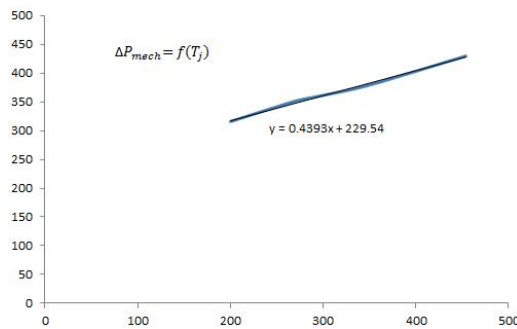
2) სისტემაში ჩართულია სიჩქარის რეგულატორები, მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორი და საგ-ები. გამორთულია სასისტემო ავტომატიკა.

შეშუოთება – აზერბაიჯანისა და საქართველოს სისტემების გაყოფა. საქართველოში წარმოიქმნა 725 მგვტ მექანიკური სიმძლავრის დეფიციტი. მისი ლიკვიდაცია განხორციელდა გენერატორების სიჩქარის რეგულატორებითა, მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირებითა და საგ-ებით. შედეგი ნაჩვენებია ცხრილ 3-ში.

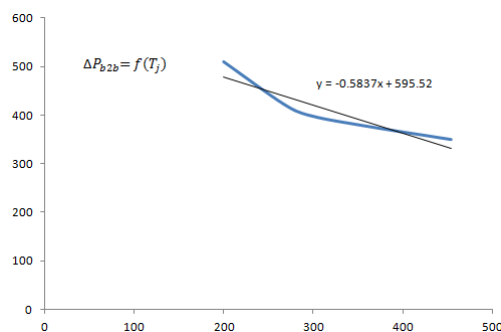
T_j მგვტ	$P_{რეზ}$ მგვტ	$\Delta P_{მექ}$ მგვტ	ΔP_{b2b} მგვტ	$f_{მინ}$ ჰც
200	34	316	510	49.20
267	710	350	423	49.24
295	1056	360	400	49.25
351	1695	380	380	49.27
454	2900	430	350	49.32

ცხრ. 3 საქართველოს სისტემაში სიჩქარის, ჩანართის რეგულატორებისა და საგ-ების არსებობით მიღებული შედეგები

ნახ. 14, 15-ზე ნაჩვენებია რეჟიმის პარამეტრების დამოკიდებულებები ინერციის მუდმივაზე.



ნახ. 14 მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე



ნახ. 15 მუდმივი დენის ჩანართზე შემცირებული სიმძლავრის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე

მოდელორებულ იქნა იგივე ორი ვარიანტი გაზრდილი ექსპორტ/იმპორტით.

რეჟიმის პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილი 4-ში.

გენერაცია, მგვტ	დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	იმპორტი აზერბაიჯანიდან, მგვტ
2300	1920	1400	1110

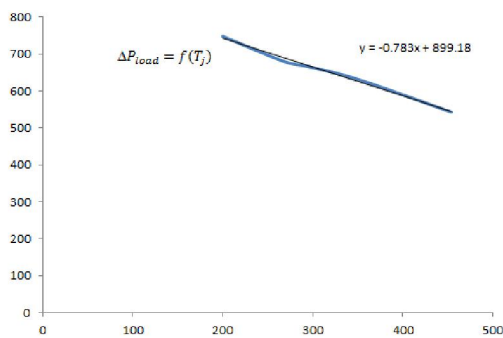
ცხრ. 4 ანალიზისთვის შერჩეული რეჟიმის (გაზრდილი ექსპორტი/იმპორტი) პარამეტრები

მიღებული შედეგები I ვარიანტისთვის ნაჩვენებია ცხრილ 5-ში:

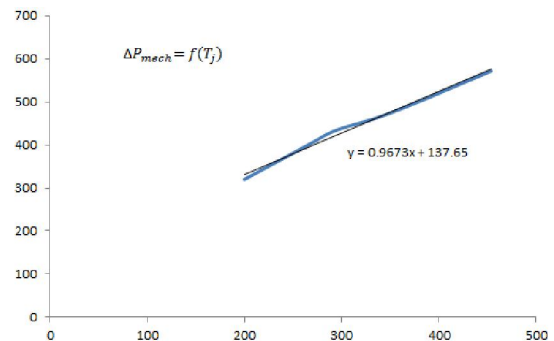
T_j მგვტ	$P_{რეგ}$ მგვტ	$\Delta P_{ლატ}$ მგვტ	$\Delta P_{მექ}$ მგვტ	$f_{მინ}$ ჰც
200	34	748	320	49.08
267	710	681	402	48.95
295	1056	666	435	48.93
351	1695	631	475	48.98
454	2900	543	572	49

ცხრ. 5 მიღებული შედეგები მოდელირების I ვარიანტისთვის

რეჟიმის პარამეტრების დამოკიდებულებები ინერციის მუდმივაზე ნაჩვენებია მომდევნო (მე-16, მე-17) ნახაზებზე.



ნახ. 16 გამორთული დატვირთვის სიდიდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე



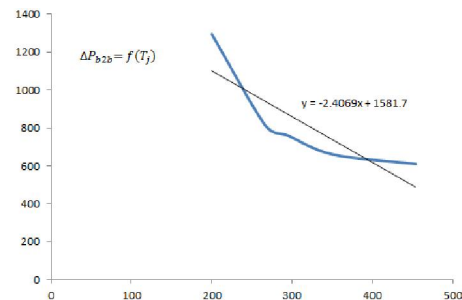
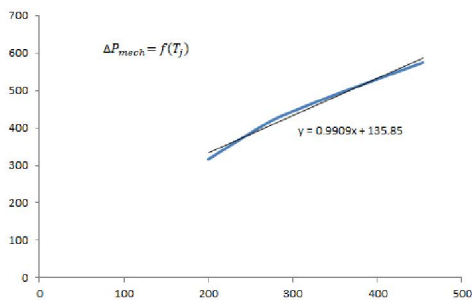
ნახ. 17 მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე

მიღებული შედეგები II ვარიანტისთვის ნაჩვენებია ცხრილ 6-ში:

T_j მგვტ	$P_{რეზ}$ მგვტ	$\Delta P_{მეფ.}$ მგვტ	ΔP_{b2b} მგვტ	$f_{შირ}$ ჰც
200	34	317	1295	48.9
267	710	410	812	48.96
295	1056	440	760	49
351	1695	490	660	49.03
454	2900	575	610	49.11

ცხრ. 6 მიღებული შედეგები მოდელირების II ვარიანტისთვის

გრაფიკულად ეს დამოკიდებულებები ნაჩვენებია ნახ. 18-სა და ნახ. 19-ზე.



ნახ. 18 მექანიკური სიმძლავრის ნაზრდის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე

ნახ. 19 მუდმივი დენის ჩანართზე შემცირებული სიმძლავრის დამოკიდებულება ინერციის მუდმივაზე

3.2 საგ-ების და მუდმივი დენის ჩანართის რეგულატორების ერთობლივი მოქმედება

საქართველოს ელექტროსისტემაში საგ-ებმა უნდა გამორთონ დატვირთვის დაახლოებით 60%. ცხრ. 7-ში მოყვანილია საგ-ების ტიპური დანაყენების სიდიდეები.

f	50	49,2	49	48.7	48.6	48.4	48.2	48	47.8	47.6	47.4	47.2
P_{load*}	1	0.98	0.96	0.87	0.8	0.75	0.6	0.55	0.53	0.5	0.45	0.4

ცხრ. 7 სიხშირის შესაბამისი საგ-ების ქმედება საქართველოს სისტემაში

სიხშირის მაგივრად ავიღოთ მისი პროპორციული სიდიდე სრიალი:

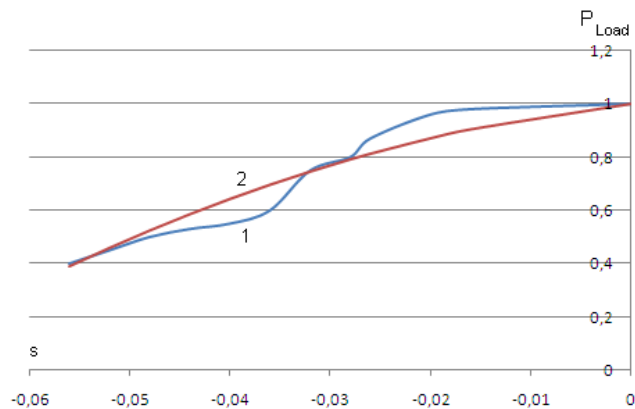
$$s = \frac{f - f_0}{f_0}$$

მივიღებთ:

s	P_{load*}	$P_{load*} = f(s)$
0	1	1
-0,016	0,98	0,9045376
-0,02	0,96	0,87084
-0,026	0,87	0,8129196
-0,028	0,8	0,7916464
-0,032	0,75	0,7461504
-0,036	0,6	0,6967216
-0,04	0,55	0,64336
-0,044	0,53	0,5860656
-0,048	0,5	0,5248384
-0,052	0,45	0,4596784
-0,056	0,4	0,3905856

ცხრ. 8 სრიალის შესაბამისი საგ-ების ემედება საქართველოს სისტემაში

შესაბამისი მრული 1 ნაჩვენებია ნახ. 20-ზე.



ნახ. 20 საგ-ების მოქმედება საქართველოში

საგ-ების მოქმედებით დატვირთვის ცვლილების მრული კარგად აპროქსიმირდება პოლინომით, რომელიც გრაფიკულად ნაჩვენებია ნახ. 19-ზე მრული 2-ით:

$$P_{Load} = -122,9 * s^2 + 4 * s + 1$$

მაშასადამე სისტემის იძულებითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას შეიძლება მივცეთ შემდეგი სახე:

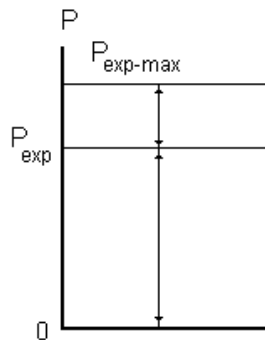
$$T_j \frac{ds}{dt} = \frac{P_{go} + (P_{max} - P_{go})e^{\frac{-t}{T_R}}}{1 + s} - P_{LOAD} - P_{exp.} + P_{imp} - K_1 s - K_2 \frac{ds}{dt}$$

ანუ

$$(T_j + K_2) \frac{ds}{dt} = \frac{P_{go} + (P_{max} - P_{go})e^{\frac{-t}{T_R}}}{1 + s} - P_{LOAD_o} \cdot (-122,9 * s^2 + 4 * s + 1) - P_{exp.} + P_{imp} - K_1 s \quad (14)$$

$$\text{და} \quad -P_{exp} < K_1 s + K_2 \frac{ds}{dt} < P_{exp-max} - P_{exp} \quad (15)$$

ე.ი. ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება მოხდება ნახ. 21-ზე ნაჩვენებ ფარგლებში.



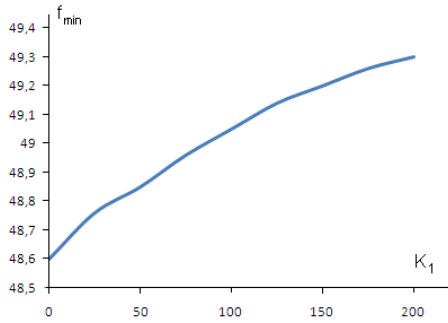
ნახ. 21 ჩანართის აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ფარგლები

(14) და (15) ფორმულების გათვალისწინებით ჩავატარეთ გარდამავალი პროცესის მოდელირება ჩანართის სიმძლავრის სიხშირით რეგულირებისათვის. მოდელირებისას მიღებული იყო:

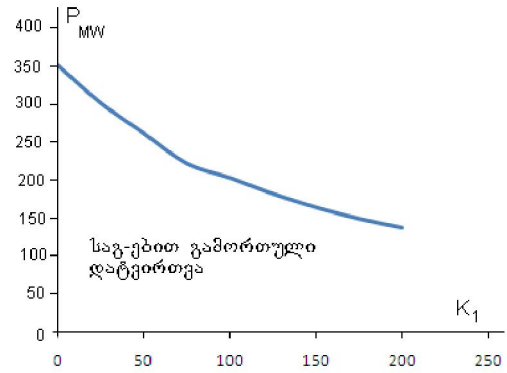
$$P_{gen_o} = 17.37 \text{ ფე}; P_{Load_o} = 17.37 \text{ ფე}; P_{exp} = 5 \text{ ფე}; P_{imp} = 5 \text{ ფე}; P_{max} = 20 \text{ ფე};$$

$$T_j = 270 \text{ წმ}; K_2 = 0.$$

შეშვოთებად აღებული იყო იმპორტის გამოროვა. ჩანართის რეგულატორისათვის იცვლებოდა მისი K_1 გაძლიერების კოეფიციენტი 25-დან 200 ფე-მდე. მიღებული რეზულტატები მოყვანილია შემდეგ ნახაზებზე. ნახ. 22-ზე მოყვანილია 500 მგვტ-იანი დეფიციტით გამოწვეული სიხშირის მინიმალური მნიშვნელობები.

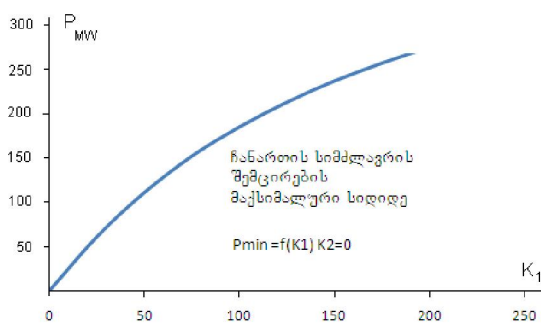


ნახ. 22 სიხშირის მინიმუმი $K_1 = 25 \div 200$ -ის შემთხვევებში



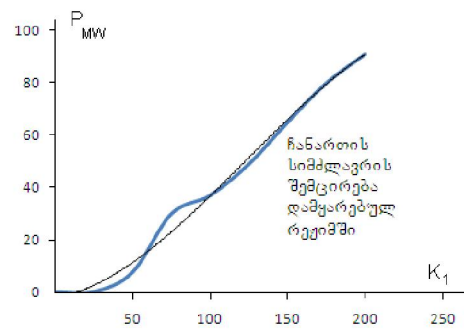
ნახ. 23 საგ-ებით გამოროული დატვირთვა $K_1 = 25 \div 200$ -ის დროს

ნახ. 24-ზე მოცემულია მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის შემცირების მაქსიმუმები, რომლებსაც ადგილი ჰქონდა ჩანართის გაძლიერების კოეფიციენტის ცვლილებისას 25-დან 200-მდე; აქ საუბარია მხოლოდ სიხშირის მიხედვით რეგულირების კოეფიციენტზე (K_1). სიხშირის წარმოებულის მიხედვით გაძლიერების კოეფიციენტი K_2 აღებულია ნულის

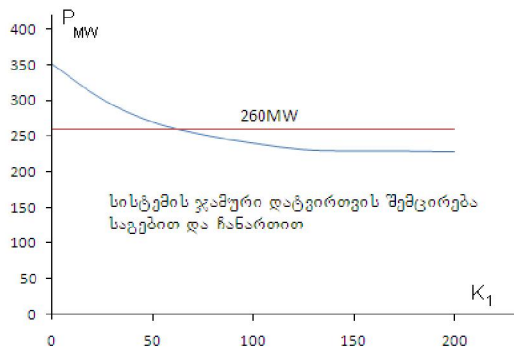


ტოლად.

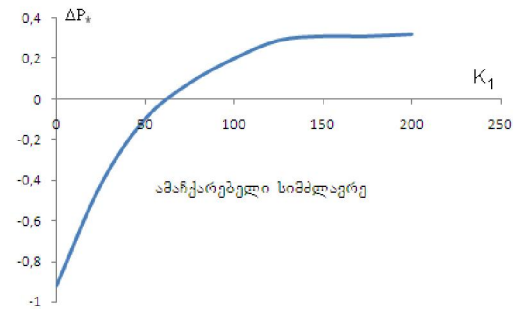
ნახ. 24 ჩანართის სიმძლავრის შემცირების მაქსიმუმები $K_1 = 25 \div 200$ -სთვის



ნახ. 25 ჩანართის სიმძლავრის შემცირება დამყარებულ რეჟიმში $K_1 = 25 \div 200$ -სთვის



ნახ. 26 სისტემის დატვირთვის ჯამური შემცირება $K_1 = 25 \div 200$ –სთვის



ნახ. 27 სისტემის ამაჩქარებელი სიმძლავრე $K_1 = 25 \div 200$ –სთვის

მიღებული რეზულტატებიდან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ოპტიმალურია:

$$K_1 = 100 \div 150$$

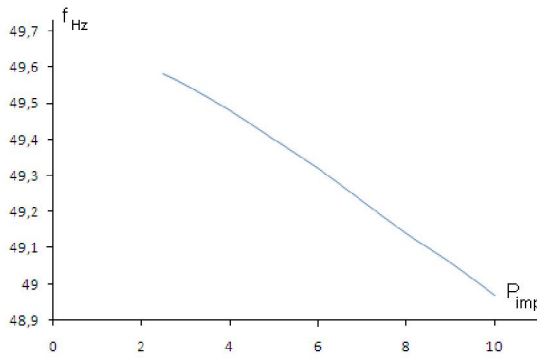
ამ შემთხვევაში 500 მგვტ დეფიციტის წარმოქმნისას გვექნება:

გარდამავალ პროცესში სიხშირე შემცირდება 49,2-49,26 ჰერცამდე; საგ-ები გამორთავენ 164-149 მგვტ-ს; ჩანართი შეამცირებს სიმძლავრეს 237-257 მგვტ-ით და დროის გასვლის შემდეგ დაამყარებს სიმძლავრეს 435-420 მგვტ-ს დონეზე; მაშასადამე სისტემის ჯამური დატვირთვა იქნება $P_{Load\Sigma} = 1737 - 164 + 435 = 2008 MW$. ეს პრაქტიკულად ტოლია $P_{max} = 20$ ფე ანუ სისტემის გენერაციის მაქსიმუმს 2000 მგვტ-ს. ვნახოთ, თუ რა გავლენა აქვს ჩანართის რეგულირებას სიხშირის წარმოებულთ. თუ ავიღებთ $K_2 = 900000$, მაშინ გარდამავალ პროცესში სიხშირე შემცირდება 49,08 ჰერცამდე; საგ-ები გამორთავენ 200 მგვტ-ს; ჩანართი შეამცირებს სიმძლავრეს 457 მგვტ-ით და დროის გასვლის შემდეგ დაამყარებს სიმძლავრეს 500 მგვტ-ს დონეზე; მაშასადამე სისტემის ჯამური დატვირთვა იქნება $P_{Load\Sigma} = 1737 - 200 + 500 = 2037 MW$. სისტემის გენერაცია მიაღწევს თავის მაქსიმუმს 2000 მგვტ-ს და სისტემაში დამყარდება 49,1 ჰერცის ტოლი სიხშირე. თუკი რეგულირება მოხდება სიხშირით და მისი წარმოებულთ ერთდროულად, და $K_1 = 175$, $K_2 =$

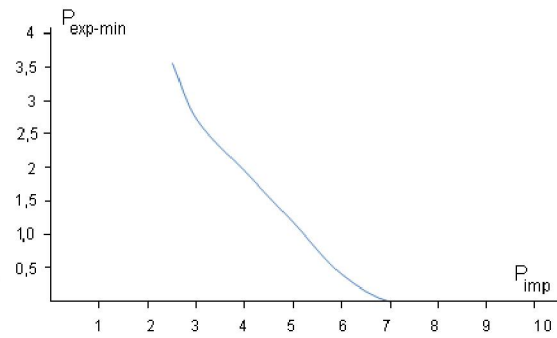
900000, მაშინ გვექნება: სიხშირე შემცირდება 49,5 ჰერცამდე; საგ-ები გამორთავენ 87 მგვტ-ს; ჩანართი შეამცირებს სიმძლავრეს 457 მგვტ-ით და დროის გასვლის შემდეგ დაამყარებს სიმძლავრეს 370 მგვტ-ს ღონებზე; მაშასადამე სისტემის ჯამური დატვირთვა იქნება $P_{Load\Sigma} = 1737 - 100 + 370 = 2007 MW$. სისტემის გენერაცია მიაღწევს თავის მაქსიმუმს 2000 მგვტ-ს და სისტემაში დამყარდება 49,6 ჰერცის ტოლი სიხშირე. მაშინ სიხშირე შემცირდება 49,4 ჰერცამდე; საგ-ები გამორთავენ 114 მგვტ-ს; ჩანართი შეამცირებს სიმძლავრეს 383 მგვტ-ით და დროის გასვლის შემდეგ დაამყარებს სიმძლავრეს 390 მგვტ-ს ღონებზე; მაშასადამე სისტემის ჯამური დატვირთვა იქნება $P_{Load\Sigma} = 1737 - 114 + 390 = 2013 MW$. სისტემის გენერაცია მიაღწევს თავის მაქსიმუმს 2000 მგვტ-ს და სისტემაში დამადასხვა ყარდება 49,68 ჰერცის ტოლი სიხშირე.

შევისწავლოთ, თუ როგორ წარიმართება გარდამავალი პროცესი ენერჯის იმპორტის შეწყვეტისას და რა რეჟიმი დამყარდება ექსპორტის, გენერაციის შემადგენლობის, სისტემის გენერაციის მაქსიმუმის და დატვირთვის სიდიდის მუდმივობისას იმპორტის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს.

სისტემის ზემოთაღწერილი გამართივებული 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, ნახ. 28. ჩანართის რეგულატორის გავლენით, ჩანართის სიმძლავრე დროებით მცირდება, 700 მგვტ-ის ტოლი იმპორტის დროს გარდამავალ პროცესში ეს სიმძლავრე მცირდება ნულამდე, ნახ. 29.

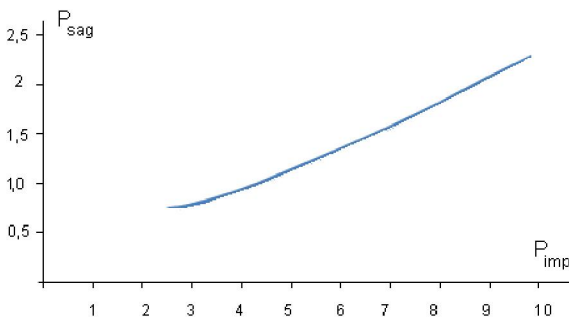


ნახ. 28 სიხშირე საქართველოში სხვადასხვა სიდიდის იმპორტის (უბალანსობის) შემთხვევაში

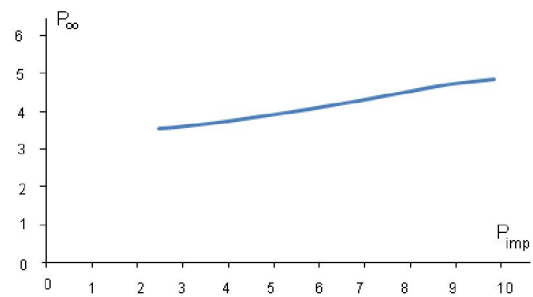


ნახ. 29 ჩანართის სიმძლავრე გარდამავალ პროცესში სხვადასხვა სიდიდის იმპორტის (უბალანსობის) შემთხვევაში

გარდამავალი პროცესის განმავლობაში საგ-ები გამორთავენ ტვირთის ნაწილს (ნახ. 30) და ჩანართის რეგულატორი შეამცირებს მის სიმძლავრეს ახალ დამყარებულ რეჟიმში, ნახ. 31.



ნახ. 30 საგ-ებით გამორთული დატვირთვა საქართველოში



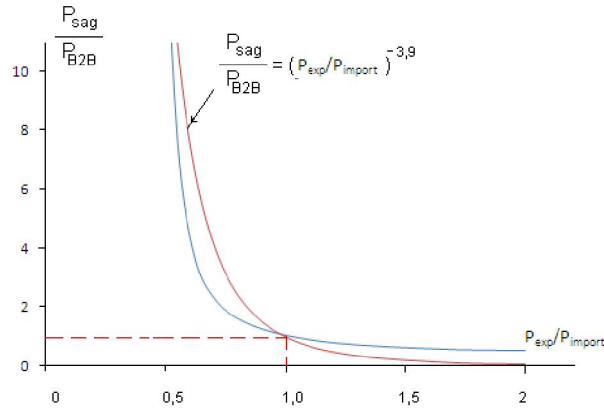
ნახ. 31 ჩანართის სიმძლავრე

მიღებული რეზულტატები საშუალებას გვაძლევენ ვიპოვოთ, თუ რა დამოკიდებულებაა საგ-ებით გამორთული დატვირთვის ჯამური სიდიდის ფარდობას ჩანართის სიმძლავრის შემცირებასთან და ექსპორტ/იმპორტის სიმძლავრეთა თანაფარდობას შორის:

$$\frac{P_{sag}}{P_{B2B}} = f\left(\frac{P_{exp}}{P_{imp}}\right), \text{ ნახ. 32. ამ}$$

მრუდიდან ჩანს - თუ იმპორტირებული სიმძლავრე ტოლია

ექსპორტირებულის, მაშინ იმპორტის ავარიული გამორთვისას საგ-ებით გამორთული მომხმარებლების ჯამური სიმძლავრე დაახლოებით ტოლი იქნება ჩანართის სიმძლავრის შემცირებისა.



ნახ. 32 P_{sag}/P_{B2B} თანაფარდობის დამოკიდებულება P_{exp}/P_{imp} თანაფარდობასთან

დასკვნა:

- ❖ საგ-ების და ჩანართის რეგულატორის ერთობრივი მოქმედება ძალიან ეფექტურია. სიხშირის შემცირება მინიმალურია.
- ❖ ჩანართის რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტების შერჩევით შესაძლებელია შევირჩიოთ ჩვენთვის სასურველი თანაფარდობა საგ-ებით გამორთულ სიმძლავრესა და ჩანართის სიმძლავრის შემცირებას შორის.
- ❖ ეს თანაფარდობა შეიძლება გამოვსახოთ ემპირიული ფორმულით:

$$\frac{P_{freq}}{P_{B2B}} = \left(\frac{P_{exp}}{P_{imp}} \right)^{-3,9} \quad (16)$$

- ❖ ერთი და იგივე პირობებში, ექსპორტირებულის სიმძლავრის იმპორტირებულ სიმძლავრესთან თანაფარდობის შეცვლა ცვლის თანაფარდობას საგ-ებით გამორთულ და ჩანართით შემცირებულ სიმძლავრეებს შორის.

თავი 4

ენერგოსისტემის სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ალგორითმის დამუშავება

4.1 სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ალგორითმის შემუშავების მიზანი

საქართველოს ელექტრული სისტემის სწრაფი განვითარება, კერძოდ მაღალი ძაბვის ქსელის მნიშვნელოვანი გაძლიერება და ახალი ჰიდროელექტრული სადგურების მშენებლობა ზრდის ელექტრული სისტემის სატრანზიტო და საექსპორტო შესაძლებლობებს. მეზობელ სისტემებთან (რუსეთი, აზერბაიჯანი) ოპერირება ხდება პარალელურ, სინქრონულ რეჟიმში, ხოლო თურქეთთან და სომხეთთან მოხდება ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართების საშუალებით. ახალციხის 500 კვ ძაბვის ქვესადგურში ეწყობა 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.

ამრიგად იქმნება 1000–1400 მგვტ სიმძლავრის ტრანზიტი საქართველოს გავლით. სიმძლავრის ასეთი დიდი ნაკადები ქმნიან საქართველოს სისტემისათვის გარკვეულ პრობლემებს დინამიური მდგრადობის შენარჩუნების თვალსაზრისით. მუდმივი დენის ჩანართის, ან რომელიმე 500 კვ-იანი სისტემათაშორისი ხაზის 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.

ანალიზის საწყის ეტაპზე განვიხილეთ შემთხვევა, როდესაც უბალანსობის აღმოსაფხვრელად საჭიროა როგორც მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირება, ასევე სასისტემო ავტომატიკის გამოყენება. კერძოდ, შემთვობად აღებულ იქნა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის ავარიული გამორთვა. წარმოქმნილ უბალანსობას თავის თავზე იღებს მარნეულსა (საქართველო) და რაზდანს (სომხეთი) შორის არსებული მუდმივი დენის ჩანართი და სასისტემო ავტომატიკა საქართველოში.

4.2 ახალციხის ჩანართის ავარიული გამორთვა საქართველოსა და სომხეთის სისტემების ასინქრონული კავშირის შემთხვევაში

ანალიზისთვის შერჩეულ იქნა საქართველო-თურქეთი-სომხეთის გაერთიანებული სისტემის 2020 წლის პერსპექტიული რეჟიმები, სადაც საქართველოს სისტემა დაკავშირებულია ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართებით თურქეთსა და სომხეთთან. გამოყენებულ იქნა ელექტრული სისტემის საინჟინრო მოდელირების პროგრამა PSS/E.

მოდელირების სცენარი: სამთაბა მშ ახალციხის ფიქტიურ 500 კვ-იან გადამცემ ხაზზე; 0,12 წმ-ში მშ-ის მოხსნა და დაზიანებული ხაზის გამორთვა, რაც ნიშნავს ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გამორთვას; 0,3 წმ-ში სასისტემო ავტომატიკით საქართველოში გენერატორების გამორთვა.

გაზაფხულის მაქსიმუმი

რეჟიმის პარამეტრები მოყვანილია ცხრილ 9-ში.

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	იმპორტი სომხეთიდან, მგვტ
2850	1870	1280	350

ცხრ. 9 საქართველოს სისტემის გაზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები

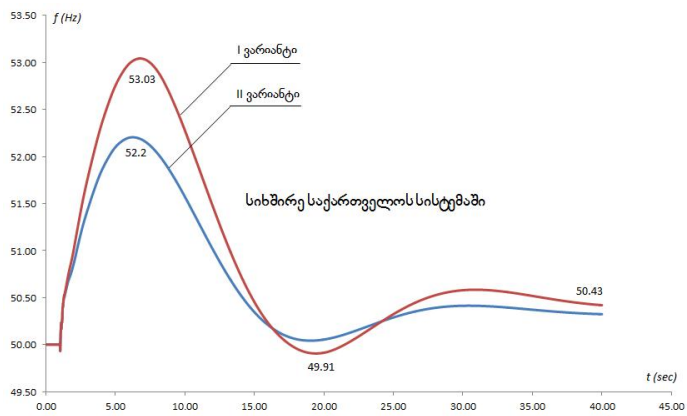
თურქეთში გადის 1050 მგვტ ახალციხიდან და 230 მგვტ ბათუმიდან. რაზდანის ქ/ს-დან (სომხეთი) მარნეულში შემოდის 350 მგვტ. ანალიზი ჩატარდა პროგრამა PSS/E-ს საშუალებით. თურქეთისა და სომხეთის სისტემები წარმოდგენილია ეკვივალენტების სახით. მთავარი ამოცანა იყო სიხშირის შენარჩუნება 51.5 ჰც-ზე ქვემოთ ავარიულ რეჟიმში, რის შედეგადაც სიხშირისგან დაცვები აღარ გამორთავენ საქართველოს გენერატორებს.

ამისთვის აუცილებელია ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გამორთვის შემდეგ გავატაროთ დროული ღონისძიებები, იქნება ეს საქართველოში სასისტემო ავტომატიკით გენერაციის გარკვეული ნაწილის გამორთვა, მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება თუ ორივე საშუალების ერთდროულად გამოყენება. მოცემულ რეჟიმში ახალციხის ჩანართში გადის 1050 მგვტ და შესაბამისად მისი გამორთვის შემდეგ სიხშირის შენარჩუნება მხოლოდ მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირებით ვერ მოხერხდება. საჭიროა გარდამავალ რეჟიმში გამოვრთოთ გენერატორების გარკვეული რაოდენობა საქართველოში სიმძლავრის ბალანსის აღსადგენად. განხილულ იქნა სასისტემო ავტომატიკის სამი ვარიანტი, რომლებიც ნაჩვენებია ცხრილ 10-ში. განსხვავება მათ შორის არის გამორთული გენერაციის სიდიდეში.

გამორთული გენერატორის დასახელება / კვანძის ნომერი	გენერაცია, მგვტ	სასისტემო ავტომატიკის ვარიანტი		
		I	II	III
ხულონი გ2/ 21302	110	×	×	×
ენგური გ3 / 21103	180	×	×	×
ვარციხე1 გ2 / 22204	20	×	×	×
ალჰანა გ1 / 21402	23		×	×
ვარდნილი გ2 / 21602	45		×	×
ჟინვალი გ2 / 24701	20		×	×
ნენსკრა გ1 / 27201	100		×	×
ვარდნილი გ1 / 21601	45			×
ხრამი2 გ2 / 25302	40			×
ენგური გ2 / 21102	170			×
ჭოროხი გ1 / 26901	18			×

ცხრ. 10 გაზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია

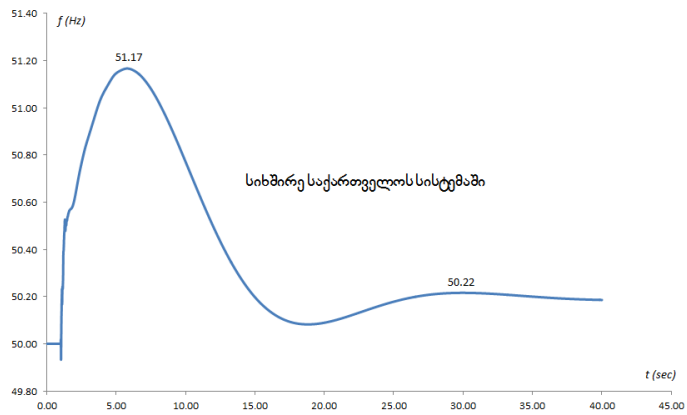
მოცემულ ცხრილში გენერატორების გასწვრივ „X“ ნიშანი აღნიშნავს შესაბამისი გენერატორის გამორთვას სასისტემო ავტომატიკის კონკრეტული ვარიანტის შემთხვევაში. მიღებული შედეგები სასისტემო ავტომატიკის I და II ვარიანტებისთვის ნაჩვენებია ნახ. 33-ზე. საქართველოს სიხშირის მაქსიმალურ სიდიდეებს შორის განსხვავება შეიმჩნევა მოცემული სცენარებისთვის, თუმცა ისინი ვერ უზრუნველყოფენ სიხშირის სასურველ სიდიდეს (51.5 ჰც) და შესაბამისად გენერატორების გარკვეულ რაოდენობას სიხშირისგან დაცვები მაინც გამორთავენ.



ნახ. 33 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

მოდელირების I და II ვარიანტისთვის

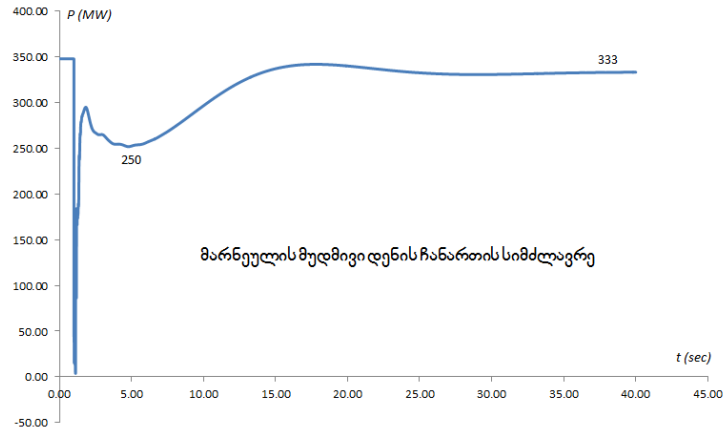
მიღებული შედეგები III ვარიანტისთვის ნაჩვენებია ნახ. 34 და 35-ზე.



ნახ. 34 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

მოდელირების III ვარიანტისთვის

როგორც ნახ. 35-დან ჩანს, გარდამავალ პროცესში მარნეული-რაზღანის მუდმივი დენის ჩანართი იბლოკება, მშ-ის და დაზიანებული ხაზის გამორთვის შემდეგ კი აღვდება მისი ნორმალური მუშაობა.



ნახ. 35 სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზღანის ჩანართზე

ამის შემდეგ, 0,18 წამში ხდება სასისტემო ავტომატიკით საქართველოში 771 მგვტ გენერაციის გამორთვა. თუმცა ამ ეტაპზე სიხშირე ნომინალურ სიდიდეს აღემატება, რადგანაც საქართველოში არის აქტიური სიმძლავრის ნაჭარბი, რომელიც დაახლოებით $1050 - 771 = 279$ მგვტ-ია. შედეგად მარნეული-რაზღანის ჩანართის რეგულატორი ამცირებს მასში გამავალ აქტიურ სიმძლავრეს, რომელიც საქართველოსთვის წარმოადგენს დამატებით გენერაციას. ამასთანავე, გარდამავალი პროცესის დაწყებიდან დაახლოებით 3-4 წამში სიჩქარის რეგულატორებს მოქმედებაში მოჰყავთ საქართველოს სისტემაში არსებული მბრუნავი რეზერვი. როგორც ნახ. 34-დან ჩანს, III ვარიანტის მიხედვით საქართველოში გენერაციის შემცირება 770 მგვტ-ით უზრუნველყოფს სიხშირის შენარჩუნებას 51.5 ჰც-ზე ქვემოთ. ნორმალური რეჟიმი მყარდება დაახლოებით 25 წმ-ში.

გაზაფხულის მინიმუმი

რეჟიმის პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილ 11-ში.

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	ექსპორტი სომხეთში, მგვტ
2631	1231	1200	160

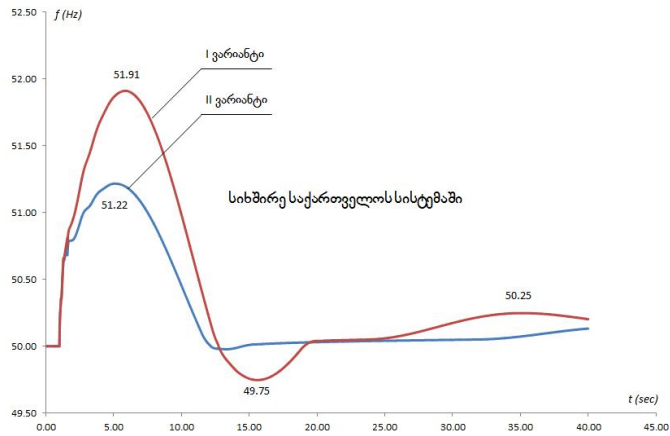
ცხრ. 11 საქართველოს სისტემის გაზაფხულის მინიმუმის რეჟიმის პარამეტრები

გამოყენებული სასისტემო ავტომატიკის ვარიანტები ნაჩვენებია ცხრილ 12-ში.

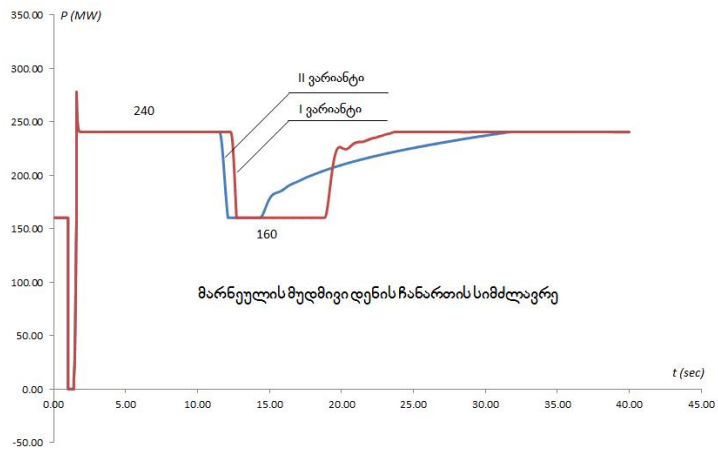
გამორთული გენერატორის დასახელება / კვანძის ნომერი	გენერაცია, მგვტ	სასისტემო ავტომატიკის ვარიანტი	
		I	II
ხულონი გ1/ 21301	160	×	×
ენგური გ3 / 21103	150	×	×
ენგური გ4 / 21104	150	×	×
ვარციხე1 გ2 / 22204	20	×	×
ვარციხე2 გ2 / 22201	20		×
ტვიში გ2 / 22502	44		×
ფარავანი გ2 / 25802	40	×	×
ზომლეთი გ3 / 26501	10		×
აჭარისწყალი1 გ2 / 27301	6		×
ნამახვანი გ2 / 22602	90		×
ალპანა გ3 / 21403	23		×

ცხრ. 12 გაზაფხულის მინიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია

სასისტემო ავტომატიკის I და II ვარიანტების მიხედვით სასისტემო ავტომატიკით საქართველოს სისტემაში ჯამში გამოირთო შესაბამისად 650 მგვტ და 758 მგვტ. მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 36 და 37-ზე. როგორც ვხედავთ, გარდამავალ პროცესში 758 მგვტ გენერაციის გამორთვა უზრუნველყოფს სიხშირის შენარჩუნებას 51.5 ჰც-ზე ქვემოთ. ბუნებრივია ამ შემთხვევაშიც სიჩქარის რეგულატორებსა და მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის რეგულირებას გარკვეული წვლილი შეაქვთ სიმძლავრის ბალანსის აღდგენაში.



ნახ. 36 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში



ნახ. 37 სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე

თუმცა, წარმოქმნილი უბალანსობის სიდიდიდან გამომდინარე, მთავარ როლს სასისტემო ავტომატიკით გენერატორების გამორთვა თამაშობს.

ზატეხულის მაქსიმუმი

რეჟიმის პარამეტრები მოცემულია ცხრილ 13-ში.

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	ექსპორტი სომხეთში, მგვტ
2952	1704	1000	200

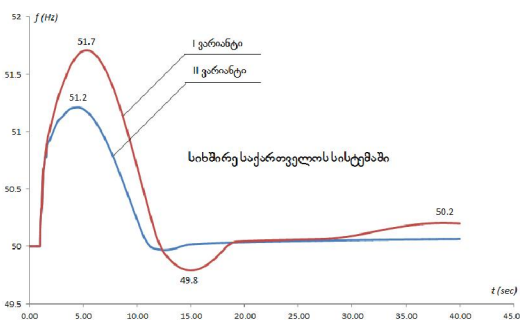
ცხრ. 13 საქართველოს სისტემის ზატეხულის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები

თურქეთში გადის 800 მგვტ ახალციხიდან და 200 მგვტ ბათუმიდან. სასისტემო ავტომატიკის გამოყენებული ვარიანტები ნაჩვენებია ცხრილ 14-ში.

გამორთული გენერატორის დასახელება / კვანძის ნომერი	გენერაცია, მგვტ	სასისტემო ავტომატიკის ვარიანტი	
		I	II
ენგური გ3 / 21103	220	×	×
ხუდონი გ2 / 21302	200	×	×
ნამახვანი გ2 / 22602	70		×
ტვიში გ2 / 22502	41		×

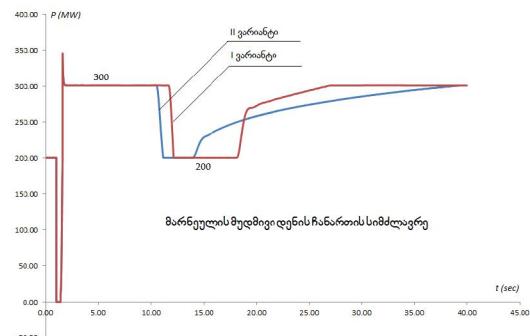
ცხრ. 14 ზაფხულის მაქსიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია

სასისტემო ავტომატიკის I და II ვარიანტების მიხედვით სასისტემო ავტომატიკით საქართველოს სისტემაში ჯამში გამოირთო შესაბამისად 420 მგვტ და 531 მგვტ. მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 38 და 39-ზე.



ნახ. 38 სიხშირის ცვლილება

საქართველოს სისტემაში



ნახ. 39 სიმძლავრის გადაღინება

მარნეული-რაზდანის ჩანართზე

როგორც ცნობილია, გარდამავალი პროცესის საწყის ეტაპზე ძირითად როლს მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება თამაშობს. სომხეთის სისტემაში მარნეული-რაზდანის ჩანართით გადაცემული სიმძლავრის ნაზრდი გარდამავალ პროცესის საწყის ეტაპზე დაახლოებით 100 მგვტ-ია (ნახ. 39), 531 მგვტ გამოირთო სასისტემო ავტომატიკით, დანარჩენი დეფიციტი კი, დაახლოებით 170 მგვტ დაიფარა მბრუნავი რეზერვის მეშვეობით.

ზაფხულის მინიმუმი

რეჟიმის პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილ 15-ში.

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	ექსპორტი სომხეთში, მგვტ
2725	1190	1200	290

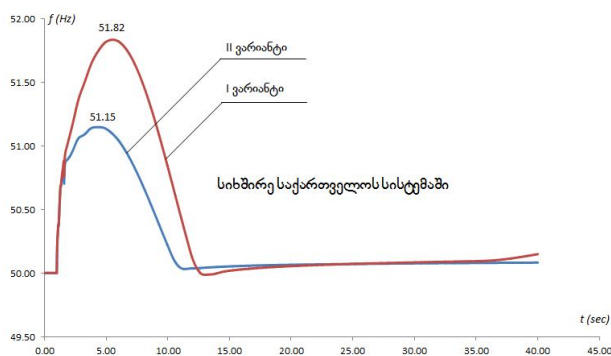
ცხრ. 15 საქართველოს სისტემის ზაფხულის მინიმუმის რეჟიმის პარამეტრები

თურქეთში გადის 1000 მგვტ ახალციხიდან და 200 მგვტ ბათუმიდან. სასისტემო ავტომატიკის გამოყენებული ვარიანტები ნაჩვენებია ცხრილ 16-ში.

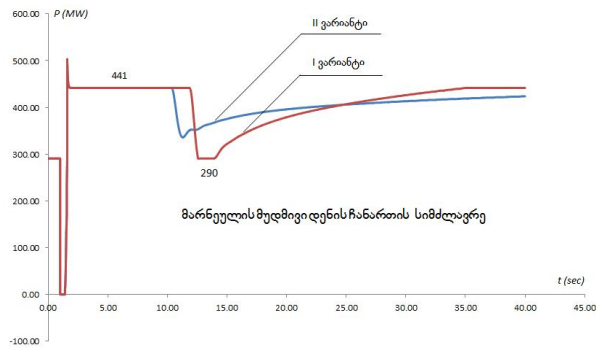
გამორთული გენერატორის დასახელება / კვანძის ნომერი	გენერაცია, მგვტ	სასისტემო ავტომატიკის ვარიანტი	
		I	II
ენგური გ3 / 21103	150	×	×
ენგური გ4 / 21104	150	×	×
ხულონი გ1 / 21301	145	×	×
ნამახვანი გ2 / 22602	88		×
ტვიში გ2 / 22502	41	×	×
სადმელი გ1 / 23601	47	×	×
ფარავანი გ2 / 25802	40		×
უონეთი გ2 / 22702	45	×	×

ცხრ. 16 ზაფხულის მინიმუმის რეჟიმში გამორთული გენერაცია

მოდელირების შედეგები მახასიათებლების სახით ნაჩვენებია ნახ. 40 და 41-ზე.



ნახ. 40 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში



ნახ. 41 სიმძლავრის გადაღინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე

პირველი სცენარით გამოირთო 582 მგვტ გენერაცია, მეორეთი - 710 მგვტ. გარდამავალ პროცესში რეგულატორის ზეგავლენით მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართში გამავალი სიმძლავრე გაიზარდა დაახლოებით 140 მგვტ-ით, ხოლო ბრუნავი რეზერვის მიერ დაიფარა დაახლოებით 1000 – (710 + 140) = 150 მგვტ.

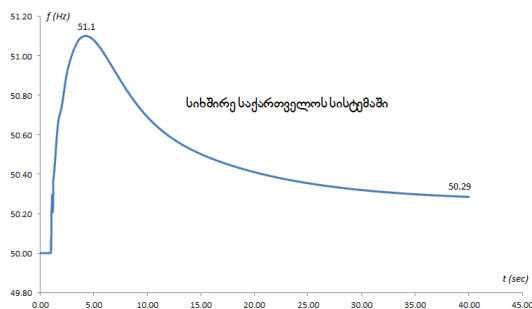
ზამთრის მაქსიმუმი

რეჟიმის პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილ 17-ში

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	იმპორტი სომხეთიდან, მგვტ
2600	2165	700	300

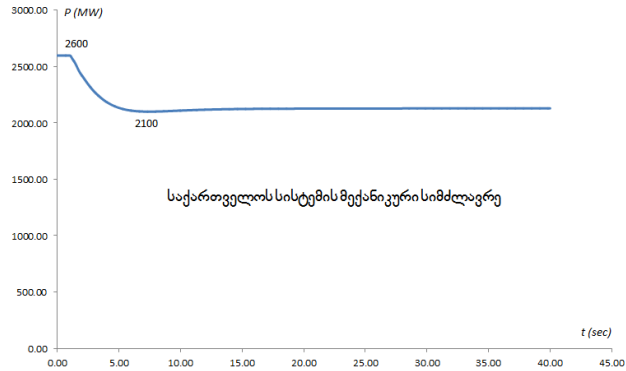
ცხრ. 17 საქართველოს სისტემის ზამთრის მაქსიმუმის რეჟიმის პარამეტრები

თურქეთში გადის 500 მგვტ ახალციხიდან და 200 მგვტ ბათუმიდან. მოდელირების შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 42-სა და 43-ზე.



ნახ. 42 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გამორთვით შექმნილ უბალანსობას (500 მგვტ) თავის თავზე მთლიანად სიჩქარის რეგულატორები იღებენ (ნახ. 43). ნორმალური რეჟიმი მყარდება დაახლოებით 20 წამში.



ნახ. 43 საქართველოს სისტემის მექანიკური სიმძლავრე

მოდელირება ჩატარებულ იქნა ზამთრის მაქსიმუმის ალტერნატიული ვარიანტისთვის, სადაც ნულოვანი გადადინებაა საქართველოსა და სომხეთის სისტემებს შორის. მიღებული შედეგები პრაქტიკულად იდენტურია ნახ. 42-სა და 43-ზე ნაჩვენები შედეგების. შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ამ რეჟიმში მთლიანად მბრუნავი რეზერვის ხარჯზე ხდება ბალანსის აღდგენა. მოდელირებიდან მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ცხრილ 18-ში.

რეჟიმი	არსებული რეზერვი, მგვტ	ნარმოქმნილი უბალანსობა, მგვტ	მარნეული-რამბლანის ჩანართზე სიმძლავრის ნაზრდი, მგვტ	საქართველოში გამართული გენერაცია, მგვტ
გაზაფხულის მაქსიმუმი	988	1050	-100	771
გაზაფხულის მინიმუმი	967	1000	80	758
ზაფხულის მაქსიმუმი	748	800	100	531
ზაფხულის მინიმუმი	1053	1000	140	706
ზამთრის მაქსიმუმი	1068	500	0	500

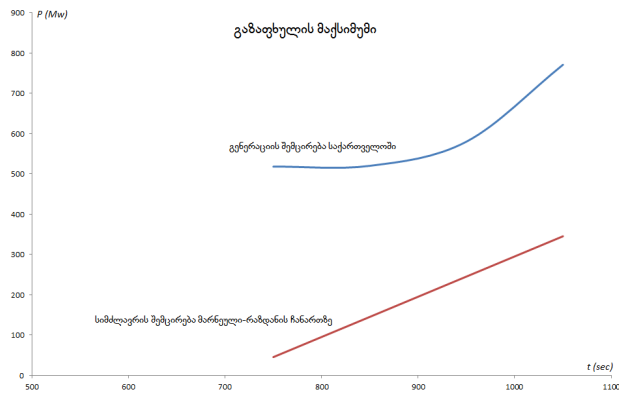
ცხრ. 18 გამართული გენერაცია განსხვავებული რეჟიმების შემთხვევაში

დასკვნა:

საქართველოს ელექტროსისტემაში ახალციხე-ბორჩხას მუდმივი დენის ჩანართის ავარიულად გამორთვის შემთხვევაში წარმოქმნილი უბალანსობის აღმოფხვრა შესაძლებელია რამოდენიმე საშუალებით, მათ შორის შედარებით ეფექტურია საქართველოსა და სომხეთის სისტემების დამაკავშირებელი მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის რეგულირება. ამ ხერხის დადებითი მხარეა მისი მყისიერი, დროის დაყოვნების გარეშე მოქმედება. თუმცა როგორც სხვა ხერხებთან, აქაც არსებობს გარკვეული შეზღუდვა - გარდამავალ პროცესში სიმძლავრის ნაზრდი სასურველია არ აღემატებოდეს 50%-ს. ხოლო რაც შეეხება მბრუნავი რეზერვის ამოქმედებას და სასისტემოს ავტომატიკის გამოყენებას საქართველოში გენერაციის შესამცირებლად, მათი წილი უბალანსობის აღმოფხვრაში განპირობებულია წარმოქმნილი უბალანსობის სიდიდით.

4.3 ახალციხის ჩანართის ავარიული გამორთვა საქართველოს სისტემის ექსპორტ/იმპორტის განსხვავებული სიდიდეების შემთხვევაში

ანალიზისთვის აღებულ იქნა 2020 წლის გაზაფხულის რეჟიმი, სადაც საქართველოს რეჟიმის და გენერაციის შემადგენლობის მუდმივობის პირობებში ვცვალებთ ექსპორტი თურქეთში და შესაბამისად იმპორტი სომხეთიდან. მოდელირების სცენარი იდენტურია ზემოთ ჩატარებული ანალიზის - 1) სამუაზა მშ ახალციხეში, 2) მშ-ის დაზიანებული ხაზის გამორთვა, რაც წარმოქმნის სიმძლავრის ნაჭარბს საქართველოს სისტემაში, 3) სასისტემო ავტომატიკით საქართველოში გენერატორების გამორთვა. ნახ. 44-ზე ნაჩვენებია საქართველოს გამორთული გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება წარმოქმნილ სიმძლავრის ნაჭარბზე.



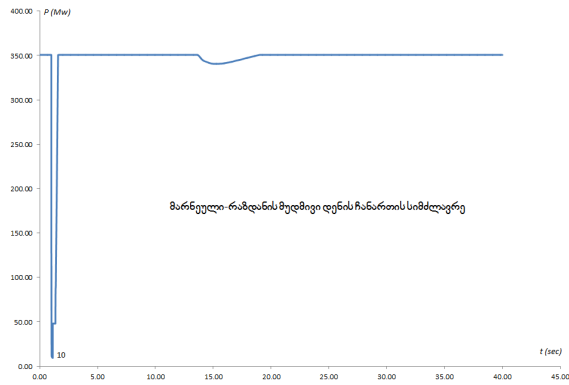
**ნახ. 44 გამოსართავი გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება
წარმოქმნილ ნაჭარბზე**

გაკეთდა გარდამავალ პროცესში მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართში სიმძლავრის ნაზრდი ზეგავლენის ანალიზი სომხეთის სისტემაზე.. გაანგარიშებებისთვის აღებულ იქნა 2020 წლის გაზაფხულის პერსპექტიული რეჟიმი, სადაც საქართველო ასინქრონულად მუშაობს სომხეთის სისტემასთან და თურქეთის სისტემის ეკვივალენტთან. რეჟიმის პარამეტრების მოცემულია ცხრილ 19-ში.

საქართველოს ჯამური გენერაცია, მგვტ	2850
საქართველოს ჯამური დატვირთვა, მგვტ	1871
ექსპორტი თურქეთში, მგვტ	1280
იმპორტი სომხეთიდან, მგვტ	350
სომხეთის ჯამური გენერაცია, მგვტ	2115
სომხეთის ჯამური დატვირთვა, მგვტ	1017

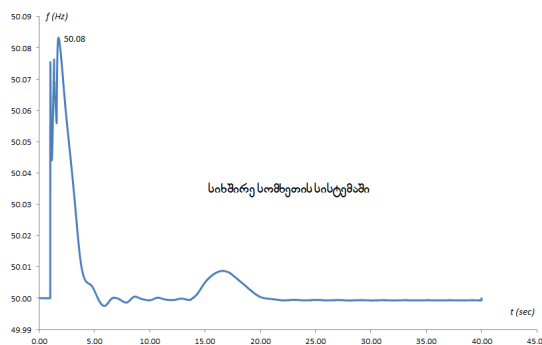
**ცხრ. 19 ანალიზისათვის შერჩეული 2020 წლის გაზაფხულის
პერსპექტიული რეჟიმის პარამეტრები**

მარნეული-რაზდანის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრე ნაჩვენებია ნახ. 45-ზე



ნახ. 45 სიმძლავრის გადადინება მარნეული-რაზდანის ჩანართზე

სიხშირის ცვლილება სომხეთის სისტემაში ნაჩვენებია ნახ. 46-ზე.



ნახ. 46 სიხშირის ცვლილება სომხეთის სისტემაში

როგორც ვხედავთ, სომხეთის სისტემისთვის დაახლოებით 340 მგვტ სიმძლავრის ნაჭარბი აღნიშნულ რეჟიმში პრობლემას არ წარმოადგენს. სისტემის გენერაცია 2115 მგვტ, 340 მგვტ დაახლოებით მისი 16%, რაც სიჩქარის რეგულატორებმა მთლიანად თავის თავზე აიღეს. სიხშირის ცვლილება გარდამავალ პროცესში უმნიშვნელოა (0.08 ჰც).

4.4 ჩანართის რეგულირების კოეფიციენტების სიდიდის

დადგენა PSS/E პროგრამაში გარდამავალი

პროცესების მოდელირებით

PSS/E პროგრამა იყენებს მუდმივი დენის ჩანართის ტიპის CHAUT რეგულატორს. ეს რეგულატორი ცვლის ჩანართის სიმძლავრეს შემდეგი კანონით:

$$\Delta P = (f - f_0) * M_{p1} * K_{p1} + \frac{d(f-f_0)}{dt} * M_{p1} * K_{d1} \quad (17)$$

ამ გამოსახულებაში სიხშირე აიღება ჰერცებით, M_{p1} - მგვტ/ჰერცი, K_{p1} - უგანზომილებო სიდიდეა და K_{d1} - წამით.

ზემოთ განხილულ მაგალითში, K_{p1} ფარდობით ერთეულებში აღებული იყო 100-ის ტოლად, რაც (17) ტოლობისათვის შეესაბამება 0,5-ს. მართლაც, სიმძლავრის ნაზრდის პირველ ნაწილს დავარქვათ და გადავიყვანოთ ყველა სიდიდე ფარდობით ერთეულებში.

$$\frac{\Delta P_1}{S_B} = \frac{\frac{(f - f_0)}{f_0} * f_0 * M_{p1} * K_{p1}}{S_B}$$

ანუ

$$\Delta P_{1*} = sK_1 = \frac{s * f_0 * M_{p1} * K_{p1}}{S_B} = \frac{s * 50 * 400 * 0,5}{100} = s * 100$$

სადაც $K_1 = \frac{f_0 * M_{p1} * K_{p1}}{S_B}$

ანალოგიურად ვპოულობთ დამოკიდებულებას K_{d2} -სა და K_2 -ს კოეფიციენტებისათვის.

$$\Delta P_2 = \frac{d(f - f_0)}{dt} * M_{p1} * K_{d2}$$

გადავიყვანოთ ყველა სიდიდე ფარდობით ერთეულებში:

$$\frac{\Delta P_2}{100} = \frac{\frac{d(f - f_0)50}{f_0} \cdot 314 * 400 * 0,5}{100}$$

$$\Delta P_{2*} = \frac{ds}{dt} \cdot \frac{50 * 314 * 400 * 0,5}{100} = \frac{ds}{dt} \cdot 31400$$

ანუ დამოკიდებულება K_{D2} -სა და K_2 -ს შორის არის შემდეგი:

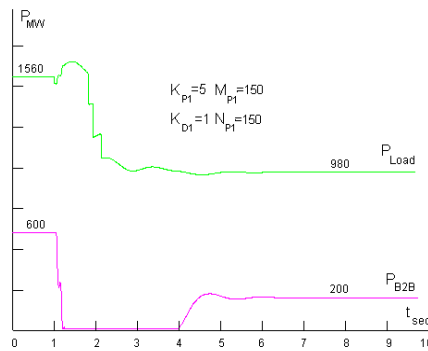
$$K_2 = \frac{f_0 * 314 * M_{p1}}{S_B} * K_{d2}$$

ან პირიქით:

$$K_{d2} = K_2 * \frac{S_B}{f_0 * 314 * M_{p1}}$$

განხილულია რეჟიმი, სადაც თურქეთში ექსპორტი 600 მგვტ-ია, ხოლო იმპორტი აზერბაიჯანიდან – 1000 მგვტ-ია. გენერაცია 1187 მგვტ, მოხმარება

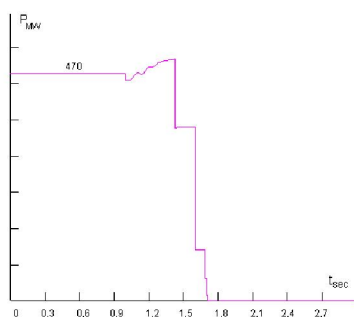
1560 მგვტ, ინერციის ჯამური მუდმივა 136,4 წმ. სიჩქარის რეგულატორები გამორთულია. “მუხრანის” გამორთვით საქართველოს სისტემაში იქმნება აქტიური სიმძლავრის დეფიციტი -1000 მგვტ. ვინაიდან სიხშირის შემცირების სიჩქარე დიდია (-1 ჰც/წმ), ჩანართის რეგულატორი ამცირებს სიმძლავრის გაცემას თურქეთში, ნახ. 47.



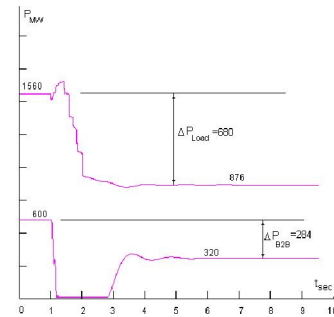
ნახ. 47 ახალციხის ჩანართის და საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთვის ცვლილება

როგორც ვხედავთ, ჩანართი ამცირებს სიმძლავრეს თითქმის ნულამდე, მაგრამ ეს არ არის საკმარისი და საგ-ები გამორთავენ დატვირთვას. ამრიგად საგ-ები ამცირებენ დატვირთვას $1560 - 980 = 580$ მგვტ-ით, ხოლო ჩანართი ამცირებს ექსპორტს თურქეთში $600 - 200 = 400$ მგვტ-ით.

აქედან ჩანს, რომ იმისათვის, რომ ჩანართმა და საგ-ებმა მოხსნან დაახლოებით ერთნაირი ტვირთი, საჭიროა: 1) ექსპორტი მეტი იყოს იმპორტზე; 2) ან გამოვიყენოთ საგ-ები სიხშირის წარმოებულთ.



ნახ. 48 საქართველოს დატვირთვის საგ-ებით გამორთული ნაწილი



ნახ. 49 ახალციხის ჩანართის და საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთვის ცვლილება

მოცემულ ნახაზებზე მოყვანილია იმავე გარდამავალი პროცესის მოდელირება, ოღონდ სისტემის ტვირთის 470 მგვტ გამოირთო სიხშირის წარმოებულთ მომუშავე საგ-ებით, ნახ. 48. ვინაიდან სიხშირე მცირდება დიდი სისწრაფით, ტვირთის ეს ნაწილი გამოირთო ავარიის დაწყებიდან 0,7 წამის განმავლობაში. დანარჩენი $680 - 470 = 210$ მგვტ გამოირთო ჩვეულებრივი საგ-ებით. ჩანართმა ამ დროს მოიხსნა სრული სიმძლავრე (600) მგვტ, შემდეგ კი შეანარჩუნა ექსპორტი თურქეთში 320 მგვტ-ის დონეზე.

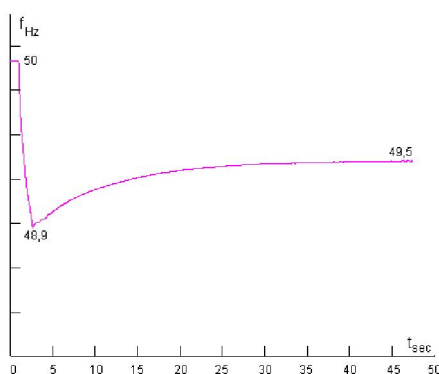
თუ რეჟიმი ისეთია, რომ იმპორტი ტოლია ან ნაკლებია ექსპორტზე, მაშინ სურათი შეიცვლება.

განხილულ იქნა შემდეგი რეჟიმი:

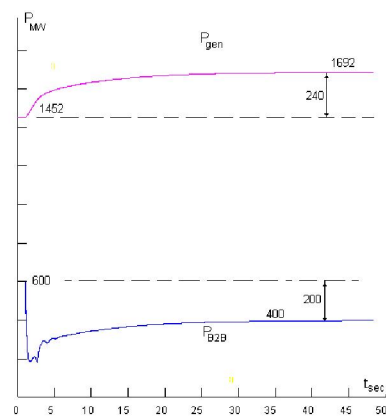
$$P_{gen} = 1452 \text{ MW}, \quad P_{Load} = 1434 \text{ MW}, \quad P_{IMP} = 600 \text{ MW}, \quad P_{exp} = 600 \text{ MW},$$

$$T_j = 136 \text{ MW}, \quad P_{rez} = 137 \text{ MW}.$$

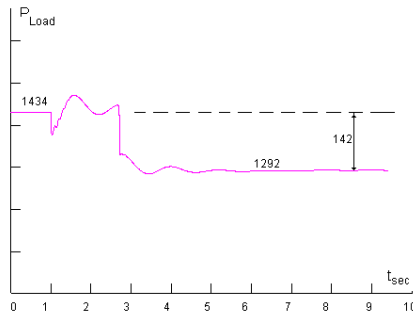
რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტები იგივეა, რაც ზემოთ განხილულ შემთხვევაში. სიხშირის მინიმალური მნიშვნელობაა 48,9 ჰერცი, რეჟიმი დამყარდა 49,35 ჰერცზე, სისტემის გენერატორებმა გაზარდეს ტვირთი 237 მგვტ-ით და სისტემის ჯამური გადატვირთვა შეადგენს 100 მგვტ-ს. საგ-ებმა მოხსნეს 142 მგვტ და ჩანართმა შეამცირა თურქეთში გაცემა 200 მგვტ-ით, ნახ. 50, 51, 52.



ნახ. 50 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში



ნახ. 51 სისტემის ჯამური მექანიკური სიმძლავრე და გადადინება ახალციხის ჩანართზე



ნახ. 52 საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთვა

ახლა განვიხილოთ რეჟიმი, სადაც თურქეთში გადის 900 მგვტ და აზერბაიჯანიდან შემოდის 400 მგვტ. სიხშირე შემცირდა 49 ჰერცამდე, სიხშირის შემცირების სიჩქარე კი მცირეა და შესაბამისი საგ-ები არ მუშაობენ. ჩვეულებრივმა საგ-ებმაც არ იმუშავებს, ვინაიდან სიხშირემ 49 ჰერციდან სწრაფად დაიწყო ზრდა. ჩანართმა შეამცირა სიმძლავრე 900 მგვტ-დან 670 მგვტ-მდე და რეჟიმი დამყარდა 800 მგვტ-ს დონეზე. სისტემაში მბრუნავი რეზერვი იყო 225 მგვტ-ს ტოლი. გენერატორებმა აიღეს 288 მგვტ და მცირედად გადაიტვირთნენ. სიხშირე დამყარდა 49,55 ჰერცის დონეზე.

დასკვნა:

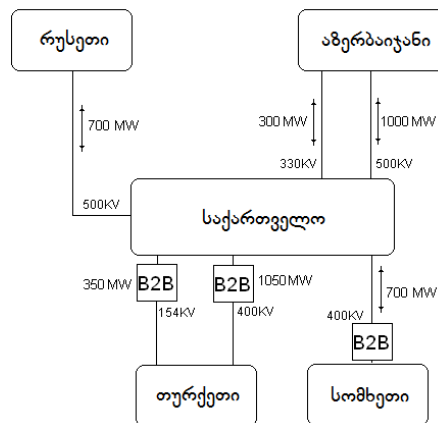
ჩანართით გაცემული სიმძლავრე მეტი უნდა იყოს იმპორტის სიმძლავრეზე.

4.5 სასისტემო ავტომატიკის ალგორითმის დამუშავება

საქართველოში სიმძლავრის ნაჭარბის წარმოქმნის შემთხვევაში

საქართველოს ელექტრული სისტემის სწრაფი განვითარება, კერძოდ მაღალი ძაბვის ქსელის მნიშვნელოვანი გაძლიერება და ახალი ჰიდროელექტრული სადგურების მშენებლობა ზრდის ელექტრული სისტემის სატრანზიტო და საექსპორტო შესაძლებლობებს. მეზობელ სისტემებთან

(რუსეთი, აზერბაიჯანი) ოპერირება ხდება პარალელურ, სინქრონულ რეჟიმში, ხოლო თურქეთთან და სომხეთთან მოხდება ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართების საშუალებით. ახალციხის 500 კვ ძაბვის ქვესადგურში ეწყობა 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.



ნახ. 53 სისტემათაშორისი სიმძლავრის ნაკადების შესაძლო მიმართულება საქართველოს სისტემაში

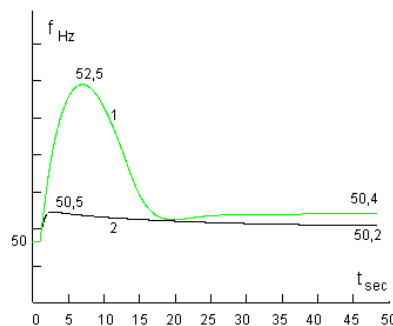
ამრიგად, იქმნება 1000–1400 მგვტ სიმძლავრის ტრანზიტი საქართველოს გავლით. სიმძლავრის ასეთი დიდი ნაკადები ქმნიან საქართველოს სისტემისათვის გარკვეულ პრობლემებს დინამიური მდგრადობის შენარჩუნების თვალსაზრისით. მუდმივი დენის ჩანართის ნებისმიერი ავარიული გამორთვა შექმნის საქართველოს სისტემაში სიმძლავრის დეფიციტს ან ნაჭარბს. სისტემის დინამიური მდგრადობის შენარჩუნები-სათვის 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. ჩანართების სიმძლავრის ავტომატური რეგულირება ხორციელდება საქართველოს სისტემის სიხშირის გადახრის და სიხშირის წარმოებულის პროპორციულად:

$$\Delta P = K_1 (f_o - f) + K_2 \frac{df}{dt} \quad (18)$$

სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის ლოგიკა დამოკიდებულია ჩანართების სიმძლავრეზე და ამ სიმძლავრის მიმართულებაზე. მაგალითისათვის განვიხილოთ რეჟიმი, სადაც საქართველოდან თურქეთში 400 კვ ძაბვის ხაზით გადის 700 მგვტ, 154 კვ-იანი ხაზით 150 მგვტ, სომხეთიდან შემოდის 550 მგვტ სიმძლავრე და კავშირი რუსეთთან და აზერბაიჯანთან გამორთულია. ჩანართების სიმძლავრის რეგულირება არ ხდება.

გარდამავალი პროცესის მოდელირება ჩატარდა PSS/E პროგრამით. საქართველოს სისტემა წარმოდგენილი იყო 500–220–110 კვ ძაბვის ქსელით და ყველა გენერატორით. სომხეთის სისტემა - 400–220–110 კვ ქსელით და ყველა სადგურით. ასეთ რეჟიმში თურქეთში გამავალი 400 კვ ძაბვის ხაზის გამორთვა საქართველოს სისტემაში გამოიწვევს სიმძლავრის ასეთივე ნაჭარბს და სიხშირე გაიზრდება. ცხადია, რომ ტურბინების სიჩქარის რეგულატორები შეამცირობენ გენერაციას, მაგრამ სიხშირე მაინც გაიზრდება 52,5 ჰერცამდე, ნახ. 54, მრუდი 1.



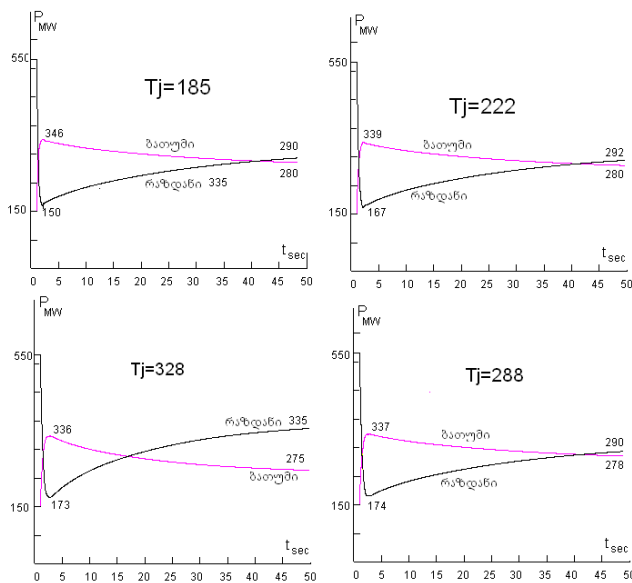
ნახ. 54 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

სიხშირის ასეთმა ზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს გენერატორების დაცვით გამორთვა და თანაც მეტი ოდენობით, ვიდრე ეს მოცემული სიმძლავრის

ნაჭარბის პირობებშია საჭირო. ჩანართების სიმძლავრის (18) კანონით რეგულირებისას, სიხშირე იზრდება მხოლოდ 0,5 ჰერცით. ეს აიხსნება შემდეგნაირად: სიმძლავრის ნაჭარბი გამოიწვევს სისტემაში სიხშირის ზრდას და რაც მთავარია დიდია სიხშირის წარმოებული. ეს უკანასკნელი დამოკიდებულია არა მარტო ნაჭარბი სიმძლავრის ΔP სიდიდეზე, არამედ სისტემის ჯამურ ინერციის $T_{j\Sigma}$ მუდმივაზე:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{T_{j\Sigma}}$$

ინერციის მუდმივის უფრო მცირე მნიშვნელობებს შეესაბამება სიხშირის უფრო დიდი წარმოებული და ჩანართის სიმძლავრის უფრო ინტენსიური რეგულირება. ერთი და იგივე გარდამავალი პროცესის მოდელირება ჩატარდა საქართველოს სისტემაში გენერატორების სხვადასხვა შემადგენლობისათვის, ერთი და იგივე ჯამური გენერაციის დაცვით. სისტემის ჯამური ინერციის მუდმივა დაყვანილი ბაზისურ 100 მგვტ–ზე იყო: 185 წმ, 222 წმ, 288 წმ და 328 წმ. ბათუმის და რაზდანის ჩანართები ჯამში 700 მგვტ-დან აბათილებს 500 მგვტ-ს. დანარჩენი 200 მგვტ ნაჭარბის ლიკვიდაციას ახორციელებენ ნაწილობრივ სიჩქარის რეგულატორები, ნაწილობრივ ჩანართები, ნახ. 55.

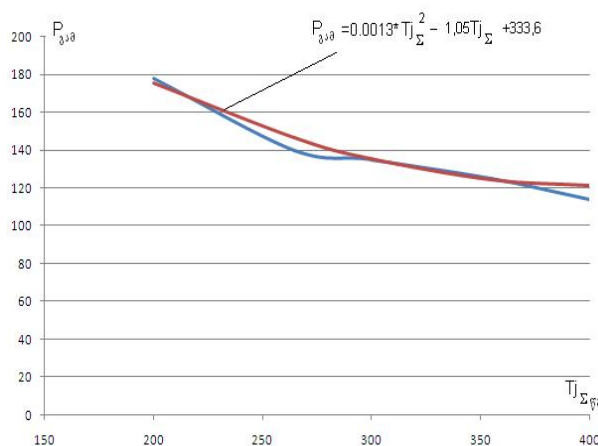


ნახ. 55 ბათუმისა და რაზდანის ჩანართების სიმძლავრეები

შეიძლება გაკეთდეს პირველი წინასწარი დასკვნა: თუ მუშაობაში დარჩენილი ჩანართების რეგულირების მარაგი (ბათუმის ჩანართის სიმძლავრის გაზრდა პლუს რაზდანის ჩანართის სიმძლავრის შემცირება) დაახლოებით 70%-ია წარმოქმნილი უბალანსობისა, მაშინ სასისტემო ავტომატიკის ჩარევა საჭირო არ არის. იმ შემთხვევაში, როცა რეგულირების მარაგი მცირეა, საჭირო ხდება გენერატორების ნაწილის გამორთვა. ჩვენ მოვითხოვეთ, რომ გამოსართავი სიმძლავრე იყოს ისეთი, რომ სიხშირე არ გახდეს 51 ჰერცზე მეტი. მოდელირება ჩატარდა პირობებში, როცა თურქეთში 400 კვ ძაბვის ხაზით გადიოდა 700 მგვტ, ბათუმის ჩანართი დატვირთული იყო 290 მგვტ-მდე, სომხეთის ჩანართით შემომავალი სიმძლავრე კი იყო 250 მგვტ. მოდელირების რეზულტატები მოყვანილია ცხრ. 20-ში.

f_{max}	$T_{j\Sigma}$	$\Delta P_{გამ}$
51	200	178
51	265	140
51	300	135
50.98	355	125
50.95	400	114

ცხრ. 20 საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია სისტემის ჯამური ინერციის მუდმივის სხვადასხვა სიდიდისას



ნახ. 56 გამოსართავი სიმძლავრის დამოკიდებულება სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივაზე

ამ რეზულტატების საფუძველზე აგებული იყო მრუდი (ნახ. 56), რომელიც ანალიზური ფორმით აკავშირებს გამოსართავ სიმძლავრეს სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივასთან. მსგავსი გაანგარიშებები ჩატარდა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის სიმძლავრის განსხვავებული სიდიდეებისათვის (800, 900, 1000, 1100).

საქართველოს დატვირთვის რეჟიმის უცვლელობის პირობებში, აღებულ იქნა ბათუმისა და რაზდანის ჩანართებით გამავალი სიმძლავრის რამოდენიმე ვარიანტი, საქართველოს სისტემის ინერციის მუდმივის რამოდენიმე სიდიდისათვის (ჯამური გენერაციის უცვლელად). ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით თურქეთში გაიცემოდა 800 მგვტ. მიღებული შედეგები ადასტურებს ზემოთ გაკეთებულ დასკვნას, კერძოდ: თუ ბათუმისა და მარნეულის ჩანართების ჯამური რეგულირების მარაგი შეადგენს წარმოქმნილი უბალანსობის დაახლოებით 70%-ს და მეტს, მაშინ საქართველოს სისტემაში საჭირო არაა გენერატორების გამორთვა, რაც გამოჩნდა მოდელირების პირველ ვარიანტში, სადაც ჩანართების ჯამური რეგულირების მარაგმა შეადგინა 600 მგვტ, 800 მგვტ უბალანსობის დროს.

T_j	$P_{გაგ}, მგვტ$			
	მოდელირების ვარიანტი			
	(1) 400	(2) 480	(3) 300	(4) 200
243	138	70	248	350
270	128	55	238	339
290	120	50	230	329
321	108	40	218	319

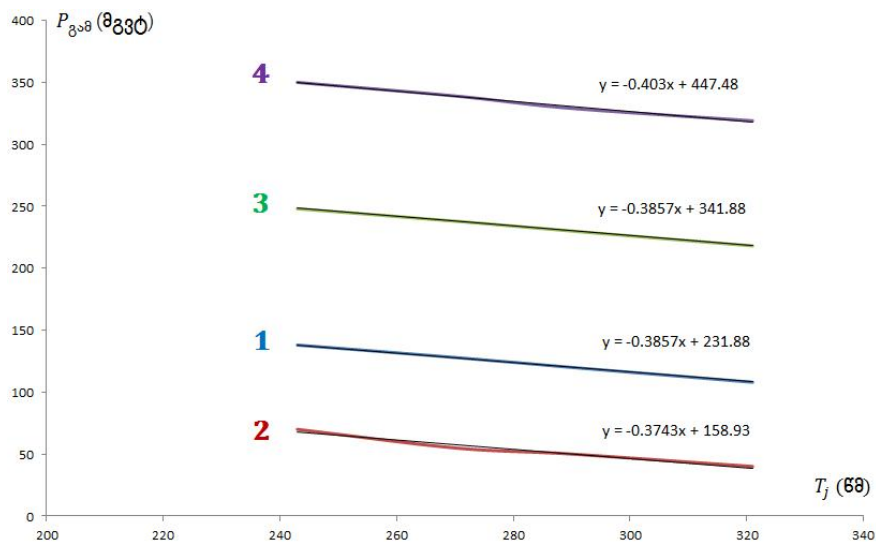
ცხრ. 21 საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია

მოდელირების ოთხი ვარიანტისთვის

მივიღეთ ოთხი მახასიათებელი, განსხვავებული T_j –ისა (243, 270, 290, 321) და ბათუმისა და მარნეულის ჩანართების ჯამური რეგულირების მარაგის (400,

480, 300, 200) სიდიდეებისთვის (ცხრილი #21). ახალციხის ჩანართზე გადადინება - 800 მგვტ.

მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით აგებულ იქნა უბალანსობის დროს საქართველოში გამოსართავი გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება საქართველოს სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივაზე (ნახ. 57).



ნახ. 57 გამოსართავი გენერაციის სიდიდის დამოკიდებულება სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივაზე

როგორც ვხედავთ, ოთხივე მახასიათებელს აქვს მსგავსი, წრფივი ხასიათი, ამიტომ შესაძლებელია მათგან მიღებული იქნეს, ერთი მათემატიკური ფუნქცია, რომელიც დააკავშირებს გამოსართავ გენერაციას საქართველოს სისტემის ჯამურ ინერციის მუდმივასთან:

$$P_{გამ} = (0.00009 \cdot \Delta P_{რეგ} - 0.4186) \cdot T_j + (-1.0396 \cdot \Delta P_{რეგ} + 653.63) \quad (19)$$

მიღებული ფორმულა შემოწმებულ იქნა დამატებითი სცენარიდან მიღებული შედეგების საფუძველზე. კერძოდ, გაანგარიშებულ იქნა მოდელირება იგივე სცენარით, როდესაც მუდმივი დენის ჩანართების ჯამური რეგულირების მარაგი იყო 400 მგვტ (250 მგვტ გადის ბათუმის ჩანართით, 300 მგვტ შემოდის მარნეულის ჩანართით, ცხრილი 22).

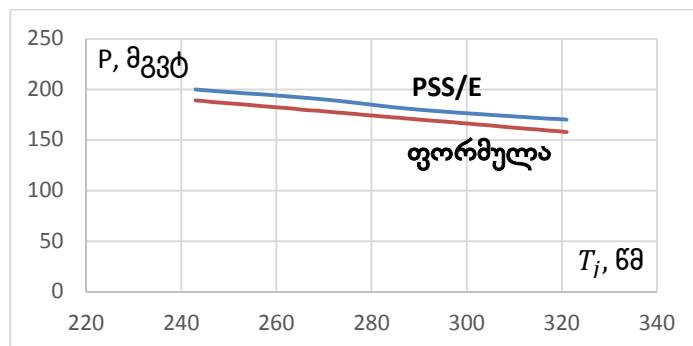
T_j , წმ	$P_{გამ}$, მგვტ
	მოდელირების ვარიანტი
	5 (400)
243	200
270	190
290	180
321	170

ცხრ. 22 საქართველოს სისტემაში გამორთული გენერაცია მოდელირების დამატებითი (მე-5) ვარიანტისთვის

პროგრამა PSS/E-ითა და (19) ფორმულით მიღებული შედეგების შედარება ნაჩვენებია ცხრილ #23-ში.

T_j , წმ	$P_{გამ}$ (PSS/E), მგვტ	$P_{გამ}$ (ფორმულით), მგვტ
243	200	189
270	190	178
290	180	170
321	170	158

ცხრ. 23 PSS/E-თი და ფორმულით გამორთული გენერაციის სიდიდეები იგივე შედეგი გრაფიკის სახით ნაჩვენებია ნახ. 58-ზე.



ნახ. 58 ფორმულით და PSS/E-თი გამორთული გენერაციის სიდიდეების შედარება

როგორც ჩანს, ფორმულით და პროგრამა PSS/E-თი მიღებული შედეგები მაღალი სიზუსტით (93-94%) ემთხვევა ერთმანეთს. (19) გამოსახულების გამოყენება მიზანშეწონილია შემდგომ გაანგარიშებებში.

ანალოგიური ფორმულები მიღებული იქნა თურქეთში $P_{გაღ}$ გადადინების სხვა მნიშვნელობებისას, კერძოდ:

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

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

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

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

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

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.

$P_{გაშ1}$	$P_{გაღ1} = 700 \text{ მგვტ}$
$P_{გაშ2}$	$P_{გაღ2} = 800 \text{ მგვტ}$
$P_{გაშ3}$	$P_{გაღ3} = 900 \text{ მგვტ}$
$P_{გაშ4}$	$P_{გაღ4} = 1000 \text{ მგვტ}$
$P_{გაშ5}$	$P_{გაღ5} = 1100 \text{ მგვტ}$

ცხრ. 24 გამოსართავი გენერაციის ოდენობა თურქეთში

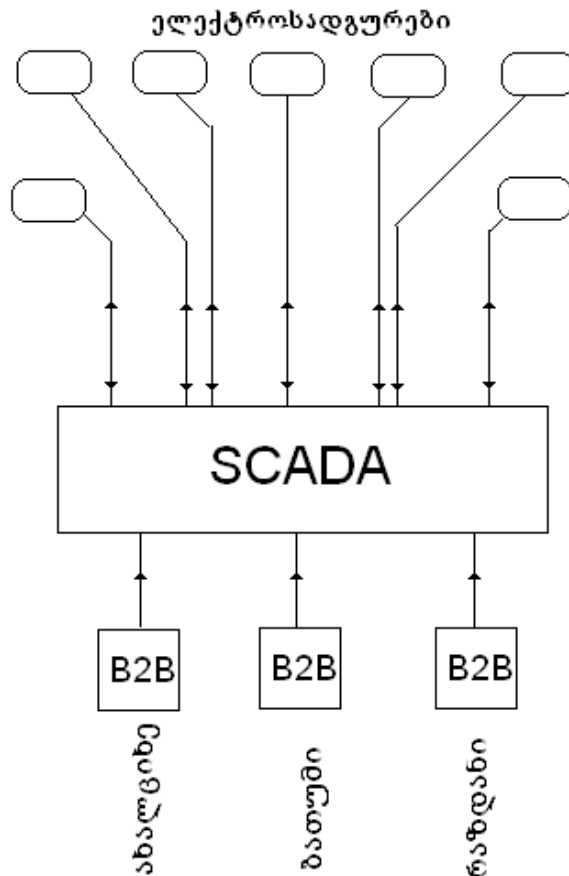
ექსპორტის სხვადასხვა მნიშვნელობისას

მოცემულ პირობებში გამოსართავი გენერაცია ფუნქციაა მხოლოდ თურქეთში გადადინების სიდიდისა. ეს ფუნქცია მოცემულია ცხრილი #24-ის სახით.

უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენებით, შესაძლებელია ეს ფუნქცია გამოვსახოთ პოლინომით:

$$P_{გაშ1} = a_0 * P_{გაღ}^2 + a_1 * P_{გაღ} + a_2 \quad (20)$$

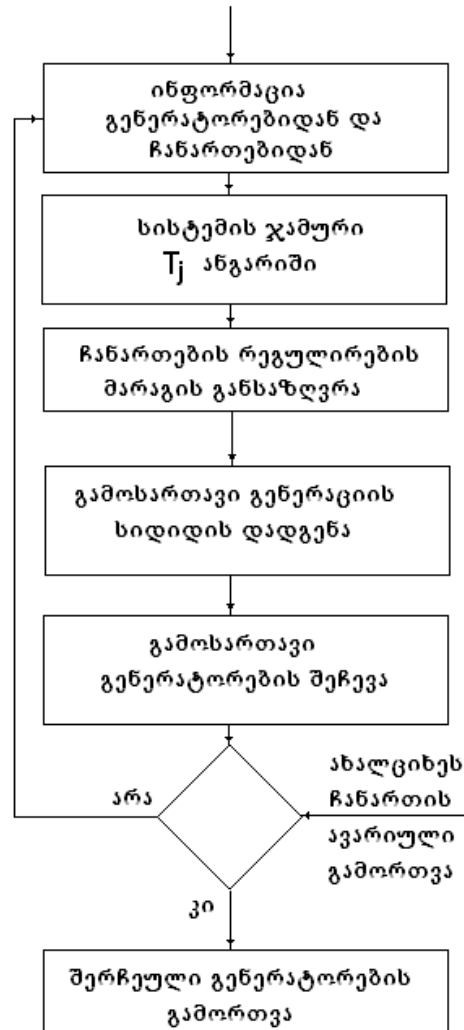
სასისტემო ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის მოქმედება ავხსნათ შემდეგი სქემის საშუალებით, ნახ. 59.



ნახ. 59 ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის მოქმედების პრინციპი

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. 60-ზე ნაჩვენები ალგორითმით.

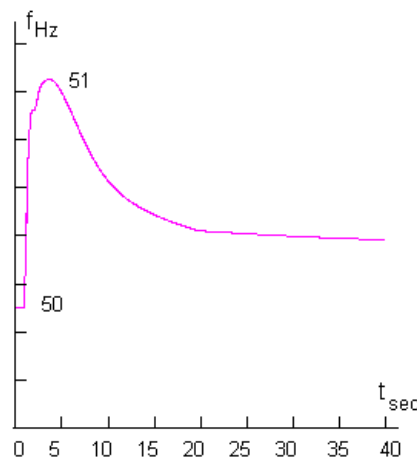
მოცემული ალგორითმის მიხედვით, პროგრამულ ენა **Visual Basic**-ზე დაიწერა პროგრამა. ამ პროგრამით და PSS/E პროგრამული კომპლექსით ხდებოდა სასისტემო ავტომატიკის მუშაობის მოდელირება. განხილული იყო რეჟიმი, სადაც საქართველოს სისტემის ჯამური გენერაცია შეადგენდა 2475 მგვტ-ს, ჯამური დატვირთვა 1477 მგვტ-ს.



ნახ. 60 Visual Basic-ში დაწერილი პროგრამის მუშაობის ალგორითმი

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 სამფაზა 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. 61.



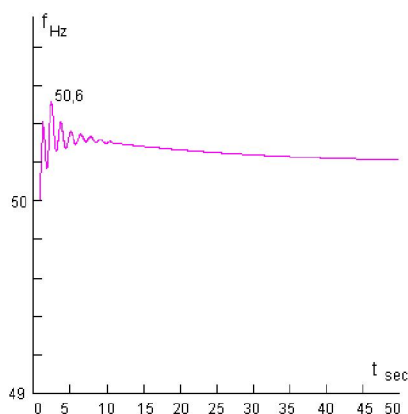
ნახ. 61 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში

400 მგვტ გენერაციის გამორთვის შემდეგ, სიჩქარის რეგულატორებმა შეამცირეს სისტემის გენერაცია კიდევ 313 მგვტ-ით. რაზდანის ჩანართმა შეამცირა გადადინება 218 მგვტ-ით (საქართველოს სისტემისთვის ეს იგივეა, რაც გენერაციის შემცირება), ბათუმის ჩანართმა გაზარდა გაცემა 45 მგვტ-ით. ჯამში გაკომპენსირდა $400+313+218+45=976$ მგვტ. დანარჩენი 24 მგვტ ძაბვის გაზრდით გამოწვეული დატვირთვის მარეგულირებელი ეფექტია. ამრიგად ამ ალგორითმით მომუშავე სასისტემო ავტომატიკა მოქმედებს ადეკვატურად და სისტემის სიხშირე არ აღწევს დათქმულ 51 ჰერცს.

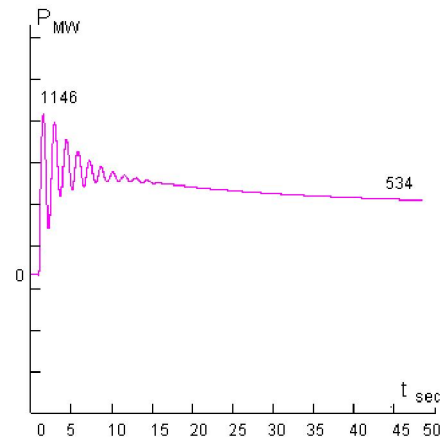
ზემოთ აღწერილი სასისტემო ავტომატიკის მოქმედება ეფექტურია, როცა საქართველოს სისტემა მუშაობს რუსეთის და აზერბაიჯანის სისტემებისაგან იზოლირებულად. რომელიმე ამ სისტემებიდან ერთერთთან

სინქრონულად მუშაობის შემთხვევაში სასისტემო ავტომატიკის მიზანი იცვლება. მაგალითისათვის განვიხილოთ საქართველოს სისტემის იგივე რეჟიმი რაც ზემოთ, ოღონდ აზერბაიჯანის სისტემასთან დამაკავშირებელი 500 კვ ძაბვის ხაზი ჩართულია. აქტიური სიმძლავრის გადადინება ამ ხაზზე აღებულია ნულის ტოლად. მაშასადამე სისტემები დაბალანსირებულები არიან. სიმძლავრის გადადინება თურქეთში და შემოდინება სომხეთიდან იგივეა, რაც წინა შემთხვევაში. ვიხილავთ იმავე ავარიას, ოღონდ იმ პირობებში, როდესაც ბათუმის და სომხეთის ჩანართები არარეგულირებადია.

ნახ. 62-ზე ნაჩვენებია სიხშირის ცვლილება საქართველოს ელ.სისტემაში ახალციხის ჩანართის და გამორთვის შემდეგ. აღსანიშნავია ის, რომ გენერატორების გამორთვა არ მოხდა. სიხშირე გაიზარდა მხოლოდ 50,6 ჰერცამდე.



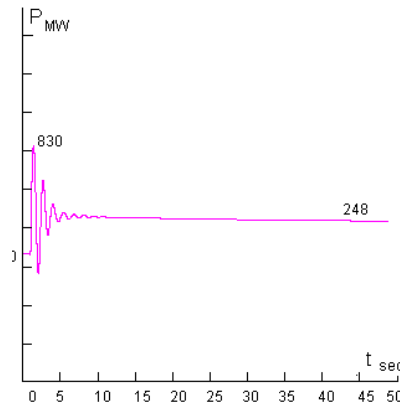
ნახ. 62 სიხშირის ცვლილება საქართველოს სისტემაში



ნახ. 63 სიმძლავრის გადადინება ეგს „მუხრანზე“

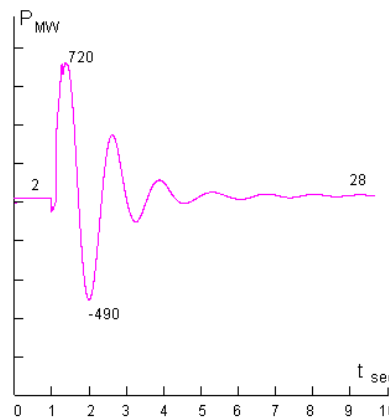
თუმცა გადადინება საქართველოს და აზერბაიჯანის შემაერთებელ ხაზ „მუხრანზე“ მკვეთრად იცვლება და ადგილი აქვს სიმძლავრის დიდ რყევებს (ნახ. 63). აზერბაიჯანის სისტემამ შეამცირა თავისი გენერაცია 534 მგვტ-ით და ეს სიმძლავრე სიმძლავრე გაკომპენსირდა საქართველოდან გადადინებით. ახალციხიდან თურქეთში გადიოდა 1000 მგვტ, ამიტომ საქართველოს გენერაცია შემცირდა $1000 - 534 = 466$ მგვტ-ით. როგორც ვხედავთ, თურქეთში

ექსპორტის უეცარი გამორთვა ამ შემთხვევაში არ ქმნის სიხშირის დაუშვებელ ზღვრამდე ზრდის პრობლემას. პრობლემა „მუხრანის“ ხაზზე სიმძლავრის დიდი რყევების წარმოქმნაშია. ჩანართების სიმძლავრის რეგულირება და საქართველოში 400 მგვტ გენერაციის გამორთვა ამცირებს რყევების ამპლიტუდას, ნახ. 64.



ნახ. 64 სიმძლავრის გადადინება ეგხ „მუხრანზე“

თუ საქართველოს სისტემაში ავტომატიკა გამორთავს 1000 მგვტ გენერაციას, რაც ტოლია ახალციხის ჩანართით გაცემული სიმძლავრისა, სიმძლავრის რყევები ეგხ „მუხრანზე“ მაინც იქნება მნიშვნელოვანი, ნახ. 65.



ნახ. 65 სიმძლავრის რყევები ეგხ „მუხრანზე“

ეს რყევები გამონჭვეულია ახალციხეში მშ-ითა და ჩანართის გამორთვით. ენგურის გენერაცია გამოირთვება მშ-ის გამორთვის შემდეგ 0.18 წამში. ეს

დრო საჭიროა სიგნალის გადაცემისათვის და ამომრთველების ამორთვისათვის. მაშასადამე, აზერბაიჯანთან სინქრონულად მუშაობისას საჭიროა დადგინდეს, თუ რა ფარგლებშია დასაშვები სიმძლავრის რყევა „მუხრანზე“.

დასკვნა:

- ❖ ალგორითმით მომუშავე სასისტემო ავტომატიკა მოქმედებს ადეკვატურად და სისტემის სიხშირე არ აღწევს 51 ჰერცს; ალგორითმით მიღებული გამოსართავი გენერაციის სიდიდე შედარდა პროგრამა PSS/E-თი გარდამავალ პროცესში გამორთულ გენერაციას და საკმაოდ მაღალი სიზუსტით (93-94%) დაემთხვა მას;
- ❖ თუ მუშაობაში დარჩენილი ჩანართების რეგულირების მარაგი (ბათუმის ჩანართის სიმძლავრის გაზრდა პლუს რაზდანის ჩანართის სიმძლავრის შემცირება) დაახლოებით 70%-ია წარმოქმნილი უბალანსობისა, მაშინ სასისტემო ავტომატიკის ჩარევა საჭირო არ არის;
- ❖ სასისტემო ავტომატიკის ზემოთ შემუშავებული მოქმედება ეფექტურია იზოლირებულად მომუშავე საქართველოს სისტემის შემთხვევაში. განსხვავებული რეჟიმის შემთხვევაში სასისტემო ავტომატიკის მიზანი იცვლება;
- ❖ განხილულ იქნა აზერბაიჯანთან კავშირი 500 კვ ძაბვის ხაზით „მუხრანი“. ბათუმის და რაზდანის ჩანართები იყო არარეგულირებადი. შეშფოთებად კვლავ აღებულ იქნა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის ავარიული გათიშვა. მიუხედავად იმისა, რომ არ მოხდა საქართველოში გენერაციის შემცირება, გარდამავალ პროცესში სიხშირე გაიზარდა მხოლოდ 50,6 ჰერცამდე. ამ შემთხვევაში ერთადერთი პრობლემაა სიმძლავრის რყევები ეგზ „მუხრანზე“ საკმაოდ დიდ ფარგლებში.

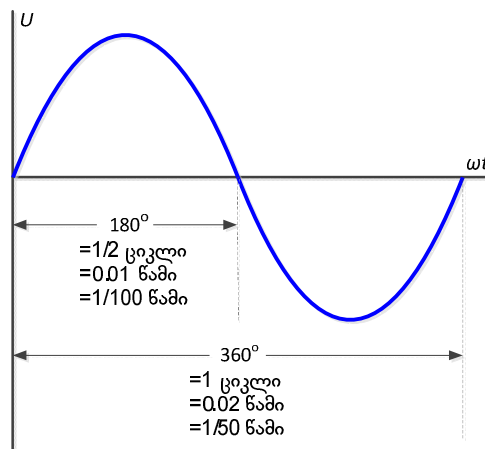
თავი 5

ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს

ელექტრულ სისტემაში

5.1 ზოგადი ცნობები

საქართველოს ელექტრული სისტემა მუშაობს 50 ჰერც სიხშირეზე, რაც ნიშნავს, რომ სისტემის შემადგენელი ყველა ელემენტი გათვლილია ამ სიხშირეზე. იდეალურ შემთხვევაში სისტემაში შემავალმა გენერატორებმა უნდა უზრუნველყონ 50 ჰერცი სიხშირის სინუსოიდური ძაბვების გენერაცია და ძლიერი დატვირთვის რეჟიმებშიც კი, გენერატორში გამავალი დენების ფორმა არ უნდა განსხვავდებოდეს სინუსოიდისაგან. ასეთ იდეალურ პირობებში გენერატორის მიერ გენერირებულ ძაბვას აქვს ნახ. 66-ზე ნაჩვენები სახე.

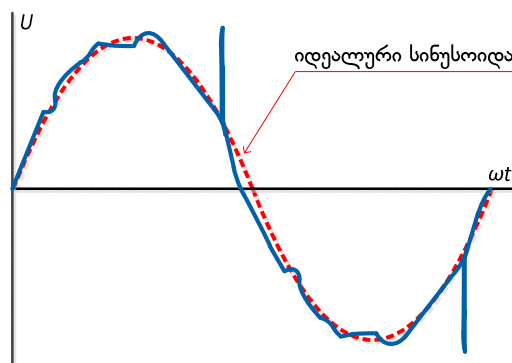


ნახ. 66 იდეალური 50 ჰერცი სიხშირის ძაბვა

იდეალურ 50 ჰერციან ძაბვას ვუწოდებთ ძირითად შემდგენს, ან ფუნდამენტალურ (ძირითად) ჰარმონიკას. ნახაზ 66-ზე ნაჩვენები ძირითადი შემდგენი წარმოადგენს იდეალურ სინუსოიდას, რომელიც მეორდება 50-ჯერ ყოველი ერთი წამის განმავლობაში. ამასთან, მისი დადებითი და უარყოფითი ნახევარციკლები არიან იდენტურნი.

ელექტრული მონოცილობების დიდი ნაწილის მოქმედების პრინციპი ხშირად დამყარებულია მკვებავი ცვლადი ძაბვის განმეორებად (პერიოდულ) ბუნებაზე. მაგალითად, ასეთი ტიპის მონოცილობა შესაძლოა გამოიმუშავებდეს მკვებავი სინუსოიდური ძაბვის ნულზე გადასვლასთან დაკავშირებულ სინქრონულ დროით სიგნალებს. 50 ჰერციანი სისტემისთვის ცვლადი ძაბვა და დენი ყოველ 0.01 წამში უნდა კვეთდეს ნულს. თუ ცვლადი ძაბვის ან დენის სინუსოიდა ყოველ ნახევარ ციკლში (0.01 წმ) ერთხელ არ გადაკვეთს ნულს, მაშინ აღნიშნული მონოცილობის ნორმალური ფუნქციონირება დიდი ალბათობით დაირღვევა.

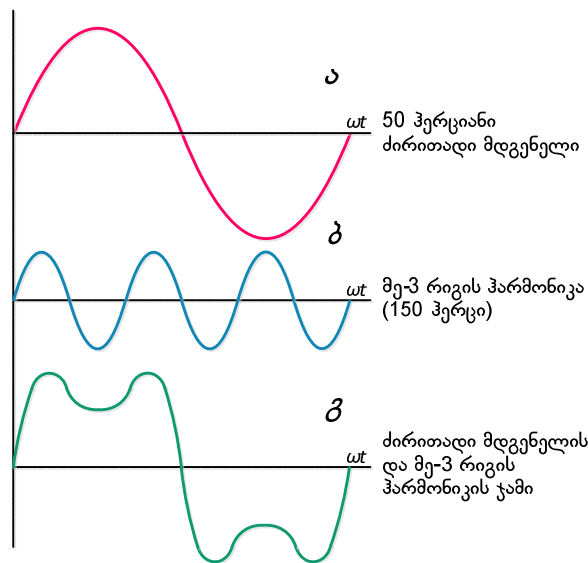
ყველა რეალურ და მათ შორის საქართველოს ელექტროსისტემაშიც ძაბვები ფუნდამენტალური ჰარმონიკის გარდა დამატებით შეიცავენ განსხვავებული სიხშირის მქონე კომპონენტებსაც. 67-ე ნახაზზე ნაჩვენებია მოდელირებით მიღებული დამახინჯებული ძაბვის ფორმა, რომლის მსგავსიც შეიძლება წარმოიქმნას ელექტრული სისტემის ნებისმიერ ძლიერ ინდუსტრიურ არეაში.



ნახ. 67 სისტემის ძაბვა ჰარმონიკული კომპონენტებით

ადვილი შესამჩნევია, რომ იგი არ არის სუფთა სინუსოიდა და გააჩნია დაკბილული მონაკვეთები. 67-ე ნახაზიდან ასევე ჩანს, რომ დამახინჯებული სინუსოიდა ნულს შესაძლოა კვეთდეს არა ზუსტად ნახევარი ციკლის გასვლის შემდეგ, არამედ მისგან განსხვავებულ დროს. აღნიშნული დამახინჯებული სინუსოიდა გარდა ძირითადი შემდგენლისა შეიცავს აგრეთვე 50 ჰერცისაგან

განსხვავებული სიხშირის მქონე კომპონენტებსაც. ამ კომპონენტებს ჰარმონიკულ შემდგენებს ვუწოდებთ.



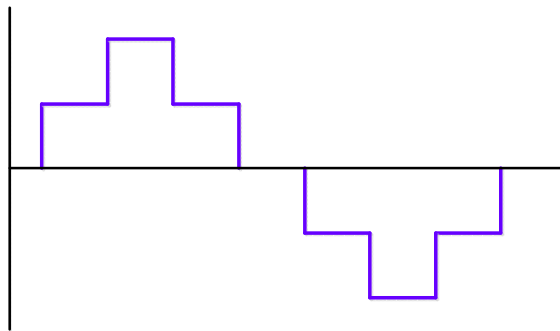
ნახ. 68 50 ჰერციან მდგენელზე მე-3 რიგის ჰარმონიკის

ზედღებით მიღებული ძაბვა

არსებობს კარგად დამუშავებული მეთოდი, რომლის საშუალებითაც პერიოდული ფუნქციებისთვის შესაძლებელია შევისწავლოთ და განვსაზღვროთ ასეთი ფუნქციების ჰარმონიკული შემადგენლობა. ამ მეთოდს ფურიეს ანალიზს ვუწოდებთ. მისი საშუალებით ხდება სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკების რიგის (ჰარმონიკების ნომრის) განსაზღვრა. მაგალითად, თუ გვაქვს ძირითადი, 50 ჰერციანი ჰარმონიკა და მასთან შერეული 100 ჰერციანი ჰარმონიკა, მაშინ ამ 100 ჰერციან კომპონენტს ვუწოდებთ მე-2 რიგის ჰარმონიკას. სახელწოდება “მე-2 რიგი” გაგმომდინარეობს იმ ფაქტიდან, რომ მისი სიხშირე მიღებულია ძირითადი ჰარმონიკის სიხშირის 2-ზე გამრავლებით. ზოგადად, დამახინჯებულ სინუსოიდაში შეიძლება არსებობდეს ნებისმიერი რიგის ჰარმონიკა, რომლის სიხშირეც მიიღება ფუნდამენტალური სიხშირის რომელიმე ნატურალურ რიცხვზე გამრავლებით. მაგალითად, დამახინჯებულ სინუსოიდაში ხშირად არსებობს საკმაოდ ხშირია მე-3 რიგის ჰარმონიკა (150 ჰც), მაგრამ არის შემთხვევები

როდესაც იგი შეიცავს 25-ე (1250 ჰც) ან თუნდაც 47-ე რიგის ჰარმონიკებსაც (2350 ჰც).

68-ე ნახაზი ასახავს ჰარმონიკული კომპონენტების გავლენას ძაბვის ან დენის ფორმაზე. 68-ე,ა ნახაზზე ილუსტრირებულია იდეალური, ფუნდამენტალური 50 ჰერციანი სინუსოიდა, 68-ე,ბ ნახაზზე კი საკმაოდ დიდი ამპლიტუდის მქონე მე-3 რიგის ჰარმონიკა (150 ჰც), რომელიც რაღაც გზით მოხვდა ელექტრულ სისტემაში. 68-ე,გ ნახაზი წარმოადგენს ოსცილოგრაფის ჩვენებას, როდესაც კომბინირდებიან ფუნდამენტალური მდგენელი და მე-3 რიგის ჰარმონიკა (ჰარმონიკების ზედდება).



ნახ. 69 ფუნდამენტალური, მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე და 25-ე ჰარმონიკების ჯამი

ძაბვის ან დენის მრუდი შეიძლება შეიცავდეს რამდენიმე ჰარმონიკულ მდგენელს ერთდროულად. მაგალითად, 69-ე ნახაზზე ნაჩვენებია მრუდის ფორმა წარმოადგენს ფუნდამენტალური (პირველი რიგის), მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე და 25-ე ჰარმონიკების აჯამვის შედეგს.

5.2 ჰარმონიკული შემადგენლობა

ჰარმონიკების გავლენით სინუსოიდური ტალღის დამახინჯების ხარისხის განსაზღვრისთვის გამოიყენება კოეფიციენტი, რომელსაც ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი (Total Harmonic Distortion – THD) ვუწოდებთ. იგი გამოითვლება მრუდში შემავალი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდების კვადრატების ჯამიდან კვადრატული ფესვის შეფარდებით

ფუნდამენტალური შემდგენის ამპლიტუდასთან. მაგალითად, ძაბვის დამახინჯებული სინუსოიდური ტალღისთვის THD=5%-ს ნიშნავს, რომ ამ ძაბვის მრუდის ფორმაში ჰარმონიკული შემადგენლობა ძირითადი შემდგენის 5%-ია. THD-ის დასაშვები მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ სად არის იგი გაზომილი და რა ტიპის ელექტრული მოწყობილობებია განლაგებული ელექტრულად ახლოს დამახინჯების წყაროსთან. ზოგადად, THD=5% დამახინჯების მაღალ დონეს მიუთითებს, THD=10% კი იმდენად მაღალს, რომ პრაქტიკულად დაუშვებელია ასეთ პირობებში ელექტრული მოწყობილობების მუშაობა.

ელექტრულ სისტემაში ჰარმონიკების წარმომქმნელი მრავალი წყარო არსებობს. ელექტრული გენერატორების კონსტრუქტორების მიუხედავად დიდი მცდელობისა მაინც ვერ ქმნიან ისეთი იდეალური კონსტრუქციის გენერატორს რომელიც უზრუნველყოფს იდეალური სინუსოიდური ძაბვის გენერირებას. ასე რომ, ნებისმიერი გენერატორი თავის მხრივ გენერირებს არა იდეალურ სინუსოიდს, არამედ გარკვეული ჰარმონიკული შემადგენლობით. თუმცა მიუხედავად აღნიშნულისა სისტემური თვალთახედვით გენერატორები არ ითვლებიან ჰარმონიკულ წყაროებად. ასეთი თვალსაზრისით სისტემის ძაბვის დამახინჯებაში ძირითად როლს თამაშობენ სისტემის ელექტრული მოწყობილობა-დანადგარები და ელ. ენერჯის მომხმარებელთა დატვირთვები.

ზოგადად, ნებისმიერი ელექტრული მოწყობილობა, რომელიც იწვევს სინუსოიდური ძაბვისა და დენის ფორმის შეცვლას წარმოადგენს ჰარმონიკების წყაროს. ჰარმონიკულ წყაროებს მიეკუთვნებიან ტრანსფორმატორები, კონვერტორები და ტირისტორულ (ტრანზისტორულ) ბაზაზე აგებული ნებისმიერი ელექტრული მოწყობილობები.

ტრანსფორმატორები. ჩართვის მომენტში ტრანსფორმატორები წარმოადგენენ მე-2 რიგის ჰარმონიკების წყაროს. ტრანსფორმატორის აგზნებისას გულარის დამაგნიტების გამო მასში გადის დიდი ბიძგის დენი,

რომელიც რეაქტიული ხასიათისაა და შეიცავს მეორე რიგის ჰარმონიკას. თუმცა აღნიშნული ჰარმონიკული მდგენელი მცირე ხანგრძლივობისაა.

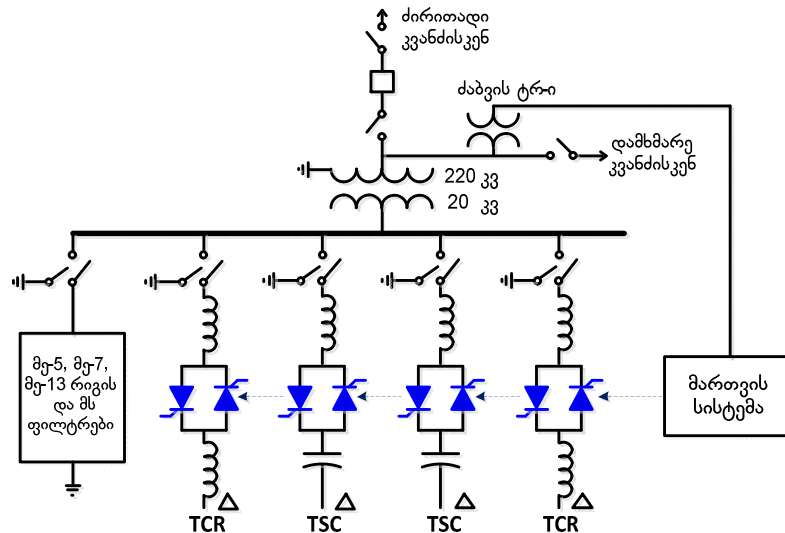
ტრანსფორმატორები უფრო მნიშვნელოვან ჰარმონიკულ წყაროებად გვევლინებიან მაშინ, როდესაც ხდება მათი მაგნიტური სისტემის გაუღენტოვა. ტრანსფორმატორის გაუღენტოვა იწყება მაშინ, როდესაც მკვებავი ძაბვა აღემატება სიდიდეს, რომელიც გაუღენტოვის მახასიათებელზე არანრთივ უბანზე გადასვლის წერტილს შეესაბამება. დამაგნიტების დენი იწყებს ზრდას და ასევე იზრდება ამ დენში ჰარმონიკული შემადგენლობა. გაუღენთილი ტრანსფორმატორები წარმოადგენენ კენტი რიგის მე-3, მე-5 და ა.შ. ჰარმონიკების წყაროს.

კონვერტორები. ელექტრულ სისტემებში ჰარმონიკების საკმაოდ მსხვილ წყაროს წარმოადგენენ კონვერტორები. ისინი ახდენენ ცვლადი ძაბვის გარდაქმნას მუდმივ ძაბვად ან პირიქით. ასეთი ტიპის კონვერტორები დენს ატარებენ პორციებით, რათა უზრუნველყონ სასურველი ცვლადი ან მუდმივი ძაბვის ფორმირება. კონვერტორების მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი ან ქსელში გაცემული დენების არასინუსოიდურობის გამო, ქსელის სხვადასხვა ელემენტებზე ამ დენებით გამოწვეული ძაბვის ვარდენებიც არასინუსოიდურია. სწორედ ეს გახლავთ მათ მიერ ჰარმონიკების წარმოქმნის მთავარი მიზეზი. AC/DC კონვერტორების ჰარმონიკული შემადგენლობა როგორც ცვლადი ასევე მუდმივი ძაბვის მხარეს საკმაოდ კარგად არის შესწავლილი. როგორც წესი კონვერტორის ტიპზე დამოკიდებულებით ცვლადი ძაბვის მხარეს წარმოიქმნება მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე, 25-ე და ა.შ. ჰარმონიკები.

ჰარმონიკებმა სისტემის ელემენტებზე შესაძლოა მოახდინონ სხვადასხვა სახის უარყოფითი ზეგავლენა. საუკეთესო შემთხვევაში სასურველია ჰარმონიკების სრული არიდება სისტემის ელემენტებისაგან, თუკი ეს შესაძლებელია. HVDC კონვერტორები ყოველთვის აღჭურვილია

ცვლადი ძაბვის ჰარმონიკული ფილტრებით, რათა არ მოხდეს კონვერტორის მიერ გენერირებული ჰარმონიკების სისტემაში შეჭრა.

ტირისტორულ ბაზაზე აწყობილი ელექტრული დანადგარები.
 ჰარმონიკების ერთ-ერთი ყველაზე სერიოზული და სახიფათო წყარო არის ყველა ის მოწყობილობა, რომელთა მუშაობა დამყარებულია მძლავრი ტირისტორების გასაღებისებურ რეჟიმში მუშაობაზე.



ნახ. 70 სტატიკური ვარ კომპენსატორი

ასეთი მოწყობილობები როგორც წესი გამოიყენება სხვადასხვა ელემენტების (ან ამ ელემენტების ცალკეული სეგმენტების) სწრაფი კომუტაციისათვის. აღნიშნულის კარგი მაგალითია სტატიკური კომპენსატორები (SVC – Static Var Compensator). SVC წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებად წყაროს. კომუტაციისთვის გამოყენებულია ტირისტორები, რათა განახორციელოს ინდუქციური და ტევადური ელემენტების ისეთი კომბინაციით ჩართვა, რათა სიტუაციის შესაბამისად მოხდეს ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის გაცემა ან ქსელიდან მისი ართმევა.

ყურადღება უნდა მიექცეს ერთ გარემოებას. 70-ე ნახაზზე ნაჩვენებია კონდენსატორები არიან ტირისტორით ჩართვადი ელემენტები (TSC - thyristor switched capacitors), ხოლო რეაქტორები - ტირისტორით

კონტროლირებადი ელემენტები (TCR - thyristor controlled reactors). კონდენსატორების ტირისტორებით ჩართვა წარმოადგენს მხოლოდ კომუტაციას და პრაქტიკულად იგივეა რაც ამომრთველით ჩართვის ოპერაცია და შესაბამისად ასეთ დროს არ ხდება ჰარმონიკების გენერაცია. ტირისტორული კონტროლი გულისხმობს რეაქტორებში დენის ამპლიტუდის განუწყვეტლივ კონტროლს. ასეთი კონტროლი ჰარმონიკების ძლიერ წყაროს წარმოადგენს. მე-5 ნახაზზე ნაჩვენებია ფილტრები გათვლილია ტირისტორით კონტროლირებადი რეაქტორების მიერ გენერირებული ჰარმონიკების ჩახშობაზე.

ელ. ენერჯის მომხმარებლების არანრთივი დატვირთვები.

არანრთივი დატვირთვები წარმოადგენენ ჰარმონიკების წყაროს. თუ დატვირთვაზე მოდებულია სინუსოიდური ძაბვა, მაგრამ მასში გადის არასინუსოიდური დენი, მაშინ ასეთ დატვირთვას არანრთივს უწოდებენ. არსებობს რამდენიმე სახის არანრთივი დატვირთვა:

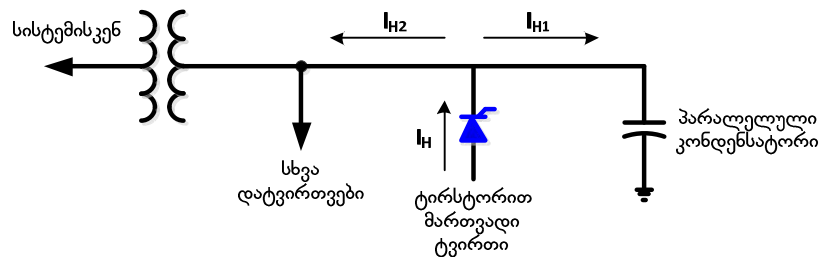
- ❖ რკალური განმუხტვები, რომლებიც ხდება ვერცხლისცილიან ტირისტორებში. ასეთ დროს ძირითადად წარმოიქმნება მე-3 რიგის ჰარმონიკები;
- ❖ რკალური ღუმელები და შედუღების აპარატები, რომლებიც იცვლიან დატვირთვის მახასიათებელს ყოველ ნახევარ პერიოდში. ეს იწვევს ჰარმონიკების წარმოქმნას დატვირთვის დენში;
- ❖ ელექტრონული მონწყობილობები, რომლებიც მუშაობენ გასაღებისებურ რეჟიმში. ასეთი მონწყობილობები მუშაობის პრინციპიდან გამომდინარე არიან საკმაოდ ეკონომიური. მათში დენი გადის ყოველი ნახევარი პერიოდის მხოლოდ გარკვეულ შუალედში და აქედან გამომდინარე იწვევენ ჰარმონიკების წარმოქმნას;
- ❖ მბრუნავი მანქანები იწვევენ ჰარმონიკების წარმოქმნას, თუ სტატორის გრაგნილები არ არიან საკმარისად სიმეტრიულნი.

ამასთან სტატორის მაგნიტური სისტემის გაუღვენთვაც იწვევს ჰარმონიკების წარმოქმნას;

- ❖ სტატიკური კონვერტორები, რომლებიც იყენებენ ტირისტორულ მართვას ცვლადი და მუდმივი დენის ძრავების ბრუნთა რიცხვისა და მომენტის რეგულირებისათვის. ასეთი ტიპის კონვერტორების მიერ ჰარმონიკების წარმოქმნის პროცესი უმეტეს შემხვევაში HVDC კონვერტორების მიერ ჰარმონიკების წარმოქმნის პროცესის ანალოგიურია.

5.3 ჰარმონიკული დენის ნაკადი

71-ე ნახაზზე ნაჩვენებია სქემა, რომელიც აღწერს თუ როგორ ხდება არანწრფივი დატვირთვისგან ჰარმონიკების წარმოქმნა და ჰარმონიკული დენების სისტემაში შეღინება. სქემა შეიცავს: ჰარმონიკების წყაროს, სისტემასთან დამაკავშირებელ ტრანსფორმატორს, სხვა დატვირთვებს და სიმძლავრის კოეფიციენტის კორექციის პარალელურ კონდენსატორებს.



ნახ. 71 სტატიკური ვარ კომპენსატორი

დავუშვათ, რომ ტირისტორით მართვადი ტვირთი წარმოადგენს, ფოლადის მძლავრ ქარხანას, რომელიც იყენებს საკმაოდ მძლავრ მუდმივი დენის ძრავებს. ასეთი ტვირთი ფაქტურად შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ჰარმონიკული დენების გენერატორი. I_H ჰარმონიკული დენი შეღინდება ელექტრულ სისტემაში და განაწილდება შტოებში ამ შტოების სრული წინააღობების შესაბამისად.

IH დენის რალაც ნაწილი გაივლის პარალელურ კონდენსატორებში (IH1), დანარჩენი ნაწილი კი განშტოვდება სხვა დატვირთვების და სისტემის მიმართულებით (IH2, ნახ. 71). კონდენსატორში გამავალმა ჰარმონიკულმა დენებმა შედეგად შეიძლება გამოიწვიოს კონდენსატორის რელეური დაცვის ამოქმედება, ხოლო სხვა დატვირთვებში და სისტემის სხვადასხვა მოწყობილობებში გამავალმა ჰარმონიკულმა დენებმა კი მათი ჭარბი გადახურება ან თბური დაზიანება.

§5.4 ჰარმონიკების გავლენა ელექტრული

სისტემის ელემენტებზე

ჰარმონიკების გავლენის ხარისხი ელექტრულ სისტემაზე დამოკიდებულია ჰარმონიკების ამპლიტუდებზე და აგრეთვე იმ ელექტრული დანადგარების ტიპებზე რომლებში უშუალოდ ადგილი აქვს ჰარმონიკული დენების გავლას. თუ მოწყობილობა ისეთი ტიპისაა რომ დიდად ჰარმონიკები მასზე ეფექტს ვერ ახდენენ, მაშინ ასეთ მოწყობილობაში ძალიან დიდი ჰარმონიკული დენების გავლისასაც კი მიყენებული ზიანი ძალიან უმნიშვნელოა. მაგალითად მახურებელი მოწყობილობები ან მძლავრი სამრეწველო ლუმენები არანაირ ზეგავლენას არ განიცდიან ჰარმონიკული დენებისგან. თუმცა ელექტრული სისტემის ზოგიერთი სხვა დანადგარი შესაძლოა დიდი უარყოფითი ზეგავლენის ქვეშ იყოს ჰარმონიკული დენების მიერ. განვიხილოთ რამდენიმე მათგანი.

მბრუნავი მოწყობილობები. ისეთი მბრუნავი მოწყობილობები, როგორებიც არიან ძრავები და გენერატორები, ძალიან მგრძობიარენი არიან ჰარმონიკების მიმართ. სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკები მათზე სხვადასხვა ეფექტს ახდენენ. საბოლოო ჯამში ჰარმონიკები წარმოქმნიან ჰარმონიკულ ნაკადებს მბრუნავი მოწყობილობების ისეთ არეებში რომლებიც არ არის გათვლილი მათში დენის გავლაზე. აღნიშნული კი რეზულტატად

მბრუნავი მონწყობილობის გადახურებას იძლევა. ჰარმონიკებმა აგრეთვე შესაძლოა გამოიწვიონ მამუხრუჭებელი მომენტების ან მექანიკური ძალების შექმნა მბრუნავი მონწყობილობის ლილვზე, რამაც შესაძლოა რეზულტატში ლილვის გატყდომამდეც კი მიგვიყვანოს. ასეთი ძალების წარმოქმნის ნათელი მაგალითია მოვლენა, რომელსაც ექვესინქრონულ რეზონანს უწოდებენ (SSR – subsynchronous resonance).

ტრანსფორმატორები. ტრანსფორმატორებში ჰარმონიკული დენები ძირითადად იწვევენ გადახურებას. ჰარმონიკის სიხშირის გაზრდასთან ერთად მის მიერ ტრანსფორმატორში გამოწვეული გადახურებაც იზრდება. მაღალი სიხშირის ჰარმონიკები ზრდიან მაგნიტური ველის ინტენსივობას და აინდუქციებენ დენებს ისეთ არეებში რომლებიც არ არის გათვლილი დენების გავლაზე. ეს საბოლოო ჯამში იწვევს ტრანსფორმატორის გადახურებას. გარდა ამისა ჰარმონიკული სპექტრი ტრანსფორმატორში იწვევს მაღალი სიხშირის ხმამაღალი ბგერების გამოცემას.

მაღალი რიგის ჰარმონიკებმა ტრანსფორმატორებში აგრეთვე შესაძლოა გამოიწვიონ ჰარმონიკული გადამეტებები. ასეთი ტიპის გადამეტებები ძირითადად განპირობებულია კონკრეტული სიხშირის ჰარმონიკისთვის ტრანსფორმატორის ინდუქციურობასა და წრედის რომელიმე ტევადურ ელემენტს შორის რეზონანსული კონტურის წარმოქმნით. ძაბვა შესაძლოა მყისიერად გაიზარდოს 20-30%-ით და გამოიწვიოს მაგნიტური სისტემის გაუღებოვა, ნაადრევი დაბერება და აგრეთვე ხვიათაშორისი მოკლე შერთვები.

პარალელური კონდენსატორები. როგორც ვიცით ტევადური წინაღობა $X_C = 1/2 \pi fC$. მნიშვნელში მოთავსებული სიხშირე გულისხმობს იმას, რომ სიხშირის გაზრდით ტევადური წინაღობა მცირდება. მაღალი სიხშირის დენები (მაღალი რიგის ჰარმონიკები) მარტივად გადიან კონდენსატორებში რადგან ტევადობა მათთვის წარმოადგენს დაბალი

წინააღმდეგობის არხს. აღნიშნულმა შეიძლება გამოიწვიოს (და ხშირად ასეც ხდება) კონდენსატორების არასწორი (მცდარი, ტყუილი) გამორთვა.

მაგალითად, გეომანტური შტორმის დროს ელექტრულ სისტემაში შეიძლება წარმოიქმნას უამრავი სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკა. მაღალი რიგის ჰარმონიკები პოულობენ დაბალი წინააღმდეგობის მქონე არხებს, პარალელური კონდენსატორების სახით და მინაში ჩაედინებიან სწორედ მათი გავლით. რელეურმა დაცვამ შესაძლოა ეს დენები აღიქვას როგორც მოკლე შერთვის დენები და გამორთოს კონდენსატორი. ინდივიდუალურ კონდენსატორულ ქილებს შესაძლოა აგრეთვე გააჩნდეთ დნობადი მცველები. დიდი ამპლიტუდის ჰარმონიკულმა დენებმა შესაძლოა გამოიწვიოს ამ მცველების განყვეტა (გაღწობა) და შესაბამისად კონდენსატორული ქილების გამორთვა წრედიდან.

რელეური დაცვა. რელეურმა დაცვამ შესაძლოა არასწორად იმუშაოს ჰარმონიკული დენებისა და ძაბვების ზეგავლენის გამო. ეს ეხება როგორც ელექტრომექანიკურ, ასევე, ციფრულ დაცვის რელეებს. ელექტრომექანიკური რელეები ხშირად იგივე რეაქციას ამჟღავნებენ ჰარმონიკების მიმართ რასაც ფუნდამენტალური დენებისა და ძაბვების მიმართ. მაგალითად მაღალი ამპლიტუდის ჰარმონიკულმა დენმა შესაძლოა შექმნას ისეთი სიდიდის მექანიკური მომენტი რომ გამოიწვიოს მაქსიმალური დენური დაცვის ამოქმედება, მაშინაც კი როდესაც რელეში ფუნდამენტალური სიხშირის დენი არ არსებობს. ციფრული დაცვის რელეებმა შესაძლოა იმუშაონ დენისა და ძაბვის გარდამავალ მნიშვნელობებზეც (და არა მხოლოდ მოქმედ მნიშვნელობებზე). ხშირად ქსელში წარმოქმნილი ჰარმონიკები ხასიათდებიან დიდი ამპლიტუდით, მაგრამ მცირე ხანგრძლივობით. ციფრულ დაცვებში ასეთმა ჰარმონიკულმა გარდამავალმა პროცესმა შეიძლება გამოიწვიოს მათი არასწორი ამუშავება.

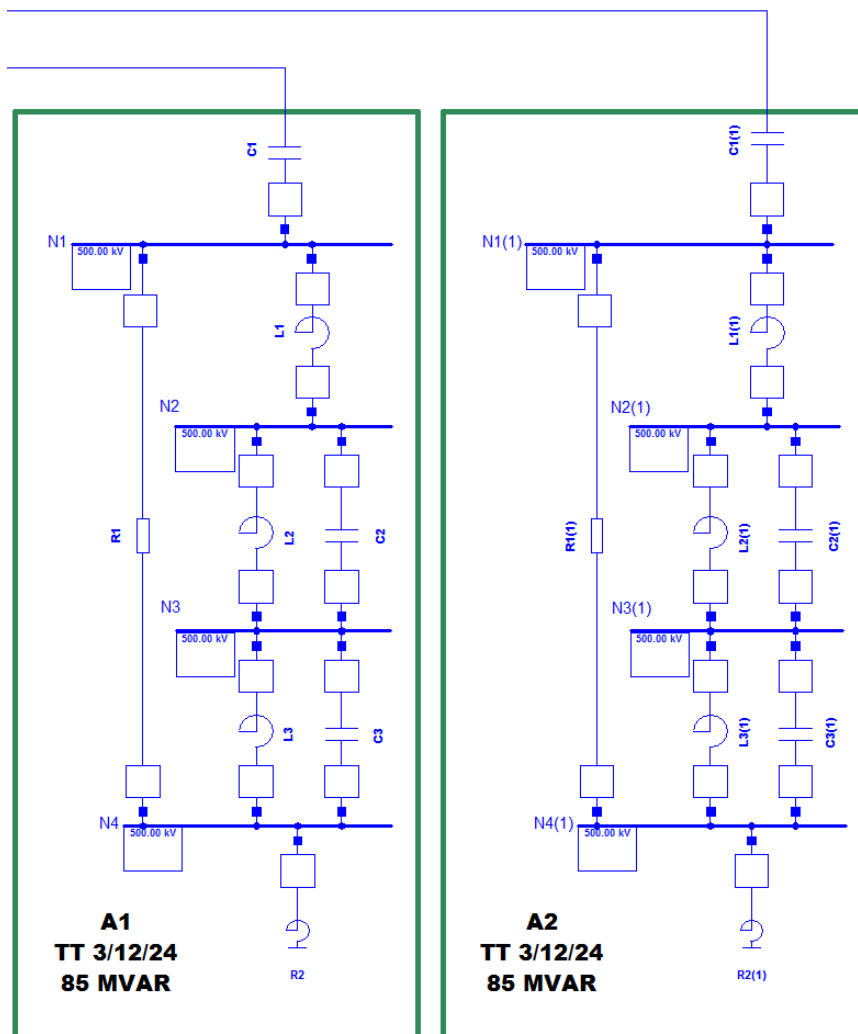
რელეების მწარმოებლები ყოველთვის ცდილობენ რელეები დაამზადონ ისეთი სახით, რომ ისინი ნაკლებად მგრძნობიარენი იყონ

ჰარმონიკების მიმართ. მიუხედავად ამისა დღეისათვის არსებული რეგულაციების უმეტესობა მაინც არ არის აღჭურვილი ამ დადებითი თვისებით. მძლავრი ტრანსფორმატორის დიფერენციალური რეგულაციები აუცილებლად უნდა იყოს აღჭურვილი დამატებითი წრედით რომელიც გამოირიცხავს მის მცდარ მუშაობას ჰარმონიკული დენების გამო. ტრანსფორმატორის ჩართვისას დარტყმის დენი შეიცავს საკმაოდ დიდი ამპლიტუდის მქონე მეორე რიგის ჰარმონიკას. ზემოთ აღნიშნული დამატებითი ჰარმონიკული წრედი შეიგრძნობს დენში ჰარმონიკულ შემადგენლობას და არ მისცემს დიფერენციალურ რეგულაციას არასწორად მუშაობის შესაძლებლობას.

სატელეკომუნიკაციო მოწყობილობები. ჰარმონიკები ადვილობრივ სატელეფონო და კავშირგაბმულობის სისტემებში იწვევენ ხელშეშლებს. ჰარმონიკული დენებისა და ძაბვების წარმოქმნისას აგრეთვე წარმოიქმნება შესაბამისი სიხშირის მაგნიტური და ელექტრული ველები. აღნიშნული ველები კი აინდუქცირებენ დენებსა და ძაბვებს მეზობელ სატელეფონო კავშირის სისტემებში. დაინდუქცირებული, არასასურველი ველები ადვილად იწვევენ ხელშეშლას სატელეკომუნიკაციო კავშირებში და იწვევენ როგორც სატელეფონო კომპანიის ასევე მისი მომხმარებლების გაღიზიანებას. შედარებით დაბალი სიხშირის ჰარმონიკები (მე-10 რიგზე დაბალი) ვერ ახდენენ მნიშვნელოვან ზეგავლენას სატელეფონო სისტემებზე. ძირითად ხელშეშლას იწვევენ მე-15-დან მე-60 რიგის ჩათვლით მქონე ჰარმონიკები, რადგან მათი სიხშირე ემთხვევა იმ აუდიო სიხშირეების დიაპაზონს რომელსაც იყენებს სატელეფონო სისტემა. ჰარმონიკების უარყოფითი გავლენის შემცირება შესაძლებელია სატელეფონო მოწყობილობების შესაბამისი ეკრანირებით ან ჰარმონიკების ფილტრაციით. თუმცა, ეკრანირება და ფილტრაცია როგორც წესი საკმაოდ ძვირი ჯდება და თუ ისინი აუცილებლობას არ წარმოადგენენ მათ არ იყენებენ.

5.5 ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გათვალისწინებით

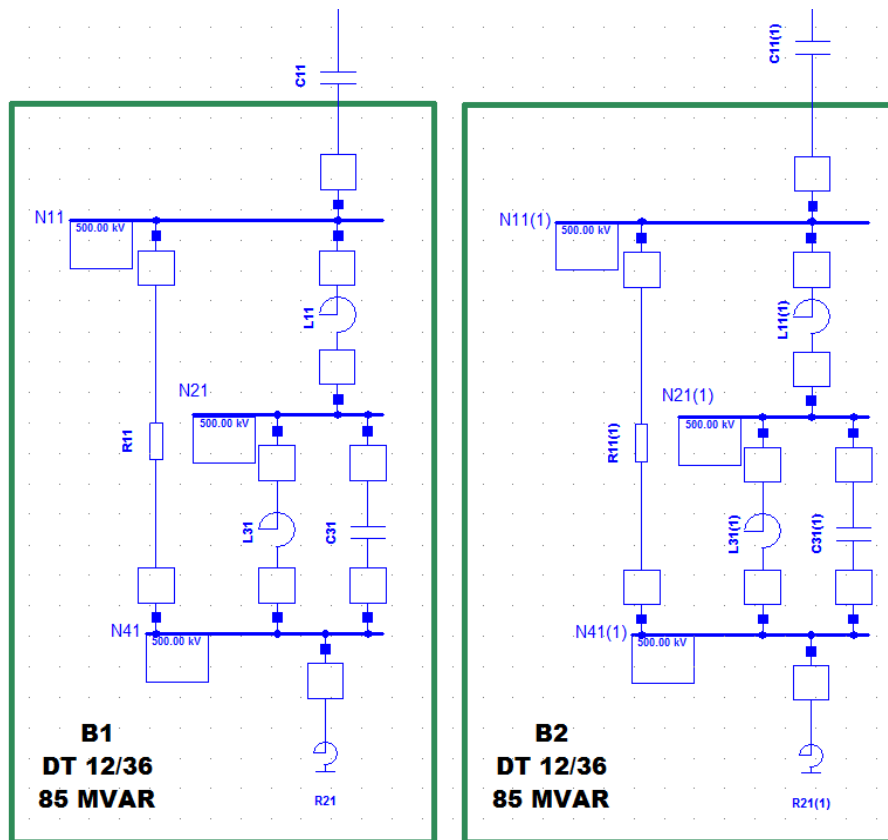
ჰარმონიკული ანალიზისთვის შეირჩა საქართველოს ელექტროსისტემის 2013 წლის ზამთრის ერთერთი რეჟიმი. ახალციხის ქვესადგურში არსებული მუდმივი დენის ჩანართი დამონტაჟებულ იქნა კომპანია „SIEMENS“-ის მიერ. მათივე რეკომენდაციაში ქართული მხარის მიმართ შედიოდა ცვლადი ძაბვის ფილტრების შემადგენლობა, რომელთაგან თითოეული ახშობს კონკრეტული რიგის ჰარმონიკას და ამით უზრუნველყოფენ ჩანართზე სხვადასხვა სიმძლავრის გადადინების შემთხვევაში ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონის სასურველ ფარგლებში არსებობას.



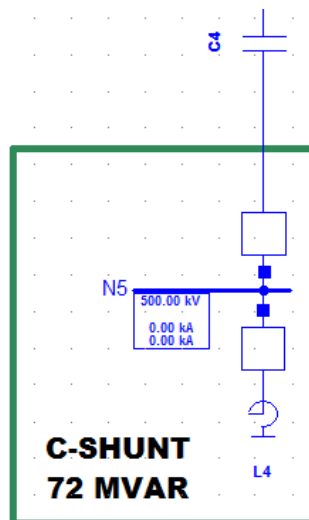
ნახ. 72 A1-A2 ცვლადი ძაბვის ფილტრების მოდელი DIGSILENT-ში

ნახ. 72-ზე ნაჩვენებია A1-A2 ცვლადი ძაბვის ფილტრების სრული მოდელი პროგრამა **DIGSILENT Powerfactory**-სთვის.

ნახ. 73 და 74-ზე ნაჩვენებია შესაბამისად B1-B2 და C ცვლადი ძაბვის ფილტრების სრული მოდელები პროგრამა DIGSILENT-ში.



ნახ. 73 B1-B2 ცვლადი ძაბვის ფილტრების მოდელი DIGSILENT-ში



ნახ. 74 C ცვლადი ძაბვის ფილტრის მოდელი DIGSILENT-ში

ცხრილ 25-ში მოცემულია ზემოთ აღნიშნული ფილტრების პარამეტრები.

ფილტრების პარამეტრები	ფილტრების ტიპი		
	A	B	C
დადგმული სიმძლავრე, მგვარ	85	85	72
$R_1 - R_{1(1)}$, ომი	1200		
$R_{11} - R_{11(1)}$, ომი		800	
$L_1 - L_{1(1)}$, მჰნ	32.43		
$L_{11} - L_{11(1)}$, მჰნ		17.16	
L_4 , მჰნ			1.127
$L_2 - L_{2(1)}$, მჰნ	154.79		
$L_{21} - L_{21(1)}$, მჰნ		28.31	
$L_3 - L_{3(1)}$, მჰნ	23.39		
$C_1 - C_{1(1)}$, ჰფ	1.056		
$C_{11} - C_{11(1)}$, ჰფ		1.077	
C_4 , ჰფ			0.916
$C_2 - C_{2(1)}$, ჰფ	6.156		
$C_{21} - C_{21(1)}$, ჰფ		1.074	
$C_3 - C_{3(1)}$, ჰფ	1.63		

ცხრ. 25 ახალციხის ქვესადგურში არსებული ცვლადი ძაბვის
ფილტრების პარამეტრები

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 ეგს „მუხრანით“ შემოსული იმპორტისა.

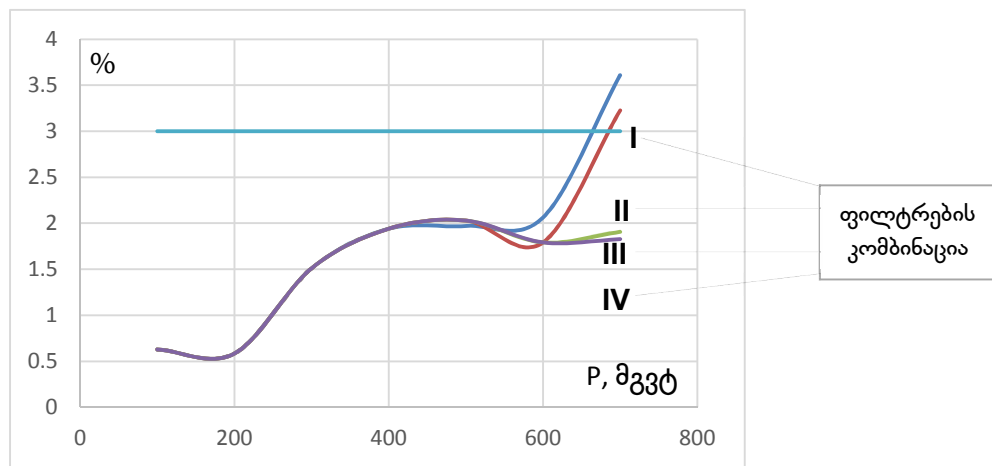
ცხრილ 26-ში ნაჩვენებია ჩანართში გამავალი სიმძლავრის თითოეული სიდიდისთვის ცვლადი ძაბვის ფილტრების რეკომენდებული შემადგენლობა.

ჩართული ბლოკების რაოდენობა	სიმძლავრის ჯამური გადადინება ჩანართ(ებ)ზე, მგვტ	ჩართული ფილტრების კომბინაცია
1	100	A1
1	200	A1+B1
1	300	A1+B1
2	400	A1+B1
2	500	1) A1+A2+B1 2) A1+ B1+B2
2	600	1) A1+A2+B1 2) A1+ B1+B2
2	700	1) A1+A2+B1+B2 2) A1+ B1+B2+C 3) A1+A2+B1+C 4) A1+A2+B1+B2+C

ცხრ. 26 ცვლადი ძაბვის ფილტრების ჩართვის კომბინაცია ქ/ს ახალციხეში

ნახ. 75-ზე ნაჩვენებია ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების სიდიდის დამოკიდებულება მუდმივი დენის ჩანართით

გამავალი სიმძლავრის სიდიდებზე. ლურჯი ხაზით ნაჩვენებია შესაბამისი რიგის ჰარმონიკის დასაშვები დონე. ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართზე 400-დან 600 მგვტ-ის ჩათვლით გადადინებისას ფილტრების ორ-ორი კომბინაციაა, 700 მგვტ-ზე კი ოთხი. 600 მგვტ-ის ჩათვლით ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონე დასაშვებ ფარგლებშია ფილტრების ორივე, 700 მგვტ-ზე კი მესამე და მეოთხე შემადგენლობისას. 200-დან 500 მგვტ-მდე ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონის შედარებითი ზრდა აიხსნება იმით, რომ ამ დიაპაზონში ჩანართზე გადადინების ზრდის პარალელურად ახალციხის სალტებზე ჩართული ფილტრების შემადგენლობა არ იცვლება (ცხრ. 26).



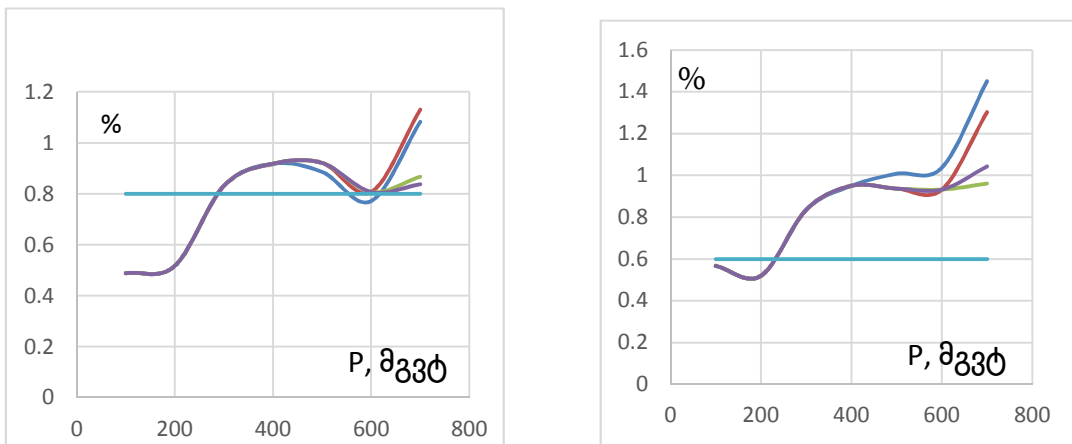
ნახ. 75 ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ახალციხის 500 კვ-იან სალტებზე

თითოეულ ეტაპზე (100-700 მგვტ) საქართველოს 500 კვ-იან სალტებზე ჩართული იყო რეაქტორების შემდეგი შემადგენლობა (ცხრილი 27).

რეაქტორები	გადადინება ჩანართზე, მგვტ						
	100	200	300	400	500	600	700
ენგური	x	x	x				
ზესტაფონი					x		
ქსანი	x	x	x				x
ვარდაბანი	x	x	x	x	x		

ცხრ. 27 ჩართული რეაქტორების კომბინაცია სიმძლავრის მთელ დიაპაზონში

განხილულ იქნა ახალციხის 500 კვ-იან სალტეზე ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების თითოეული შემდგენის სიდიდეც. საქართველოს სისტემაში არსებობენ მომხმარებლები, რომელთათვისაც აუცილებელია კონკრეტული რიგის ჰარმონიკის დასაშვებ ფარგლებში ყოფნა. ამდენად, მიზანშეწონილია გაანგარიშებულ იქნას თითოეული რიგის ჰარმონიკა. ნახ. 76-ზე მოცემულია იმ რიგის ჰარმონიკები, რომელთა სიდიდეებიც ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართზე სიმძლავრის 100-700 მგვტ-ის დიაპაზონში ერთ ეტაპზე მაინც გაცდნენ დასაშვებ ზღვრებს. ესენია მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები.



**ნახ. 76 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები
ახალციხის 500 კვ-იან სალტეზე**

მუდმივი დენის ჩანართზე 300 მგვტ და მეტის გადაღინებისას დასაშვებ ზღვრებს ცდება ორივე რიგის ჰარმონიკა. შემდეგ ეტაპზე რეკომენდებულია შემუშავდეს ისეთი ფილტრები, რომლებიც შეზღუდავენ ზემოთხსენებულ ორი რიგის ჰარმონიკას.

§5.6 ჰარმონიკების კონტროლი

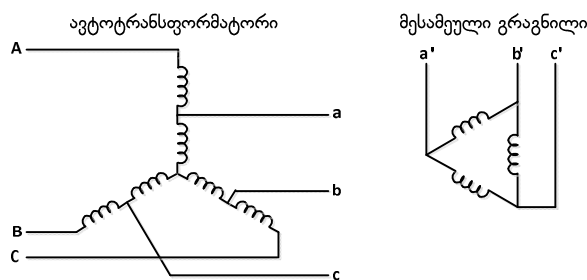
ჰარმონიკების გავრცელებისა და მათი უარყოფითი გავლენის შესამცირებლად არსებობს ბევრი მეთოდი. მაგალითად, დაინდუქციური ჰარმონიკული დენებისა და ძაბვების ზემოქმედებისგან თავიდან აცილების მიზნით სატელეკომუნიკაციო მონწყობილობები ხშირად ეკრანირებულია.

ამგვარ მეთოდებს ასევე წარმოადგენს სამუაზა ტრანსფორმატორის მესამეული გრაგნილის სამკუთხედად შეერთება, ჰარმონიკების უშუალო ფილტრაცია და ა.შ.

სამკუთხედად შეერთებული მესამეული გრაგნილები

სამკუთხედად შეერთებული გრაგნილების მქონე სამუაზა ტრანსფორმატორებს გააჩნიათ სპეციალური თვისება, რაც მათ საშუალებას აძლევს დიდი წვლილი იქონიონ სისტემის ჰარმონიკების კონტროლში. სამკუთხედად შეერთებული გრაგნილები ბუნებრივად ახშობენ სამის ჯერადი რიგის ჰარმონიკებს. ეს ჰარმონიკებია: მე-3, მე-6, მე-9, მე-12 და ა.შ. სამუაზა სისტემის ძაბვები ერთმანეთისგან დაძრულნი არიან 120 გრადუსით. მესამე რიგის ჰარმონიკები კი, თაზით ემთხვევიან ერთმანეთს. როდესაც სამკუთხედად ჩართულ გრაგნილზე მოდებულია სამი ერთი და იგივე თაზის მქონე ძაბვა, ისინი პრაქტიკულად ექცევიან “ხაფანგში”, რადგან მათი წყაროში დაბრუნების გზა განწყვეტილია.

77-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ავტოტრანსფორმატორი სამკუთხედად შეერთებული მესამეული გრაგნილით. ასეთი გრაგნილი მესამე რიგის ჰარმონიკებს მოიმწყდევს თავის თავში და აღარ აძლევს მათ სისტემაში შეჭრის საშუალებას.



ნახ. 77 ავტოტრანსფორმატორი მესამეული გრაგნილით

მესამე რიგის ჰარმონიკები ყველაზე მეტად სახიფათოა ელექტრული სისტემის ელემენტებისთვის, რადგან უფრო მაღალი რიგებისთვის, მათი გავლენა სისტემაზე ძირითადად მცირდება.

ჰარმონიკების ფილტრაცია

მარტივი ჰარმონიკული ფილტრი ნაჩვენებია ნახაზ 78-ზე. ეს კონკრეტული ფილტრი არის მიმდევრობით შეერთებული კოჭის, კონდენსატორისა და აქტიური წინალობის კომბინაცია. ფილტრების გათვლა ხდება იმ ლოგიკით, რომ მათი სრული წინალობა წინასწარ ცნობილ ჩასახშობ სიხშირეზე (ან სიხშირეებზე) იყოს დაბალი. რეგულირება ამა თუ იმ სიხშირეზე შესაძლოა მიღწეულ იქნეს როგორც ინდუქციურობის ასევე ტევადობის სიდიდის რეგულირებით. თუმცა, ძირითად შემთხვევებში ახდენენ ტევადობის რეგულირებას.



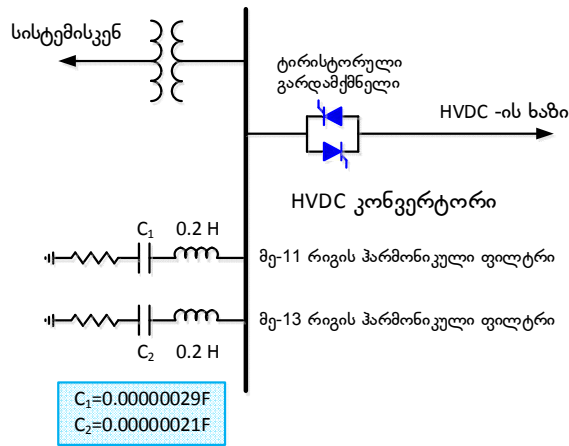
რეზონანსული სიხშირე

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ნახ. 78 ჰარმონიკული ფილტრი

ინდუქციურობა და კოჭა არის ელემენტები, რომელთა წინალობა დამოკიდებულია სიხშირეზე. ამასთან ინდუქციური წინალობა სიხშირის გაზრდით იზრდება, ხოლო ტევადური – პირიქით. აქედან გამომდინარე მიმდევრობით შეერთებული ნებისმიერი სიდიდის ინდუქციურობისა და ტევადობისათვის იარსებებს ისეთი სიხშირე, რომელზეც ინდუქციური წინალობა გაუტოლდება ტევადურს. ასეთ შემთხვევაში წრედის სრული წინალობა შემცირდება წრედში არსებული აქტიური წინალობის სიდიდემდე. სიხშირეს, რომელზეც აღნიშნული წრედის სრული წინალობა მინიმალურია (ანუ ხდება მხოლოდ აქტიური წინალობის ტოლი), რეზონანსულ სიხშირეს უწოდებენ. განვიხილოთ მარტივი მაგალითი, რომელიც უფრო ნათლად წარმოაჩენს ზემოთ განხილული ტიპის ფილტრის გამოყენების არსს. 79-ე ნახაზზე ნაჩვენებია HVDC კონვერტორის გამარტივებული ცალხაზოვანი

დიაგრამა. ჩავთვალოთ რომ კონვერტორი არის მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების წყარო.



ნახ. 79 HVDC კონვერტორი მარტივი ფილტრებით

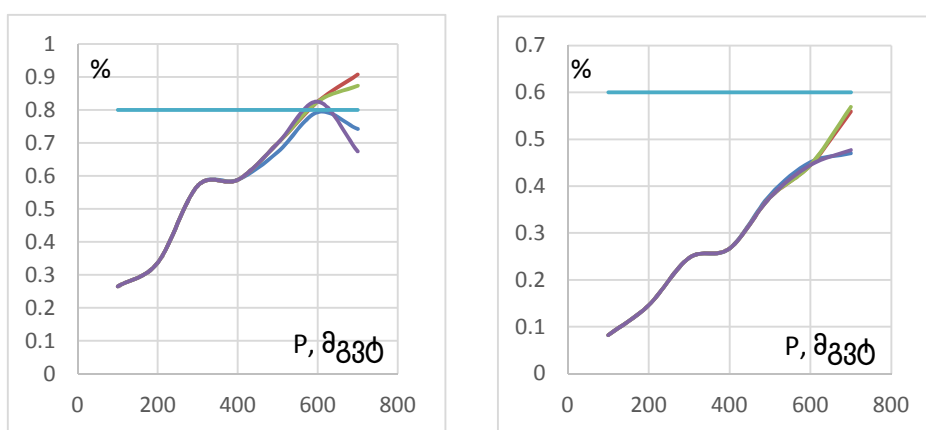
დავუშვათ, რომ ორივე ფილტრს გააჩნია 0.2 ჰენრის ტოლი ფიქსირებული ინდუქციურობა. თითოეული ფილტრისთვის ტევადობის სიდიდის გამოსათვლელად უნდა გამოვიყენოთ 78-ე ნახაზე ნაჩვენები რეზონანსული სიხშირის ფორმულა. ერთ-ერთი ფილტრის ტევადობის სიდიდე შერჩეულ უნდა იქნეს მე-11 რიგის ჰარმონიკისთვის (550 ჰც), ხოლო მეორისა – მე-13 რიგისთვის (650 ჰც). ორივე კონდენსატორის ტევადობები უკვე გამოთვლილი სახით 79-ე ნახაზზეა ნაჩვენები.

აღნიშნული ფილტრების ინსტალაციის შემდეგ HVDC კონვერტორის მიერ წარმოქმნილი მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები სისტემაში ვეღარ შეაღწევენ, რადგან ფილტრები ამ სიხშირეებისთვის ძალიან დაბალი წინაღობის არხებს წარმოადგენენ. განხილული ფილტრები HVDC კონვერტორებში ყველაზე ძირითადია. ზოგადად ნებისმერი ცვლადი ძაბვის ფილტრი რომელიც შეიძლება შეგვხვდეს კონვერტორულ ქვესადგურში გამოიყენება ენერჯის კონვერსიის პროცესში წარმოქმნილი ჰარმონიკების დასაშვებ დონემდე შესამცირებლად. წინააღმდეგ შემთხვევაში ჰარმონიკები მოხვდებიან ელექტრულ სისტემაში შეიძლება გამოიწვიონ სისტემის ელემენტების რაიმე სახის დაზიანება.

§5.7 ფილტრების შერჩევა მე-11 და მე-13 რიგის

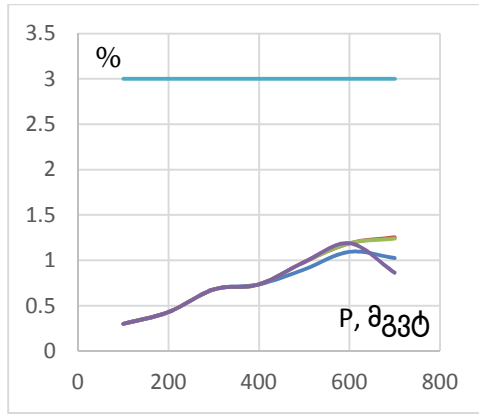
ჰარმონიკების ჩასახშობად

ანალიზისათვის შერჩა ფილტრი სიმძლავრით 55 მგვარ და სიხშირით 630 ჰც, რაც ნიშნავს, რომ იგი შედარებით მკვეთრად ჩაახშობს მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკებს. წინამდებარესთან შედარებით შერჩეულ რეჟიმში იყო მხოლოდ ერთი განსხვავება: 600 მგვტ-ის ტოლი ექსპორტის დროს ფილტრების პირველი კომბინაციის შემთხვევაში შერჩეული დამატებითი ფილტრის ჩართვით სისტემაში ძაბვები მნიშვნელოვნად გაიზარდა, რის გამოც ქსანში ჩართული იქნა რეაქტორი. მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 80-ზე. მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე დასაშვებ ფარგლებში მოექცა სიმძლავრის მთელი დიაპაზონის დროს. შეზღუდვა ფილტრების რომელიმე კომბინაციის გამოყენებაზე არ არსებობს, რადგანაც ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების სიდიდე დასაშვებ ფარგლებშია ფილტრების ნებისმიერი კომბინაციის დროს სიმძლავრის მთელ დიაპაზონში. ამდენად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მე-11 რიგის ჰარმონიკაც მოექცევა დასაშვებ ზღვრებში, თუ თურქეთში 600 მგვტ-ის ექსპორტის დროს ახალციხეში ჩართული იქნება ფილტრების პირველი კომბინაცია ($A1+A2+B1$).



ნახ. 80 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხის

500 კვ-იან სალტემზე



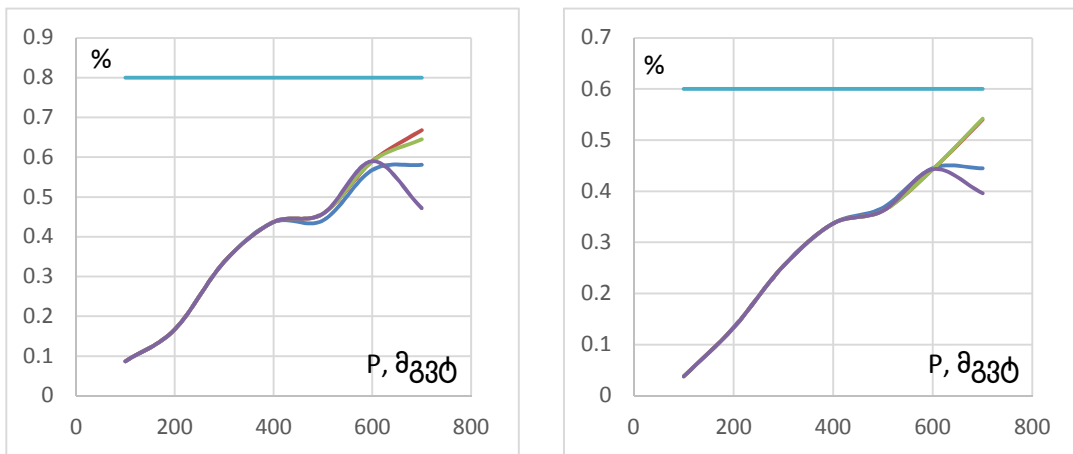
ნახ. 81 ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ახალციხის 500 კვ-იან სალტეზე

ნახ. 81-ზე ნაჩვენებია ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ახალციხის სალტეზე დამატებითი ფილტრის გათვალისწინებით. როგორც ჩანს, აღნიშნული სიდიდე დასაშვებ ფარგლებშია სიმძლავრის მთელი დიაპაზონის (100-700 მგვტ) და ფილტრების ნებისმიერი კომბინაციის დროს.

§5.8 ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემაში ახალციხის და ალავერდის ჩანართების არსებობისას

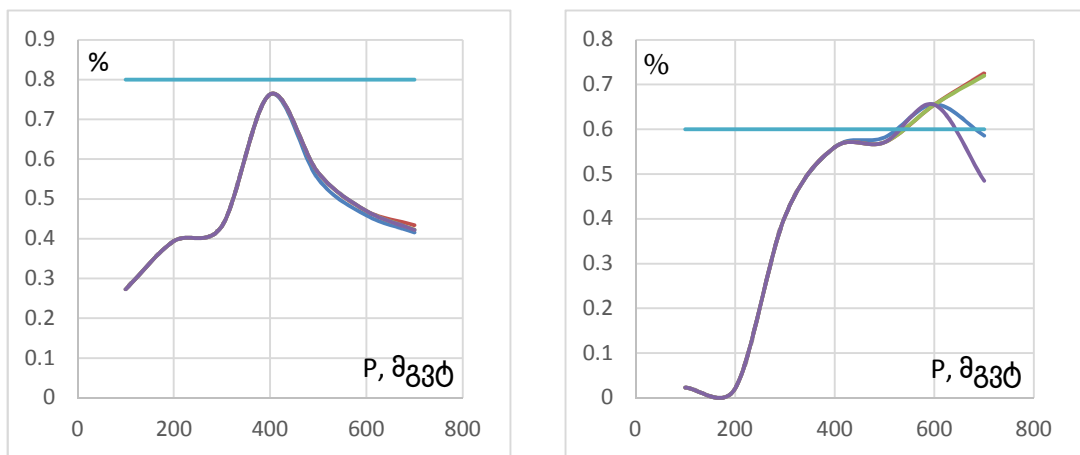
ახლო მომავალში საქართველოს სისტემა თურქეთის სისტემასთან კავშირის პარალელურად შესაძლოა სომხეთის სისტემასაც დაუკავშირდნენ ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართით, რომელიც დაიდგმება ალავერდის ქვესადგურში. სწორედ ამიტომ საჭიროა შესწავლილ იქნას ჰარმონიკების სიდიდეებზე ალავერდის მუდმივი დენის ჩანართის ზეგავლენაც. მსგავსად აზერბაიჯანის სისტემიდან სიმძლავრის იმპორტისა, ამ შემთხვევაშიც სომხეთის სისტემიდან იმპორტირებული სიმძლავრე მთლიანად გადიოდა თურქეთის სისტემაში ექსპორტით, $P_{\text{იმპ.სომხ.}} = P_{\text{ექს.თურქ.}}$ ამ შემთხვევაშიც იმპორტის, ისევე როგორც ექსპორტის სიდიდე ვცვალებთ 100-დან 700 მგვტ-მდე და ჩავატარებთ ჰარმონიკული ანალიზი.

ნახ. 82-ზე ნაჩვენებია ჰარმონიკის ის რიგები, რომელთა სიდიდეები დასაშვებ ზღვრებს ცდებოდნენ ზემოთ განხილულ შემთხვევებში. ალავერდშიც ფილტრები ჩართულია ახალციხის ლოგიკით (ცხრ. 26). როგორც ვხედავთ, ორივე რიგის ჰარმონიკის სიდიდე დასაშვებ ფარგლებშია 100-700 მგვტ-ის მთელ დიაპაზონში. რაც შეეხება ჯამურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას, მისი სიდიდე წინა შემთხვევის მსგავსად, 1%-ის ფარგლებშია.



**ნახ. 82 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები
ახალციხის 500 კვ-იან სალტეზე**

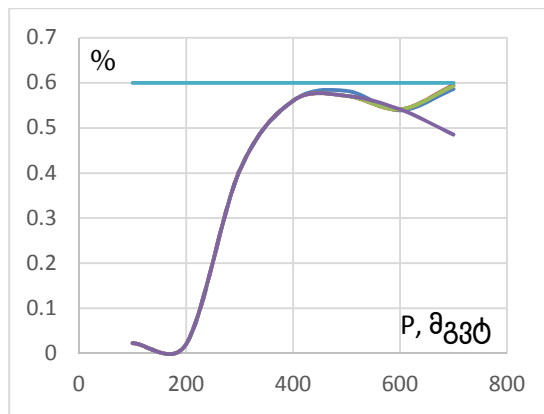
ამჯერად შევამოწმოთ ჰარმონიკების სიდიდეები მარნეულში, სადაც ალავერდის მუდმივი დენის ჩანართით შემოვა სიმძლავრე სომხეთის სისტემიდან.



**ნახ. 83 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები
მარნეულის 500 კვ-იან სალტეზე**

ნახ. 83-ზე ნაჩვენებია ნაჩვენებია მარნეული-500-ის სალტეზე მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების სიდიდების დამოკიდებულება ახალციხის და ალავერდის ჩანართებზე სიმძლავრის 100-დან 700-მგვტ-ის ჩათვლით ცვლილებისას. როგორც ვხედავთ, ზღვარს მხოლოდ მე-13 რიგის ჰარმონიკა ცდება ჩანართებზე 600 და 700 მგვტ-ის გადაღინებისას.

შერჩეულ იქნა 25 მგვარ სიმძლავრის ფილტრი სიხშირით 580 ჰც და განხილულ იქნა 600 და 700 მგვტ-ის ის შემთხვევები, როცა მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე სცდებოდა დასაშვებ ფარგლებს - 600 მგვტ-ისას ფილტრების ორივე კომბინაცია ($A1+A2+B1$ და $A1+B1+B2$), 700 მგვტ-ისთვის - ფილტრების II და III კომბინაცია ($A1+ B1+B2+C$ და $A1+A2+B1+C$). მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 84-ზე.



ნახ. 84 მე-13 რიგის ჰარმონიკა მარნეულის 500 კვ-იან სალტეზე

როგორც ჩანს, მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე დასაშვებ ფარგლებში ექცევა სიმძლავრის მთელი დიაპაზონის და ფილტრების ნებისმიერი კომბინაციის შემთხვევაში. რაც შეეხება ჯამურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას, მისი სიდიდე წინა შემთხვევის მსგავსად, 1%-ის ფარგლებშია.

დასკვნა:

- ❖ ახალციხეში სიმენსის მიერ დამონტაჟებული ფილტრების შესაბამისი კომბინაციები უზრუნველყოფენ ახალციხეში ჯამური ჰარმონიკული

დამახინჯების სიდიდის დასაშვებ ფარგლებში არსებობას. თუმცა 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. ამასთან, თუ შემდგომში მნიშვნელოვანი იქნება მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე, მაშინ რეკომენდებულია 600 მგვტ-ის დროს ახალციხეში ჩართული იყოს ფილტრების I კომბინაცია (A1+A2+B1);

❖ საქართველოს სისტემასთან ალავერდის მუდმივი დენის ჩანართის კავშირის შემთხვევაში ფილტრების შერჩევა ალავერდის ქ/ს-ში იგივე ლოგიკით, როგორც ახალციხეში, უზრუნველყოფს ახალციხეში ყველა რიგის ჰარმონიკის, ისევე როგორც ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების სიდიდის დასაშვებ ფარგლებში არსებობას. რაც შეეხება ჰარმონიკების სიდიდეებს მარნეულში, პრობლემას ამ შემთხვევაში წარმოადგენს მხოლოდ მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე 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.

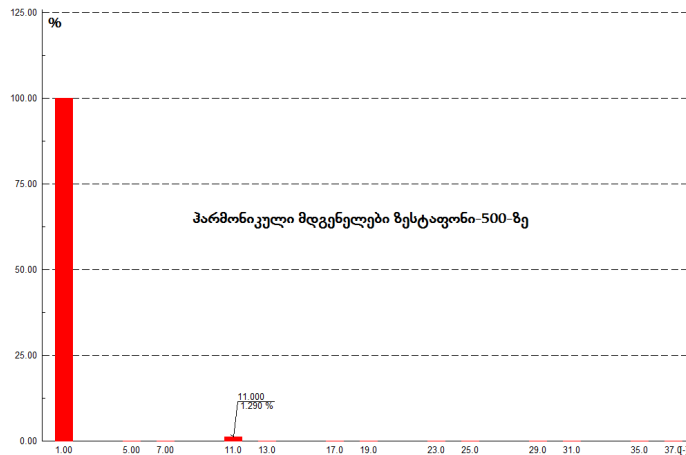
§5.9 ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს სისტემის

500 კვ-იანი ძაბვის ქსელში

ახალციხისა და მარნეულის მსგავსად, ჰარმონიკული ანალიზი ჩატარდა საქართველოს 500 კვ-იანი ქსელის დანარჩენ პუნქტებში. ანალიზისთვის შეირჩა თავდაპირველად განხილული რეჟიმი, სადაც საქართველოს სისტემას აქვს პარალელური სინქრონული კავშირი აზერბაიჯანის სისტემასთან 500 კვ-იანი ხაზით „მუხრანი“. თურქეთში გაცემული

სიმძლავრე და აზერბაიჯანიდან შემოსული სიმძლავრე ტოლია 700 მგვტ-ის. ამასთან, ახალციხეში ჩართული იყო ზემოთ შერჩეული დამატებითი ფილტრი: 55 მგვარ, 630 ჰც.

ნახ. 85-დან ჩანს, რომ მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ზესტაფონი-500-ის სალტეზე (1.29%) ცდება დასაშვებ ფარგლებს (0.8%), მაშინ როცა ახალციხეში იგივე რიგის ჰარმონიკის სიდიდე 0.674%-ია.



ნახ. 85 ჰარმონიკული მდგენელები ზესტაფონის 500 კვ-იან სალტეზე

აქედან გამომდინარე, სავარაუდოა, რომ ზესტაფონში მე-11 რიგის ჰარმონიკაზე - 550 ჰც-ზე აღვილი აქვს რეზონანსი. შევამოწმოთ რამდენად შეესაბამება ეს ყოველივე რეალობას.

§5.10 რეზონანსი ელექტრულ ქსელებში

ყველაზე მარტივი გზა რეზონანსის ვიზუალიზაციის და ადვილად აღქმისთვის ალბათ არის მუსიკალური ანალოგიის განხილვა. მაგალითად, თუ ავიღებთ ერთი და იგივე ნოტს ერთდროულად გიტარაზე და პიანინოზე, მაშინ ეს ორივე ნოტი ირხევა ერთი და იგივე სიხშირით და ჯამური ხმა უღერს წმინდად და ისმის როგორც ერთი ხმა. ანუ ისინი არიან რეზონანსში. თუ აღნიშნულთაგან რომელიმე ინსტრუმენტი არასწორად არის აწყობილი მაშინ ორი ერთი და იგივე ნოტის ზედდებით მიღებული ხმა უღერს

დამახინჯებულად, ანუ რეზონანსული მდგომარეობა ირღვევა და ხმაც მახინჯდება.

ელექტრული რეზონანსი მუსიკალურის მსგავსია. მაგრამ აქ გიტარის სიმების და პიანოს კლავიშების როლში გვევლინება ტევადური და ინდუქციური ელემენტები, რომლებიც რაღაც კონკრეტულ სიხშირეზე მოდიან რეზონანსში. როდესაც ხდება ელექტრული რეზონანსი, ქსელში ადგილი აქვს დიდი დენებისა მაღალი ძაბვების წარმოქმნას.

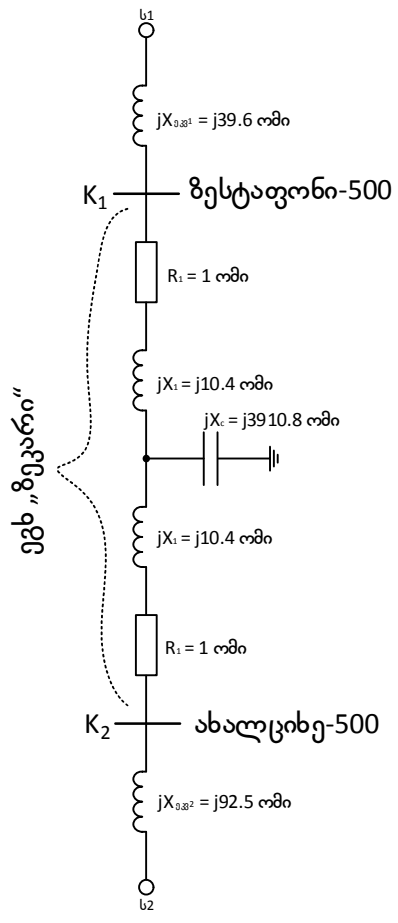
ელექტრული რეზონანსი ხშირად გამოიყენება სასურველი მიზნების მიღწევითვის. მაგალითად, კონკრეტული რადიოტალღის დაჭერა ხდება რადიომიმღებში ამ ტალღის სიხშირეზე რეზონანსული მდგომარეობის შექმნით (რადიოს ტუნიგის ტრიალით). ჩვენ განვიხილავთ იმ უარყოფით შედეგებს, რომელსაც ელექტრულ სისტემებში იწვევს რეზონანსული მოვლენები. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, სისტემაში რეზონანსმა შეიძლება გამოიწვიოს დიდი დენების წარმოქმნა რამაც თავის მხრივ შესაძლოა მიგვიყვანოს ელექტრული მონყობილობის თერმულ დაზიანებამდე. რეზონანსის დროს ასევე მოსალოდნელია ქსელში მაღალი ძაბვების წარმოქმნა, რაც ტრანსფორმატორების გულარების გაუღენთვისა და იზოლაციის გარღვევის ალბათობას ზრდის.

ძირითადად, ქსელში ელექტრული რეზონანსი ხდება მაშინ, როდესაც წრედის ტევადური წინაღობა უტოლდება ინდუქციურს. ასეთ დროს ეს ორი წინაღობა ერთმანეთს აბათილებს. ტევადობის სახით სისტემაში მრავალი ელემენტი გვევლინება: ხაზის ტევადობები (ფაზა-მინა და ფაზათაშორისი), მიმდევრობითი კონდენსატორები (გრძივი კომპენსაციისას) და შუნტური კონდენსატორები. ინდუქციურობის როლს კი შესაძლოა ასრულებდეს ჩამოთვლილთაგან რომელიმე, ან მათი ნებისმიერი კომბინაცია: ხაზის ინდუქციური წინაღობა, ტრანსფორმატორის რეაქტიული წინაღობები, მიმდევრობითი და შუნტური რეაქტორები და ა.შ. ელექტრულ ქსელში

ძირითადად გვხვდება ორი ტიპის რეზონანსი: მიმდევრობითი რეზონანსი და პარალელური რეზონანსი.

ეგზ „გეკარის“ შემონშება რეზონანსულ კონტურზე

წარმოვადგინოთ ზესტაფონისა და ახალციხის ეკვივალენტების და ეგზ „გეკარის“ ჩანაცვლების სქემა. თუ ვიყენებთ T-სებურ ჩანაცვლების სქემას, მაშინ მას ქსელის მოცემული უბნისთვის ექნება ნახ. 86-ზე ნაჩვენები სახე.



ნახ. 86 ზესტაფონი-500-გეკარი-ახალციხე-500-ის ჩანაცვლების სქემა

ეგზ „გეკარის“ პარამეტრებია:

$$R = 2.08 \text{ ომი}, X = 20.8 \text{ ომი}, B = 255.7 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ}$$

სამუგაზა მშ K_1 წერტილში (ზესტაფონი-500) გვაძლევს დენს $I_{1*} = 63$.

შესაბამისად, სისტემის ეკვივალენტური წინაღობა ამ წერტილის მიმართ იქნება:

$$X_{\text{გვ31}^*} = \frac{E}{I_{1^*}} = \frac{1}{63} = 0.0158$$

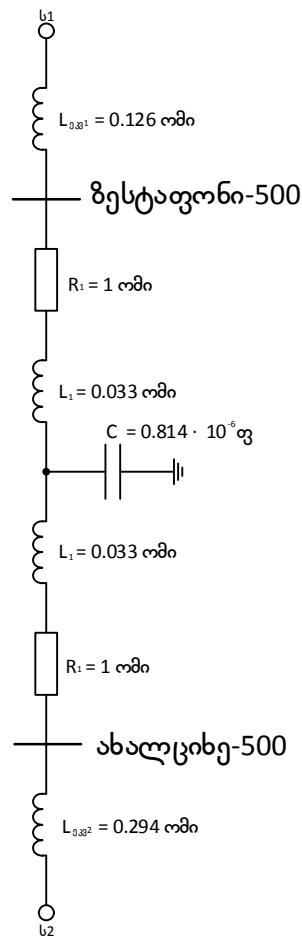
რეალურ ერთეულებში ანუ ომებში გვექნება:

$$X_{\text{გვ31}} = 0.0158 \cdot \frac{500^2}{100} = 39,6 \text{ ომი}$$

სამუაზა მშ K_2 წერტილში (ახალციხე-500) გვაძლევს დენს $I_{2^*} = 27$

$$X_{\text{გვ32}^*} = \frac{1}{27} = 0.037 \gg X_{\text{გვ32}} = 0.037 \cdot 2500 = 92.5 \text{ ომი}$$

გამოვსახოთ სქემა R, L, C პარამეტრებით (ნახ. 87).



ნახ. 87 ელექტრული ქსელის R-L-C პარამეტრებია

გესტაფონი-500-გეკარი-ახალციხე-500 უბანი

“გეკარის” პარამეტრებია:

$$R_1 = 1 \text{ ომი}$$

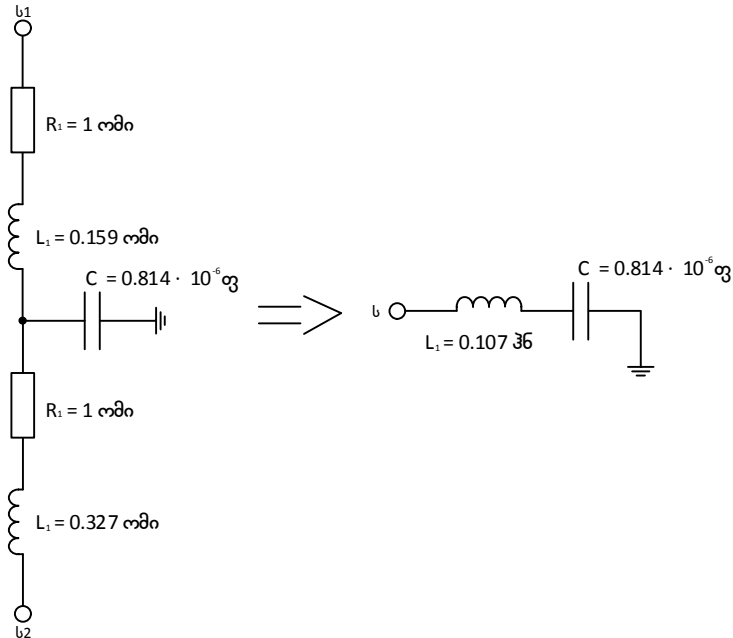
$$L_1 = \frac{10,4}{314} = 0,033 \text{ ჰზ}$$

$$C = \frac{255,7 \cdot 10^{-6}}{314} = 0.814 \cdot 10^{-6} \text{ ფ}$$

ზესტაფონისა და ახალციხის ეკვივალენტების ინდუქციურობები იქნება:

$$L_{\text{გვ33}^1} = \frac{39,6}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.126 \text{ ჰჰ}$$

$$L_{\text{გვ33}^2} = \frac{92,5}{3.14} = 0.294 \text{ ჰჰ}$$



ნახ. 88 R-L-C პარამეტრებიანი ზესტაფონი-500-გეკარი-ახალციხე-500 უბნის გამარტივებული სქემა

რადგან $R \ll \omega L$, შეგვიძლია ჩავთვალოთ $R = 0$

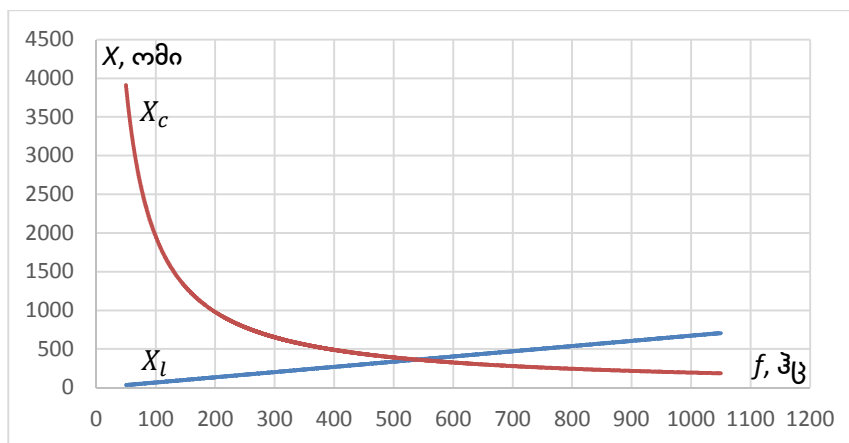
$$L_{\text{გვ33}} = \frac{0.159 \cdot 0.327}{0.159 + 0.327} = 0.107 \text{ ჰჰ}$$

საბოლოოდ სქემა დავა მიმდევრობით ჩართულ L-C პარამეტრებზე (ნახ. 88).

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

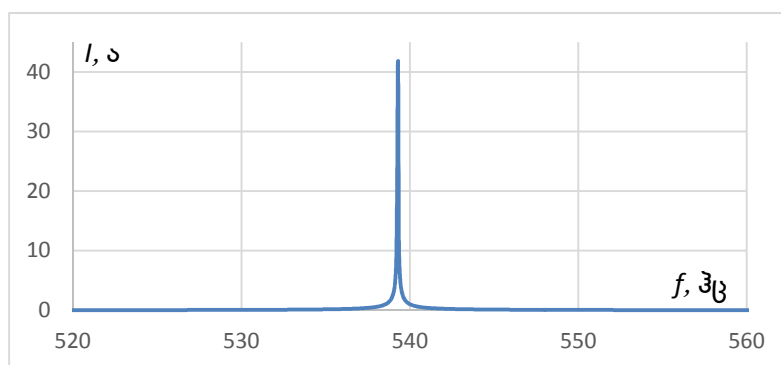
$$f = \sqrt{\frac{1}{LC}} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{10^3}{1.853} = 539.5 \text{ ჰც}$$

როგორც ვხედავთ, რეზონანსი მყარდება პრაქტიკულად მე-11 რიგის ჰარმონიკაზე. ეს ჩანს ნახ. 89 და ნახ. 90-დანაც.



ნახ. 89 ზესტაფონი-ახალიციხის რეზონანსული კონტურის რეაქტიული წინააღობები

სიხშირის ზრდის პარალელურად X_l უახლოვდება X_c -ს, დაახლოებით 539 კჰ-ზე მყარდება რეზონანსი (ნახ. 90).

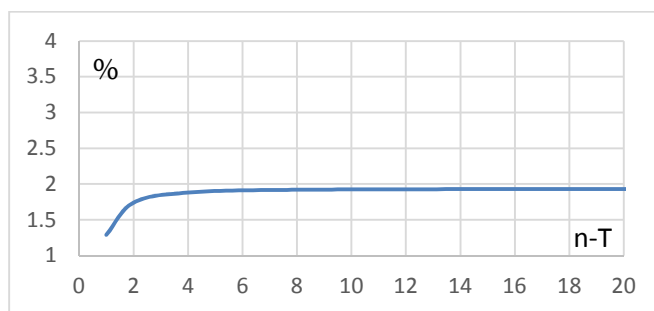


ნახ. 90 ზესტაფონი-ახალიციხის რეზონანსულ კონტურში გამავალი დენი

აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტის გზად განვიხილეთ განვიხილოთ ეგზ „ზეკარისა“ და დანარჩენი 500 კვ ძაბვის ხაზების განაწილებული პარამეტრებით წარმოდგენა და განმეორებითი ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარება. ქვემოთ ცხრილ #28-ში მოცემულია 11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ზესტაფონი-500-ში „ზეკარის“ პარამეტრების განაწილების სხვადასხვა რიგის შემთხვევაში.

პარამეტრების განაწილების რიგი	მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე, %
1-T	1.29
2-T	1.74
4-T	1.88
8-T	1.92
16-T	1.929
პროგრამის მიერ განაწილებული პარამეტრებით	1.938

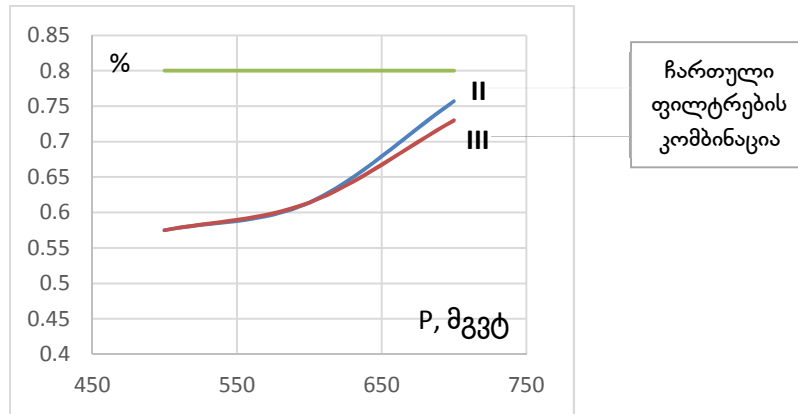
ცხრ. 28 ზესტაფონი-500-ში მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდის დამოკიდებულება „ზეკარის“ პარამეტრების განაწილების რიგზე



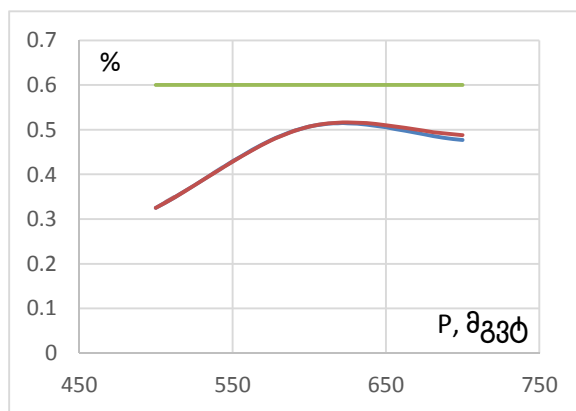
ნახ. 91 ზესტაფონში-500-ში მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდის დამოკიდებულება „ზეკარის“ პარამეტრების განაწილების რიგზე

როგორც ნახ. 91-დან ჩანს, პროგრამის მიერ პარამეტრების განაწილება იძლევა რეალურ სურათს. ამდენად, მიზანშეწონილია ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარებისას იმ ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზები, რომელზეც განიხილება ანალიზი, წარმოდგენილ იქნას განაწილებული პარამეტრებით.

ნახ. 92-სა და 93-ზე ნაჩვენებია მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ახალციხეში 500, 600 (ფილტრების II კომბინაცია) და 700 მგვტ (ფილტრების II და III კომბინაცია) ექსპორტისას თურქეთში.

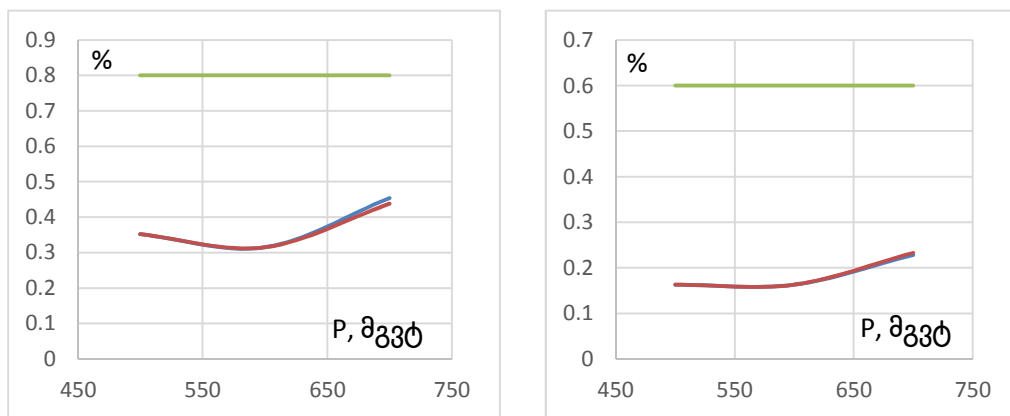


ნახ. 92 მე-11 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ახალციხე-500-ში



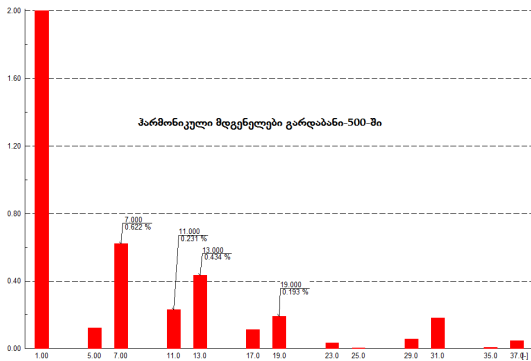
ნახ. 93 მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ახალციხე-500-ში

ნახ. 94-ზე ნაჩვენებია მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ზესტაფონში 500, 600 (ფილტრების II კომბინაცია) და 700 მგვტ (ფილტრების II და III კომბინაცია) ექსპორტისას თურქეთში. როგორც ვხედავთ ზესტაფონშიც და ახალციხეშიც ორივე რიგის ჰარმონიკის სიდიდე დასაშვებ თარგლებშია.

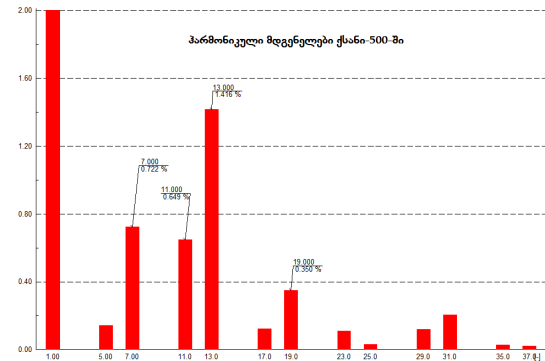


ნახ. 94 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკის სიდიდე ზესტაფონი-500-ში

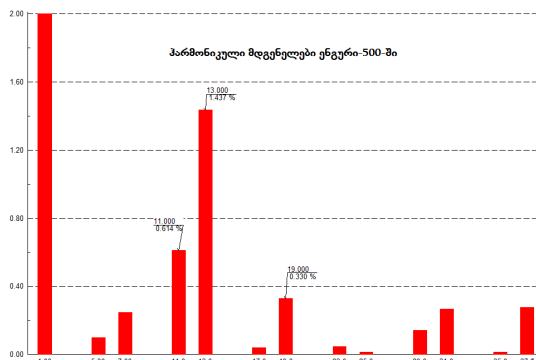
განვიხილოთ ჰარმონიკული ანალიზი დანარჩენ 500 კვ-იან ქსელში - გარდაბანი-500-ზე, ქსანი-500-სა და ენგური-500-ზე. როგორც ზემოთ ნახაზებზე ჩანს, ჰარმონიკული მდგენელების სიდიდე იზრდება 700 მგვტ-ის ექსპორტისას თურქეთში. ამიტომ ჰარმონიკული ანალიზისას შეირჩა ეს რეჟიმი. ნახ. 95, 96 და 97-ზე ნაჩვენებია ჰარმონიკული მდგენელები შესაბამისად გარდაბანში, ქსანში და ენგურში.



ნახ. 95 ჰარმონიკული მდგენელები გარდაბანი-500-ში



ნახ. 96 ჰარმონიკული მდგენელები ქსანი-500-ში

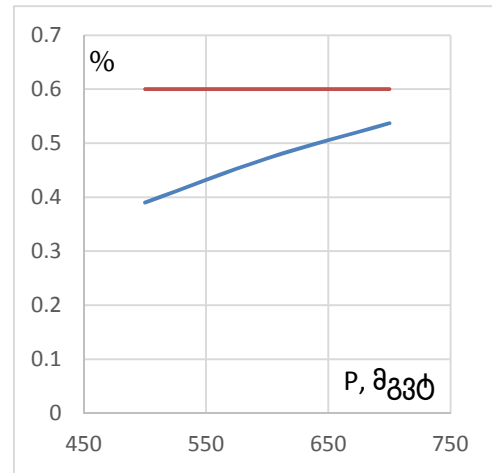
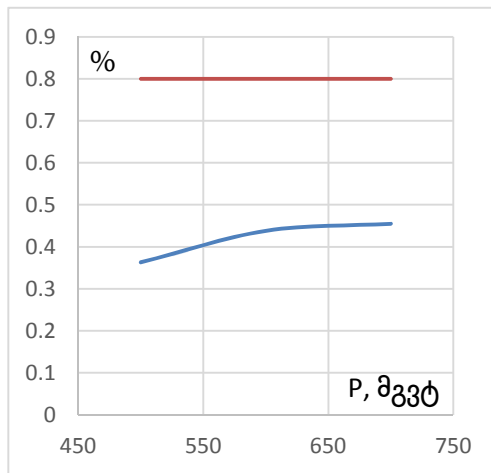


ნახ. 97 ჰარმონიკული მდგენელები ენგური-500-ში

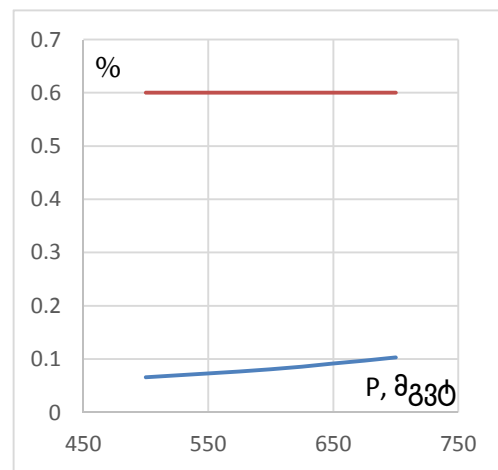
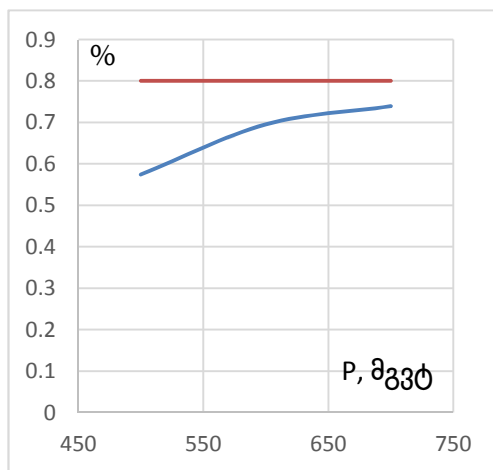
როგორ ჩანს, მე-13 რივის ჰარმონიკის სიდიდე ქსანსა და ენგურში მნიშვნელოვნად აღემატება დასაშვებ დონეს. ამასთან, მე-11 ჰარმონიკის სიდიდე უახლოვდება დასაშვებ დონეს ენგურსა და ქსანში. აქედან გამომდინარე, ახალციხეში ჩვენს მიერ დამატებული ერთი ფილტრის (55 მგვარ, 630 ჰც) ნაცვლად ჩავრთეთ ორი ფილტრი: 1) 25 მგვარ 550 ჰც მე-11 რივის ჰარმონიკის ჩასახშობად და 2) 35 მგვარ 650 ჰც მე-13 ჰარმონიკის ჩასახშობად. ასევე, დამატებითი ფილტრი ჩავრთეთ ქსანი-500-ში - 35 მგვარ

650 ჰკ, რადგანაც აქ მე-13 ჰარმონიკა თითქმის 2-ჯერ აღემატებოდა დასაშვებ ფარგლებს.

როგორც 98 და 99-ე ნახაზებიდან ჩანს, დამატებითი ფილტრების ჩართვით ახალციხესა და ქსანი-500-ში მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების სიდიდეები ენგურსა-500-სა და ქსანი-500-ში ყველა განხილულ შემთხვევაში დასაშვებ ფარგლებში ექცევა.



ნახ. 98 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ქსანი-500-ში



ნახ. 99 მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები ენგური-500-ში

დასკვნა

1. თუ მუდმივი დენის ჩანართის სიხშირის მიხედვით რეგულირების გაძლიერების 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.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Sherkman A. L. Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook. Netherlands: Springer 2005, 570 p.
2. Das J. C. Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation. USA: Mcgraw-Hill, 2010, 736 p.
3. Greenwood A. Electrical Transients in Power Systems. Canada: Wiley-Interscience, 1991, 768 p.
4. Grainger J., Stevenson W. Power System Analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1994, 784 p.
5. Glover J. D., Sarma M. S., Overbye T. J. Power System Analysis and Design. USA: Cengage Learning, 2011, 848 p.
6. Bevrani H., Hiyama T. Intelligent Automatic Generation Control. USA: CRC Press, 2011, 308 p.
7. Pavella M., Ernst D., Vega D. R. Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control. Belgium: Springer, 2000, 238 p.
8. Sluis L. V. D. Transients in Power Systems. England: Wiley, 2001, 224 p.
9. Bevrani H. Robust Power System Frequency Control. USA: Springer, 2009, 226p.
10. Sauer P. W., Pai M. A. Power System Dynamics and Stability. USA: Stipes Publishing Co., 2007, 349 p.
11. Anderson P. M., Fouad A. A. Power System Control and Stability. USA: Wiley-IEEE Press, 2002, 672 p.
12. Bergen A. R., Vittal V. Power System Analysis. USA: Prentice Hall, 1999, 619 p.
13. Eremia M., Shahidehpour M. Handbook of Electrical Power System Dynamics - Modeling, Stability, and Control. USA: Wiley-IEEE Press, 2013, 976 p.
14. Ibrahim M. A. Disturbance Analysis for Power Systems. USA: Wiley-Press, 2011, 736 p.
15. Machowski J., Bialek J. W., Bumby J. R. Power System Dynamics: Stability and Control. England: Wiley, 2008, 658 p.
16. Sood V. K. HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems. USA: Springer, 2004, 297 p.
17. Grigsby L. L. Power systems (Electric Power Engineering Handbooks). USA: CRC Press, 2012, 568 p.
18. Grigsby L. L. Power System Stability and Control, Third Edition (Electric Power Engineering Handbooks). USA: CRC Press, 2012, 450 p.
19. Weedy B. M., Cory B. J., Jenkins N., Ekanayake J. B., Strbac G. Electric Power Systems. England: Wiley, 2012, 512 p.
20. Arrillaga J., Liu Y. H., Watson N. R. Flexible Power Transmission: The HVDC Options. England: Wiley, 2007, 374 p.
21. Hase Y. Handbook of Power System Engineering. England: Wiley, 2007, 548 p.

22. Kothari D. P., Nagrath I. J. Modern Power Systems Analysis. USA: McGraw Hill, 2003, 694 p.
23. Acha E., Agelidis V., Anaya O., Miller T. J. E. Power Electronic Control in Electrical Systems. England: Newness, 2002, 464 p.
24. Murthy P. S. R. Power System Analysis. India: BS Publications, 2007, 336 p.
25. Padiyar K. R. Power System Dynamics: Stability and Control. India: BS Publications, 2008, 584 p.
26. Murthy P. S. R. Operation and Control in Power Systems. India: BS Publications, 2008, 421 p.
27. Saadat H. Power System Analysis. USA: McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002, 712 p.
28. Dugan R. C., Mcgranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality. USA: McGraw-Hill Professional, 2002, 528 p.
29. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. Москва: Энергия, 1979, 456 p.
30. Веников В.А., Жуков Л.А. Переходные процессы в электрических системах. Москва: Госэнергоиздат, 1953, 233 p.
31. გ. ვახტანგაძე, მ. რუხვაძე. საქართველო-აზერბაიჯანის გაერთიანებული სისტემის სტატიკური მდგრადობის ანალიზი, ჟურნალი „ენერჯია“, 2012, №2(62)
32. გ. ვახტანგაძე, მ. რუხვაძე. საქართველოს ელექტროსისტემის ავარიისაწინააღმდეგო ავტომატიკის შესახებ, ჟურნალი „ენერჯია“, 2012, №4(64)
33. გ. ვახტანგაძე. სტატიკური მდგრადობის ანალიზი სისტემაში რამოდენიმე რეგულირებადი მუდმივი დენის ჩანართის არსებობისას, ჟურნალი „ენერჯია“, 2013, №2(66)