

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ირაკლი გორდიაშვილი

კონვერტორული ქვესადგურების მუშაობით გამოწვეული ელექტროენერჯის ხარისხის პრობლემები

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2019 წ.

საავტორო უფლება © 2019 წელი, ირაკლი გორდიაშვილი

თბილისი

2019 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით გორდიაშვილი ირაკლის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „კონვერტორული ქვესადგურების მუშაობით გამოწვეული ელექტროენერჯის ხარისხის პრობლემები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

_____ , 2019 წელი

ხელმძღვანელი: _____ ასოც. პროფესორი გ. არზიანი

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019

ავტორი: ირაკლი გორდიაშვილი

თემის დასახელება: “კონვერტორული ქვესადგურების მუშაობით
გამოწვეული ელექტროენერჯის ხარისხის
პრობლემები”

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____, 2019 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი 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.

რეზიუმე

სადისერტაციო თემა ეხება მაღალი ძაბვის ელექტროგადაცემის ქსელებში დღეისთვის არსებული ისეთ რეალურ პრობლემებს როგორებიცაა ქსელის ძაბვის ფორმის დამახინჯება და ძაბვის დონის რეგულირება.

ხაზი უნდა გაესვას იმ ფაქტს, რომ ზემოთ აღნიშნული ორივე პრობლემა საკმაოდ ვრცელია და შეიძლება ქონდეს მრავალი გამომწვევი მიზეზი, რომელთა კომპლექსური შესწავლა ერთი კვლევის ჭრილში პრაქტიკულად წარმოუდგენელია. აღნიშნულიდან გამომდინარე, წინამდებარე თემის ფარგლებში გამოკვლეული იქნება მხოლოდ ის კერძო შემთხვევები, როდესაც ეს პრობლემები გამოწვეულია ქსელში არსებული კონვერტორული ქვესადგურების ოპერირების შედეგად.

დღეისთვის გავრცელებულია ორი ძირითადი ტიპის კონვერტორული ქვესადგური:

1. ტრადიციული, დენის წყაროს კონვერტორი;
2. შედარებით თანამედროვე, ძაბვის წყაროს კონვერტორი;

მწარმოებლის მიხედვით თითოეულ მათგანს დაუმკვირდა სხვადასხვა კომერციული სახელიც, მაგალითად:

დენის წყაროს კონვერტორი შეიძლება კონკრეტულ შემთხვევებში ნახსენები იყოს როგორც HVDC classic ტექნოლოგია, როდესაც ძაბვის წყაროს კონვერტორს ხშირად უწოდებენ HVDC light ტექნოლოგიას.

ძაბვის წყაროს კონვერტორის მეტსახელი გამომდინარეობს იმ ფაქტიდან, რომ ასეთი ტექნოლოგია შედარებით „მსუბუქია“ და მოქნილი მის წინამორბედთან შედარებით.

საკვლევი თემის სამეცნიერო სიახლედ შეიძლება ჩაითვალოს ის ფაქტი, რომ რამდენიმე კონვერტორული ქვესადგურის მუშაობის შემთხვევაში ქსელის ძაბვის ნახტომებისა და მისი ფორმის დამახინჯების კომპლექსური ანალიზი მოდელირების გზით პრაქტიკულად არ განხორციელებულა. რადგან აღნიშნული მოითხოვს უზარმაზარ დროს და რესურსს, აღნიშნული კვლევა ჩატარდება რამდენიმე კონკრეტული სცენარის განხილვით.

თემა საკმაოდ აქტუალურია, რადგან ზემოთ აღწერილი ორივე პრობლემა სულ უფრო და უფრო მასშტაბური ხდება არა მარტო იმ სისტემებისთვის, სადაც მეზობელ სისტემებთან კავშირი განხორციელებულია კონვერტორული ქვესადგურების გავლით, არამედ იქაც, სადაც ინტენსიურად მიმდინარეობს განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია (მზისა და ქარის ენერჯია). განახლებადი ენერჯის თემატიკა კი თითქმის ყველა ელექტრული სისტემისთვის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანია თანამედროვე მსოფლიოში.

მართალია, განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია ძალიან მიმზიდველია როგორც ეკოლოგიის ასევე ტექნიკური შესრულების სიმარტივის კუთხით, მაგრამ აქვს რიგი უარყოფითი მხარეებიც, რადგან მათი პარალელური მუშაობა ქსელთან არ ხდება სტანდარტული

სინქრონიზაციის გზით. უმეტესი მათგანი სწორედ კონვერტორული გარდამქმნელების გავლით უკავშირდება ელექტრულ სისტემას. ასეთი კავშირი კი უკვე კარგად არის ცნობილი, როგორც გამომწვევი ქსელის დაბვის ფორმის დამახინჯებისა და ცვლადი დაბვის ფილტრების არსებობის შემთხვევაში დაბვის ბიძგებისა.

აღნიშნულ კვლევას უდიდესი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგან მოდელირებისას მიღებული შედეგებით შესაძლებელი გახდება მსჯელობა თუ კონკრეტულად რომელი რიგის ჰარმონიკული მდგენელების ზედდებაა მოსალოდნელი სხვადასხვა კონვერტორული ქვესადგურების პარალელური მუშაობისას. ასევე, რა რეაქტიულ სიმძლავრეს უნდა გენერირებდეს კონკრეტული ცვლადი დაბვის ფილტრი 50 ჰერც სიხშირეზე, რომ მისი კომუტაციის შედეგად გამოწვეული ქსელის დაბვის ნახტომები დასაშვებ ზღვრებში იყოს სხვადასხვა სახასიათო რეჟიმში.

თავი 1 ეხება სქემის მოდელირებას და სახასიათო სცენარების განხილვას, სადაც მოდელირებული იქნა 1000 მგვტ სიმძლავრის კონვერტორული კლასიკური ტიპის ქვესადგური, რომლის სიმძლავრის ცვლილება ხდება მუდმივი დენის მნიშვნელობის ცვლილებით. კონვერტორი მიერთებულია ექვივალენტურ ქსელთან და მიერთების წერტილში ქსელის სიმძლავრე განისაზღვრება მიერთების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრის და დენის მნიშვნელობების მიხედვით,

შესაბამისად ქსელის გაძლიერების ან დასუსტების სცენარის სიმულაცია შესაძლებელია მიერთების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრის და დენის მნიშვნელობების ცვლილებით.

თავი 2 ეხება კვანძების დაბვის სპექტრული ანალიზს, სადაც მოდელირებული იქნა 6 კვანძიანი ელექტრო სისტემა, რომელზედაც დაკავშირებული იყო მუდმივი დენის ჩანართი, სადაც ხდებოდა სიმძლავრის 100 მგვტ-იდან 1000 მგვტ-მდე ცვლილებისას დაკვირვება და იმისი გამოვლენა თუ როგორი იქნება ჰარმონიკული სპექტრი თითოეული კვანძისთვის. აღნიშნულიდან გამოვლინდა, რომ დამოკიდებულება სიმძლავრესა და ჰარმონიკულ დამახინჯებას შორის არაწრფივია, რაც იმაში გამოიხატება, რომ სიმძლავრის ზრდასთან ერთად ადგილი აქვს დამახინჯების არაწრფივ ცვლილებას

თავი 3 ეხება ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირებას, სადაც მოხდა ქსელის კონკრეტული კვანძის განხილვა. კერძოდ ამ კვანძში მოდელირების გზით გატარდა ფართო სპექტრის სიხშირული სკანერი (50-2000 ჰერცამდე) და გამოვლინდა ის კონკრეტული „სახიფათო“ სიხშირეები და ჰარმონიკული რიგები, რომლის დროსაც მოსალოდნელია რეზონანსის მოვლენა აღნიშნული კვანძში.

თავი 4-ში ერთ-ერთ მოდელირებულ ქვესადგურში ვახდენთ სხვადასხვა სიდიდის რეაქტიული ელემენტების მიერთებას და ვახდენთ სხვადასხვა დისკრეტული ელემენტების მიმდევრობით გათიშვას. თითოეული გათიშვისას ვახდენთ დაკვირვებას კვანძის დაბვის ნახტომებზე. აღნიშნულ ნახტომებს პროცენტებში ვადარებთ ქსელის წესებით განსაზღვრულ ზომას დაბვის შესაბამისი საფეხურისთვის.

Resume

Dissertation topic is about real problems that exist today in High voltage transmission networks, such as deterioration of network voltage shape and regulation of voltage level.

It is necessary to underline the fact that both above-mentioned problem is quite extensive and may have many causal reasons, so its complex study within scope of one study is practically impossible. Therefore, within this topic only those private cases will be examined, when these problems are caused by the operation of the converter substations in the network.

For today, there are two main types of converter substations:

1. Traditional, current source converter;
2. Relatively modern, voltage source converter;

According to the manufacturer, each of them has a different commercial name, for example:

In specific cases current source converter might be referred to as a HVDC classic technology when the voltage source converter is often called HVDC light technology.

Nickname of voltage source converter follows from the fact that such technology is relatively "lighter" and flexible compared to its predecessor.

Scientific news of research topic can be considered the fact that in case of several converter substations operation, network voltage leaps and complex analysis of its shape distortion by modeling practically has not implemented. Because this requires a tremendous time and resource, above-mentioned research will be conducted by considering several specific scenarios.

The topic is quite relevant, Because both above described problems are becoming more and more large not only for those systems, where communication with neighboring systems is carried out through converter substations, but also where the renewable energy integration is going on intensively (Sun and wind energy). Renewable energy is one of the most important in the modern world for almost all electrical systems.

It is true that the renewable energy integration is very attractive in terms of ecology and technical performance simplicity, but it has a number of disadvantages, because their parallel operation with the network is not with a standard synchronization. Most of them are connected to the electrical system via converters. Such connection is already well known as cause of network voltage distortion and voltage bumps in case of variable voltage filters.

This research has great practical importance, because with the received results in modeling will be possible discussion about specifically which level Harmonic Competitors overlap is expected during parallel operation of various converter substations. Also, what reactivity power should be generated by a specific variable

voltage filter at 50 Hz frequency, that the network voltage leaps caused by its switch be in limits in a different modes.

Chapter 1 refers to modeling and reviewing the characteristic scenarios, where was modeled 1000 MW converter classic type substation, which power change is made by changing the importance of constant power. The converter is connected to an equivalent network and network power at connection point is determined according to short circuit power and current value. Accordingly, Simulation of network enhancing or weakening scenario is possible by changing value of short circuit power and current.

Chapter 2 refers to spectral analysis of nodes voltages, where the 6-node electrical system was modeled, on which the high voltage direct current was connected, where was observed to change the power from 100 MW to 1000 MW and to show what the harmonic spectrum is for each node. It was revealed, that correlation between power and harmonic distortion is non-linear, which is expressed that with the increase capacity, there is a nonlinear change of distortion non-linear change distortion has a place.

Chapter 3 refers to frequency scanning of network nodes, where was discussed about network specific node. Namely, in this node modeling a wide range of frequency scanners were provided (Up to 50-2000 Hz) and revealed that specific "dangerous" frequencies harmonic sequences during which the resonance is expected in the mentioned node.

In chapter 4 we are joining the different size reactive elements in the simulated substations and disconnect variety discrete elements in sequence. Each disconnection is observed on the node voltage leaps. These leaks are compared by size defined by the network rules for the appropriate level of voltage in percentages. As a result we will show the magnitude of the reactive element, which at one time computation do not violate network rules.

შინაარსი

88.

შესავალი.....	18
ლიტერატურის მიმოხილვა	22
თავი 1. სქემის მოდელირება და სახასიათო სცენარების განხილვა	33
1.1. კვლევის მეთოდოლოგია	33
1.2. HVDC სისტემის სქემის მოდელირება.....	33
1.3. სახასიათო სცენარების განხილვა.....	37
თავი 2. კვანძების ძაბვების სპექტრული ანალიზი.....	40
2.1. ჰარმონიკული შემადგენლობა	40
2.2. ჰარმონიკული ფილტრები ცვლადი ძაბვის მხარეს	42
2.3. ჰარმონიკების გავლენა ელექტრული სისტემის ელემენტებზე.....	43
2.4. მბრუნავი მოწყობილობები.....	43
2.5. ტრანსფორმატორები.....	44
2.6. პარალელური კონდენსატორები.....	44
2.7. ჰარმონიკების კონტროლი	45
2.8. ძაბვის დამახინჯება ასიმეტრიული დატვირთვის დროს.....	45
2.9. კვანძების ძაბვების სპექტრული ანალიზისთვის სქემის მოდელირება	50
თავი 3. ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირება	62
3.1. მოდელირება	62
3.2. წინაღობების სიხშირეზე დამოკიდებულების წრის მეთოდი	66
3.3. წინაღობების სიხშირეზე დამოკიდებულების პოლიგონის მეთოდი .	69
3.4. ჰარმონიკული სიხშირე	70
3.5. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა აქტიური დატვირთვით	73
3.6. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა ინდუქციური დატვირთვით ..	74

3.7. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა ტევადური დატვირთვით	75
3.8. მიმდევრობითი რეზონანსი	76
3.9. სიხშირის გატარების ზოლი და შერჩევითობა	78
3.10. რეზონანსული სიხშირე	79
3.11. დინამიკური წინაღობა	81
3.12. გადამღობი წრედი	81
3.13. ხარისხის კოეფიციენტი	82
3.14. აქტიური წინაღობის გავლენა სიხშირულ სპექტრზე	82
3.15. მოდელის აღწერა და გაანგარიშებების ჩატარება	83
თავი 4. სხვადასხვა დისკრეტულობის მქონე ფილტრების კომუტაციით გამოწვეული ძაბვის ნახტომების ანალიზი	93
4.1. შუნტური კონდესატორის კომუტაციის მოდელირება	93
4.2. დილის მინიმუმის რეჟიმი	96
4.3. შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმი	98
4.4. საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმი	100
დასკვნა	104
გამოყენებული ლიტერატურა	106

ცხრილების ნუსხა

გვ.

ცხრილი 1. ანათვლები ფაზების მიხედვით	48
ცხრილი 2. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთულია ცვლადი მაბვის ფილტერები	60
ცხრილი 3. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართულია ცვლადი მაბვის ფილტერები	60
ცხრილი 4. მბვეები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის მინიმუმის რეჟიმში	96
ცხრილი 5. მბვეები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმში	99
ცხრილი 6. მბვეები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის მაქსიმუმის რეჟიმში	101

ნახაზების ნუსხა

83

ნახაზი 1. კლასიკური HVDC სისტემა, რომელიც მუშაობს ბიპოლარულ რეჟიმში.....	25
ნახაზი 2. HVDC light სისტემა	27
ნახაზი 3. მაღალი ძაბვის ეგზ-ის მოდელირებული სქემა	30
ნახაზი 4. ძაბვა ხაზის დასაწყისში.....	31
ნახაზი 5. ძაბვა ხაზის ბოლოში	32
ნახაზი 6. ელექტრული ქსელის მოდელი	34
ნახაზი 7. PowerFactory-ის HVDC-ის მოდელი.....	35
ნახაზი 8. ნაკადგანაწილების გრაფა.....	36
ნახაზი 9. ჰარმონიკული და ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების გრაფა.....	37
ნახაზი 10. ძაბვა ჩანართის 50 მგვტ-ით დატვირთვის დროს.....	37
ნახაზი 11. ძაბვა ჩანართის 100 მგვტ-ით დატვირთვის დროს.....	38
ნახაზი 12. ძაბვა ჩანართის 150 მგვტ-ით დატვირთვის დროს.....	38
ნახაზი 13. ძაბვა ჩანართის 250 მგვტ-ით დატვირთვის დროს.....	39
ნახაზი 14. სამფაზა სიმეტრიული სისტემის სინუსოიდალური მრუდები...	46
ნახაზი 15. Ansoft Simplorer-ში მოდელირებული სქემა.....	46
ნახაზი 16. დენების სიდიდეები ფაზების მიხედვით	47
ნახაზი 17. სიმძლავრეები ფაზების მიხედვით	48
ნახაზი 18.ძაბვის სიდიდეების ფაზების მიხედვით	49
ნახაზი 19. Ansoft Simplorer-ში მოდელირებული 6 კვანძანი სქემა	50

ნახაზი 32. კვანძი 6-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგვტ-ი სიმძლავრით	59
ნახაზი 33. სიმძლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები	61
ნახაზი 34. სიმძლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები	61
ნახაზი 35. სიხშირული სკანირების მონაცემების შესატანი ფანჯარა PowerFactory-ში	65
ნახაზი 36. სიხშირული სკანირების დამატებითი მონაცემების შესატანი ფანჯარა PowerFactory-ში	66
ნახაზი 37. მკვებავი სისტემის წინაღობები სიხშირის მიხედვით	67
ნახაზი 38. სისტემის წინააღობათა წრე	68
ნახაზი 39. წინააღობების პოლიგონი	69
ნახაზი 40. 50 ჰერციანი სინუსოიდა	70
ნახაზი 41. 50 ჰერცზე დამახინჯებული სინუსოიდა	71
ნახაზი 42. სისტემის ძაბვა ჰარმონიკული კომპონენტებით	72
ნახაზი 43. ფუნდამენტალური, მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე და 25-ე ჰარმონიკების ჯამი	73
ნახაზი 44. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება აქტიური დატვირთვის დროს	74
ნახაზი 45. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება ინდუქციური დატვირთვის დროს	74
ნახაზი 46. ინდუქციური წინააღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდი	75
ნახაზი 47. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება ტევადური დატვირთვის დროს	75

ნახაზი 48. ტევადური დატვირთვის და სიხშირის დამოკიდებულების მრუდი	76
ნახაზი 49. სხვადასხვა წინააღმდეგობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდები	77
ნახაზი 50. გატარების ზოლის ამსახველი მრუდი	79
ნახაზი 51. აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დენების ვექტორები.....	79
ნახაზი 52. დენისა და სრული წინააღმდეგობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდები	81
ნახაზი 53. სისტემის წინააღმდეგობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა ..	84
ნახაზი 54. მოდელირებული ქვესადგურის სქემა, სადაც ხდება დაკვირვება	86
ნახაზი 55. ყველა ელემენტი ჩართულია, სისტემის სრული წინააღმდეგობის მრუდი	87
ნახაზი 56. ყველა ელემენტი ჩართულია.....	88
ნახაზი 57. LINE 3 -ის გათიშვა.....	89
ნახაზი 58. LINE 5 -ის გათიშვა.....	89
ნახაზი 59. LINE 1 -ის გათიშვა.....	90
ნახაზი 60. LINE 2-ის გათიშვა.....	91
ნახაზი 61. ზოგიერთი ჰარმონიკული წინააღმდეგობა	91
ნახაზი 62. მოდელირებული სქემა, სადაც მიერთებულია შუნტური კონდენსატორი	94
ნახაზი 63. შუნტური კონდენსატორის პარამეტრები	95
ნახაზი 64. ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში	97
ნახაზი 65. ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში	98

ნახაზი 66. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადღის მაქსიმალურ 220 კვ ძაბვის კვანძებში	რეჟიმში 99
ნახაზი 67. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადღის მაქსიმალურ რეჟიმში კვ ძაბვის კვანძებში	110 100
ნახაზი 68. ძაბვის გადახრის მრუდი საღამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში	102
ნახაზი 69. ძაბვის გადახრის მრუდი საღამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში	102

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

HVDC - (High Voltage Direct Current) მაღალი ძაბვის მუდმივი დენი

THD – (Total Harmonic Distortion) ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება

AC – (Alternating Current) ცვლადი დენი

DC – (Direct Current) მუდმივი დენი

SSR – (Subsynchronous Resonance) ქვესინქრონული რეზონანსი

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor (ბიპოლარული ტრანზისტორი იზოლირებული ბაზით)

MW- Megawat (მეგავატი)

მადლიერების გერდი

მადლობას ვუხდით საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემის, ელექტრული რეჟიმების და განვითარების სამსახურის თანამშრომლებს თემის დამუშავებისას გაწეული კონსულტაციებისთვის, ასევე ტექსტის რედაქტირებისთვის დიდ მადლობას ვუხდით ამავე სამსახურის ინჟინერს ინა ოსიყმაშვილს.

შესავალი

თემის აქტუალურობა. სადისერტაციო თემა ეხება მაღალი ძაბვის ელექტროგადაცემის ქსელებში დღეისთვის არსებული ისეთ რეალურ პრობლემებს როგორებიცაა ქსელის ძაბვის ფორმის დამახინჯება და ძაბვის დონის რეგულირება.

თემა საკმაოდ აქტუალურია, რადგან ზემოთ დასახული ზემოთ აღწერილი ორივე პრობლემა სულ უფრო და უფრო მასშტაბური ხდება არა მარტო იმ სისტემებისთვის, სადაც მეზობელ სისტემებთან კავშირი განხორციელებულია კონვერტორული ქვესადგურების გავლით, არამედ იქაც, სადაც ინტენსიურად მიმდინარეობს განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია (მზისა და ქარის ენერჯია). განახლებადი ენერჯის თემატიკა კი თითქმის ყველა ელექტრული სისტემისთვის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანია თანამედროვე მსოფლიოში.

განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია ძალიან მიმზიდველია როგორც ეკოლოგიის ასევე ტექნიკური შესრულების სიმარტივის კუთხით, მაგრამ აქვს რიგი უარყოფითი მხარეებიც, რადგან მათი პარალელური მუშაობა ქსელთან არ ხდება სტანდარტული სინქრონიზაციის გზით. უმეტესი მათგან სწორედ კონვერტორული გარდამქმნელების გავლით უკავშირდება ელექტრულ სისტემას. ასეთი კავშირი კი უკვე კარგად არის ცნობილი, როგორც გამომწვევი ქსელის ძაბვის ფორმის დამახინჯებისა და ცვლადი ძაბვის ფილტრების არსებობის შემთხვევაში ძაბვის ბიძგებისა.

აღნიშნულ კვლევას უდიდესი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგან მოდელირებისას მიღებული შედეგებით შესაძლებელი გახდება მსჯელობა თუ კონკრეტულად რომელი რიგის ჰარმონიკული მდგენელების ზედდებაა მოსალოდნელი სხვადასხვა კონვერტორული ქვესადგურების პარალელური მუშაობისას. ასევე, რა რეაქტიულ სიმძლავრეს უნდა გენერირებდეს კონკრეტული ცვლადი ძაბვის ფილტრი 50 ჰერც სიხშირეზე,

რომ მისი კომუტაციის შედეგად გამოწვეული ქსელის ძაბვის ნახტომები დასაშვებ ზღვრებში იყოს სხვადასხვა სახასიათო რეჟიმში.

არსებული მეთოდების ნაკლოვანება. მეთოდის ნაკლოვანებად შეიძლება ჩაითვალოს ის, რომ ზემოდ მოყვანილი ანალიზის ჩასატარებლად და ზუსტი რეზულტატების მისაღებად საჭიროა შეიქმნას ელექტრული ქსელის ზუსტი მოდელი, რაზე დაყრდნობისასაც მივიღებთ ზუსტ რეზულტატს. ამის გაკეთება დღევანდელ პირობებში რთულია, რადგან საქართველოს ელექტროსისტემაში დღეის მდგომარეობით ქვესადგურებში და სადგურებში არ აყენია ელექტროენერჯის ხარისხის გასაზომი დანადგარები, რომლებიც გაზომავენ ჰარმონიკულ რიგებს სისტემის რომელიმე ჩვენთვის ხელსაყრელ წერტილში, ასევე რთულია სისტემის ექვივალენტური წინააღობის დადგენა აღნიშნული პრობლემის გამო. მინდა ავღნიშნო, რომ თანამედროვე ენერგეტიკაში გამოიყენება ზემოდ ხსენებული დანადგარები და აღნიშნული სიმულაციების შედეგების შედარება შესაძლებელი იქნება რეალურ სიტუაციასთან მომავალში.

სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებული მოდელირება და ჩატარებული ანალიზების მეთოდები მეტნაკლებად ეხმიანება არსებულ ვითარებას და მაქსიმალურად პასუხობს დისერტაციაში განხილულ პრობლემებს და მათ აღმოფხვრის გზებს.

სამუშაოს მიზანი. ნაშრომის მიზანია გამოიკვლიოს და შეაფასოს კონვერტორული ქვესადგურების მუშაობით გამოწვეული ელექტროენერჯის ხარისხის პრობლემები და შემოგვთავაზოს მათი აღმოფხვრის გზები. ასევე გვიჩვენოს მეთოდოლოგია თუ როგორ განისაზღვროს კვანძში ჰარმონიკული დამახინჯება, გვიჩვენოს ჰარმონიკული ფილტრების შერჩევის ხერხები.

ყურადღება გამახვილებული იქნება კონვერტორული ქვესადგურის მიერთებისას თუ რა ფაქტორები უნდა იქნას გათვალისწინებული, რათა არ მოხდეს ელექტროენერჯის ხარისხის გაუარესება აღნიშნული ქვესადგურის ქსელზე მიერთებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტებად აღებულია და დამოდელირებულია ქსელის სხვადასხვა კვანძები, რომელთაგანაც კონვერტორული ქვესადგურის მიერთება იწვევს ელექტროენერგიის ხარისხის პარამეტრების დარღვევას. ასევე კვლევის ობიექტად გამოყენებულია ქსელის ისეთი ელემენტები, რომელთა ოპერირებაც იწვევს ელ. ენერგიის ხარისხის გაუარესებას. აღნიშნული მოდელირებები ჩატარებულია სხვადასხვა მათემატიკური მოდელირების პროგრამებში, როგორებიცაა: ATP Draw, Ansoft Simplorer, DigSILENT PowerFactory.

მეცნიერული სიახლე. საკვლევი თემის სამეცნიერო სიახლედ შეიძლება ჩაითვალოს ის ფაქტი, რომ კონვერტორული ქვესადგურის მუშაობის შემთხვევაში ქსელის ძაბვის ნახტომებისა და მისი ფორმის დამახინჯების კომპლექსური ანალიზი მოდელირების გზით პრაქტიკულად არ განხორციელებულა. რადგან აღნიშნული მოითხოვს უზარმაზარ დროს და რესურსს.

შედეგების გამოყენების სფერო. ნაშრომში ჩატარებული ანალიზი და მეთოდები გამაღმეში და განაწილების სისტემის ოპერატორებს მისცემთ საშუალებას გამოიკვლიონ თავიანთი ქსელი ელ. ენერგიის ხარისხის კუთხით, დაადგინონ რა სიმძლავრის და ქსელის რომელ წერტილში აქვთ ახალი მომხმარებლის მიერთების შესაძლებლობა და საშუალება, ისე რომ არ დაარღვიონ ელექტრული სისტემის მდგრადობა და ელექტრო ენერგიის ხარისხის გაუარესება არსებულზე მეტად, ხოლო ამის შემდეგ ისინი შეძლებენ დართონ ნება ან შეზღუდონ ასინქრონული მომხმარებლები და გენერაციის ობიექტების მიერთება ქსელზე, რომლების კონვერტორული ქვესადგურით უკავშირდებიან მათ ქსელს.

ასევე კონვერტორული ქვესადგური მფლობელებს საშუალებას მისცემს სწორად განსაზღვრონ თავიანთი ის რისკები, რაც შეიძლება გამოიწვიოს მათმა ქსელზე მიერთებამ და შესაბამისად გაუთვალისწინებელმა ხარჯებმა, რომელიც მიმართული იქნება ხარისხის პარამეტრების გამოსწორებისკენ. ამის თავიდან ასაცილებლად და

ინვესტიციების სწორად ჩასაღებად, დაინტერესებული მხარე სანამ გადაწყვეტს ასინქრონული ტიპის სადგურის მშენებლობას კონკრეტულ წერტილში, იგი შეისწავლის თუ რა პრობლემები და ზედმეტი ხარჯი შეიძლება გამოიწვიოს ელ. ენერჯის ხარისხის კუთხით მათმა სადგურებმა და აღნიშნული კვლევის გამოყენებით განსაზღვრავს უღირს თუ არა პროექტის განხორციელება.

ლიტერატურის მიმოხილვა

“HVDC Classic”

HVDC (high voltage direct current) ტექნოლოგია წარმოადგენს ძალოვანი ელექტრონიკის ტექნოლოგიას და გამოიყენება ელექტრულ სისტემებში. ეს არის ეფექტური და მოხერხებული მეთოდი დიდი ოდენობით ელექტრული ენერჯის შორ მანძილებზე გადასაცემად. HVDC აგრეთვე გამოიყენება დამოუკიდებელი ელექტრული სისტემების დასაკავშირებლად, როდესაც ცვლადი დენით დაკავშირება შეუძლებელია. ამ ტექნოლოგიას აქტიურად იყენებენ მსოფლიოს სხვადასხვა წერტილებში. უკანასკნელ წლებამდე HVDC სრულდებოდა ერთოპერაციული ტირისტორების (ასეთი ტიპის ტირისტორების მართვის ელექტროდს შეუძლია ტირიტორის ჩართვა, მაგრამ გამორთვას ვერ ახდენს) ბაზაზე (სახელწოდებით “HVDC კლასიკი”, ან “ტრადიციული HVDC”) და გამოიყენებოდა ცვლადი დენის გარდასაქმნელად მუდმივად და პირიქით.

“HVDC Light”

ბოლო წლებში უკვე შესაძლებელი გახდა ახალი ტიპის HVDC-ის შექმნა. ეს უახლესი ტექნოლოგია სიმძლავრის კონვერსიისთვის იყენებს, არა ერთოპერაციულ ტირისტორებს, არამედ უფრო თანამედროვე ნახევარგამტარულ გასაღებებს, რომელთაც IGBT-ებს უწოდებენ (Insulated Gate Bipolar Transistors) ასეთი კონვერტორები წარმოადგენენ ძაბვის წყაროს კონვერტორებს – VSC (voltage source converter) და მუშაობენ მაღალ სიხშირეზე (1-2 khz), განივიმპულსური მოდულატორის გამოყენებით. (PWM – Pulse Width Modulation) ამ ტექნოლოგიის კომერციული სახელწოდებაა “HDVC light” ან “HVDC plus”. ტექნიკური კი VSC-HVDC. დღეისათვის VSC-HVDC გამოიყენება მხოლოდ მცირე და საშუალო ოდენობით ელექტროენერჯის გადასაცემად.

კლასიკური HVDC სისტემების კონფიგურაცია

კლასიკური HVDC სისტემა, რომელიც მუშაობს ბიპოლარულ რეჟიმში ნაჩვენებია ნახ.1-ზე და შეიცავს: ცვლადი დენის ფილტრებს, სტატიკურ კონდენსატორებს, ან სხვა რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობას, კონვერტორის ტრანსფორმატორებს, კონვერტორებს, მუდმივი დენის რეაქტორებს, მუდმივი ძაბვის ფილტრებს და მუდმივი დენის ხაზებს, ან მუდმივი დენის კაბელებს.

კონვერტორები

კონვერტორები HVDC სისტემის გულს წარმოადგენენ. ისინი ასრულებენ სიმძლავრის კონვერსიას ცვლადი დენის წრედიდან მუდმივში გამმართველის მხარეს, და მუდმივი დენის წრედიდან ცვლადში ინვერტორის მხარეს. კონვერტორები მიერთებულია ცვლადი ძაბვის სისტემასთან კონვერტორული ტრანსფორმატორების საშუალებით.

კლასიკურ HVDC სისტემაში გამოყენებულია დენის წყაროს კონვერტორები, მუდმივი დენი დაფიქსირებულია მუდმივ სიდიდედ. სიმძლავრის სიდიდე და მიმართულება ძაბვის სიდიდის და მიმართულებით კონტროლდება. აქ მთავარ კომპონენტებს წარმოადგენენ ტირისტორები, რომელთაგანაც აწყობილია ექვსპულსიანი ხიდები, რომლებიც უშუალოდ ახორციელებენ გამართვისა და ინვერტირების ოპერაციებს. თორმეტპულსიანი ხიდი აიწყობა ორი ექვსპულსიანი ხიდის მიმდევრობითი ან პარალელური ჩართვით. თითოეული ხიდი შეიცავს მიმდევრობით ჩართული ტირისტორების განსაზღვრულ რაოდენობას, თავიანთი დამხმარე წრედებითურთ. თითოეული 6 პულსიანი ხიდი დამოუკიდებლადაა მიერთებული კონვერტორის ტრანსფორმატორთან, ამასთან 12 პულსიან სქემაში მიმდევრობით ჩართული 2 ექვსპულსიანი ხიდიდან ერთს კვებავს ტრანსფორმატორი სამკუთხედად ჩართული მეორეული გრაგნილით, ხოლო მეორეს ტრანსფორმატორი ვარსკვლავად ჩართული მეორეული გრაგნილით. ამის გამო 5 და 7 რიგის ჰარმონიკები ამ

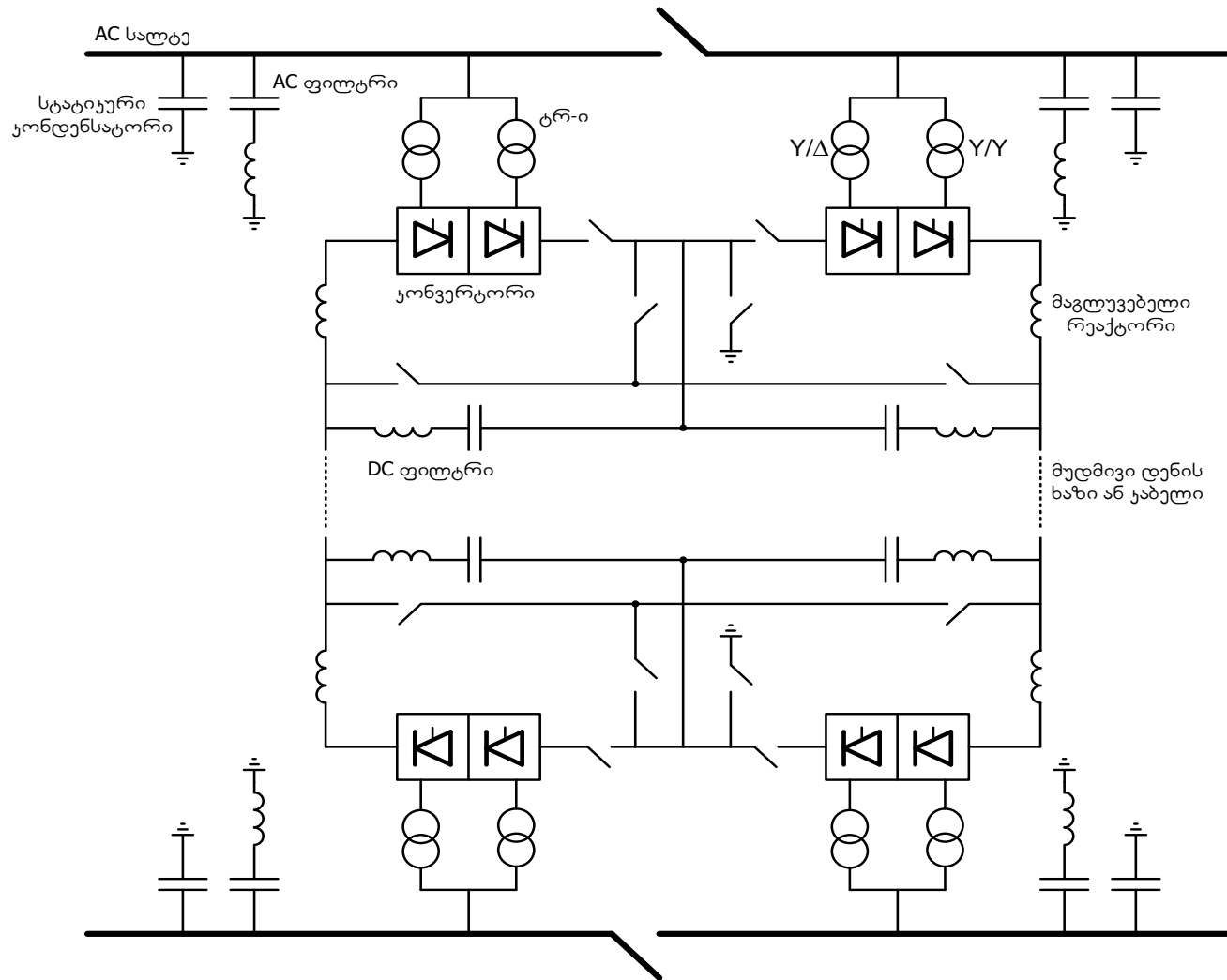
ორ ტრანსფორმატორში საწინააღმდეგო ფაზაში არიან. ეს შესაძლებელია ამცირებს დამახინჯებას ცვლადი ძაბვის სისტემის მხარეს.

კონვერტორის ტრანსფორმატორები

კონვერტორის ტრანსფორმატორები აერთებენ ტირისტორულ ხიდებს ცვლადი ძაბვის სისტემასთან და ახდენენ ცვლადი ძაბვის დონის შეცვლას სიდიდემდე, რომელიც საჭიროა მუდმივი ძაბვის შერჩეული დონის მისაღებად. გადასაცემი სიმძლავრის მიხედვით ტრანსფორმატორის კონსტრუქცია სხვადასხვაა. ყველაზე გავრცელებულია ცალფაზა სამგრაგნილა შესრულება. გრაგნილები ქსელის მხარეს ვარსკვლავადაა ჩართული. კონვერტორის მხარეს ერთი გრაგნილი ვარსკვლავადაა ჩართული, ხოლო მეორე სამკუთხედად. სამი იდენტური ტრანსფორმატორია საჭირო თითოეული კონვერტორისთვის.

ჰარმონიკების გავლენა ელექტრული სისტემის ელემენტებზე

ჰარმონიკების გავლენის ხარისხი ელექტრული 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 ამ მოწყობილობაში ძალიან დიდი ჰარმონიკული დენების გავლისასაც კი მიყენებული ზიანი ძალიან უმნიშვნელოა. მაგალითად მახურებელი მოწყობილობები ან მძლავრი სამრეწველო ღუმელები არანაირ ზეგავლენას არ განიცდიან ჰარმონიკული დენებისგან. თუმცა ელექტრული სისტემის ზოგიერთი სხვა დანადგარი შესაძლოა დიდი უარყოფითი ზეგავლენის ქვეშ იყოს ჰარმონიკული დენების მიერ.



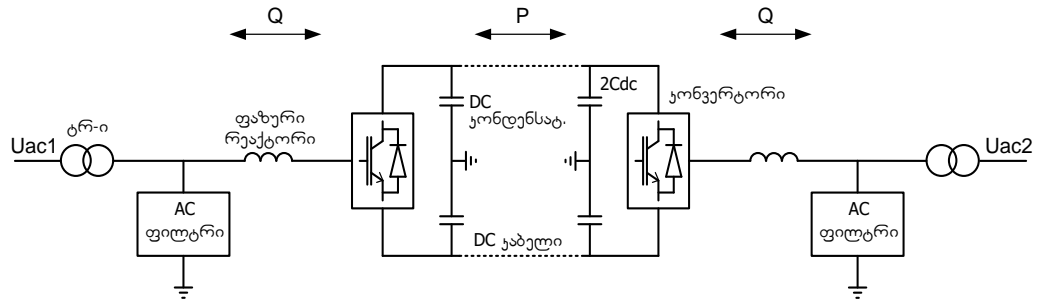
ნახაზი 1. კლასიკური HVDC სისტემა, რომელიც მუშაობს ბიპოლარულ რეჟიმში

მუდმივი ძაბვის ფილტრები

HVDC კონვერტორებში გამართულ ძაბვას აქვს ფეთქადი ხასიათი. ძაბვის პულსაცია რამდენიმე ასეული ჰერციდან კილოჰერცებამდე სიხშირულ დიაპაზონში იწვევს ხელშეშლას მუდმივი დენის ხაზებთან მახლობლობაში მყოფ სატელეფონო ხაზებში. მაშასადამე, სპეციალური დიზაინის მქონე მუდმივი ძაბვის ფილტრები შექმნილია იმისათვის, რომ შემცირდეს გამართული ძაბვის პულსაცია. როგორც წესი, კაბელური გადაცემისას მუდმივი ძაბვის მხარეს ფილტრები არ გამოიყენება, ასევე არ გამოიყენება back to back ტიპის სადგურის შემთხვევაშიც. (საუბარია მხოლოდ HVDC classic-ზე), ამასთან თუ გადაცემაში მონაწილეობს ერთი საჰაერო ხაზი მაინც, მაშინ მუდმივი ძაბვის ფილტრების მონტაჟი აუცილებელია. მუდმივი ძაბვის ფილტრები მნიშვნელოვნად მცირეა და იაფი ცვლადი ძაბვის მხარეს საჭირო ფილტრებთან შედარებით. ფილტრებად შესაძლოა გამოყენებული იქნეს, როგორც პასიური ისე აქტიური ფილტრები. აქტიურ ფილტრებში ჰარმონიკული დამახინჯების საკომპენსაციოდ ძალოვანი ელექტრონიკაა გამოყენებული. თანამედროვე პროექტებში ძირითადად აქტიური ფილტრებია გამოყენებული. აქტიური ფილტრები მეტად მოქნილია პასიურთან შედარებით და ამასთან რთული პროექტების დროს მათი გამოყენება უფრო იაფი ჯდება.

HVDC light სისტემა (VSC- HVDC)

VSC- HVDC სისტემის (voltage source converter HVDC) კონფიგურაცია ნახ.2-ზეა მოცემული, და შედგება ცვლადი ძაბვის ფილტრების, ტრანსფორმატორების, კონვერტორების, ფაზური რეაქტორების, მუდმივი ძაბვის კონდენსატორების და მუდმივი ძაბვის კაბელებისგან.



ნახაზი 2. HVDC light სისტემა

VSC- HVDC სისტემის უპირატესობები და გამოყენების არეალი

ძირითადი განსხვავება HVDC კლასიკსა და VSC- HVDC სისტემებს შორის, გამოიხატება ამ უკანასკნელის მართვისა და კონტროლის სისტემის სრულყოფაში. ეს ფაქტორი განაპირობებს უპირატესობებისა და გამოყენების არეალის გაზრდას, რომელთა შესახებაც ქვემოთ გვექნება საუბარი.

ეს არის უახლესი ტექნოლოგია და ჯერ კიდევ მთელს მსოფლიოში სულ რამდენიმე ასეთი პროექტია განხორციელებული. მიუხედავად იმისა რომ ეს ტექნოლოგია ძალზე ახალგაზრდაა ,ტექნიკური შეზღუდვა ასეთი სისტემების მონტაჟისთვის პრაქტიკულად არ არსებობს, მსოფლიო მასშტაბით მათი რაოდენობის სიმცირე მხოლოდ ეკონომიკური ფაქტორითაა გამოწვეული.

- აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოუკიდებელი კონტროლი, ყოველგვარი დამატებითი მაკომპენსირებელი მოწყობილობების გარეშე.

PWM – ის საშუალებით, VSC-HVDC სისტემა გვაძლევს საშუალებას ვაკონტროლოთ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად. გადაცემული აქტიური სიმძლავრის ფიქსირებული (გაქვავებული) მნიშვნელობის დროსაც, რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლერს შეუძლია აკონტროლოს ძაბვა ცვლადი ძაბვის წრედში.

კონვერტორის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარება და გენერაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მასთან მიერთებული ცვლადი ძაბვის სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისათვის, კონვერტორის დადგმული სიმძლავრის ფარგლებში.

- სიმძლავრის დამახინჯების მინიმიზაცია.

VSC-HVDC სისტემის რეაქტიული სიმძლავრის შესაძლებლობები შეიძლება გამოყენებულ იქნას ქსელში ძაბვის კონტროლისათვის და ამის ძალით სიმძლავრის მაღალი ხარისხის მისაღწევად. მაღალსიხშირული მართვა ქსელში სხვადასხვა სახის ავარიებზე სწრაფი რეაგირების საშუალებას იძლევა. ამასთან, სინუსოიდის საფეხურებრივი ფორმირება ამცირებს კონვერტორის მიერ გენერირებულ ძაბვაში ჰარმონიკულ სპექტრს.

- არაფერი ემატება მოკლედ შერთვის დენს.

კონვერტორი მუშაობს ცვლადი ძაბვის წყაროებისგან დამოუკიდებლად რაც მას ნაკლებად მგრძობიარეს ხდის ცვლადი ძაბვის წრედში ავარიების მიმართ, ამასთან მოკლედ შერთვები ცვლადი ძაბვის მხარეს რადიკალურად ვერ მოქმედებენ მუდმივი ძაბვის წრედზე. თუ ცვლადი ძაბვის წრეში ხდება მოკლედ შერთვა , ან რაიმე მიზეზით ძაბვის შემცირება, სიმძლავრის გადაცემა ავტომატურად ეცემა წინასწარგანსაზღვრულ სიდიდემდე.

- კომუტაციური ჩაშლის შემცირებული ალბათობა

შემფოთებებმა ცვლადი ძაბვის წრედში შესაძლოა გამოიწვიოს კომუტაციური ჩაშლა კლასიკურ HVDC სისტემებში. მაგრამ ეს VVC-HVDC სისტემებში თითქმის არ ხდება რადგან აქ გამოყენებულია თვითკომუტირებადი ნახავერგამტარული მოწყობილობები, და საკმარისად მაღალი ძაბვის არსებობა ცვლადი ძაბვის წრედში აღარაა საჭირო. ეს მნიშვნელოვნად ამცირებს კომუტაციური ჩაშლის ალბათობას და ზრდის ამ სისტემის გამოყენებას დინამიკური მდგრადობის კუთხით.

კომუნიკაციის არსებობა საჭირო არაა. მართვის სისტემები გამმართველისა და ინვერტორის მხარეს მუშაობენ ერთმანეთისაგან

დამოუკიდებლად. ისინი არ არიან დამოკიდებულები სატელეკომუნიკაციო არხზე, ეს ზრდის კონტროლერის სისწრაფესა და საიმედოობას.

- შესაძლებლობა კვების კუნძულოვანი ტვირთები და პასიური ცვლადი ძაბვის ქსელები.

VSC-HVDC სისტემას შეუძლია გამოიმუშაოს საკუთარი ცვლადი ძაბვა წინასწარგანსაზღვრულ სიხშირეზე, ყველანაირი მბრუნავი მანქანების დაუხმარებლად. ეს თვისება შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ისეთი ქსელების საკვებად სადაც სხვა ელექტრომამოძრავებელი ძალა არ არსებობს.

- მრავალ ტერმინალიანი მუდმივი ძაბვის ქსელი.

VSC-HVDC სისტემა ძალზე მოხერხებულია იმისათვის რომ შეიქმნას ქსელი კონვერტორების დიდი ოდენობით საკმაოდ მცირე ფართობზე.

კონვერტორის მიერ გენერირებული ცვლადი ძაბვა შეიცავს მაღალი რიგის ჰარმონიკებს, რომლებიც წარმოიქმნიან IGBT ტრანზისტორების მაღალსიხშირული მართვის გამო. ეს ჰარმონიკები ხვდებიან ცვლადი ძაბვის ქსელში და იწვევენ ძაბვის დამახინჯებას რაც თავის მხრივ ქსელის ელემენტების მუშაობის გაუარესებას და რადიო და სატელეკომუნიკაციო ხელშეშლებს იწვევს. ამისათვის კონვერტორებთან ამონტაჟებენ მაღალი სიხშირის ფილტრებს, რომლებიც ახდენენ წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ჩახშობას. VVC კონვერტორებთან არ არის საჭირო რაიმე რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობის გამოყენება და ჰარმონიკები დამოკიდებულია მხოლოდ PWM ის სიხშირეზე. დაბალი რიგის ჰარმონიკების შემადგენლობა ძალიან დაბალია. მაშასადამე ფილტრების სიმძლავრე და ზომა ასეთი ტიპის კონვერტორებისთვის მნიშვნელოვნად მცირეა კლასიკური სისტემის ფილტრებთან შედარებით.

დენის წყაროს კონვერტორის მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, უხეშად რომ ვთქვათ ხდება დენით. ეს ნიშნავს, რომ საკუთარი ძაბვის ფორმირების უნარი მას არ გააჩნია. ამასთან, მის მიერ ქსელში გაგზავნილი დენი არ არის სინუსოიდური ფორმის, დენის წყაროს კონვერტორის ბუნებიდან გამომდინარე. არასინუსოიდური დენი იწვევს ქსელის

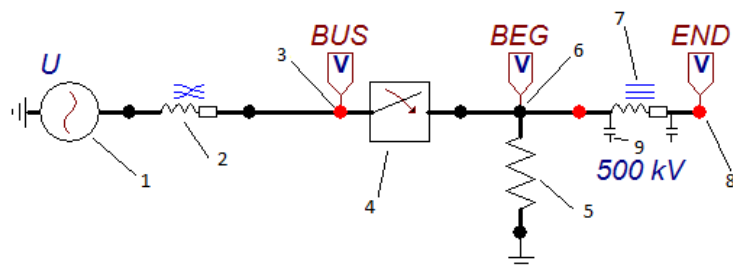
ელემენტებში არასინუსოიდურ ძაბვის ვარდნებს, რაც საბოლოო ჯამში ამახინჯებს ქსელის ძაბვას. თუკი ასეთი კონვერტორი მძლავრია და მისი გავლენა ქსელის ძაბვის დამახინჯებაზე მკაფიოა, მაშინ აუცილებელი ხდება ცვლადი ძაბვის ჰარმონიკული ფილტრების გამოყენება, რომელთაც როგორც წესი ორი ძირითადი ფუნქცია აქვთ:

1. ქსელის ძაბვის დამახინჯების დასაშვებ სიდიდემდე მიყვანა, ჰარმონიკული ფილტრაცია;
2. კვანძის უზრუნველყოფა რეაქტიული სიმძლავრით, ამ კვანძზე მიერთებული კონვერტორი მიერ გამოწვეული რეაქტიული სიმძლავრის „დარღვეული ბალანსის“ აღსადგენად.

დღეისთვის არსებული გამოცდილებით ელექტრული ქსელისთვის მუშაობის რეჟიმების კუთხით უფრო პრობლემატურია დენის წყაროს კონვერტორები, სწორედ ამიტომ, კვლევის ფარგლებში ძირითადი ყურადღება გამახვილებული იქნება ამ ტიპის კონვერტორებზე.

მაღალი ძაბვის ეგზ-ის კომუტაციის მოდელირება

მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზის კომუტაციისას ხშირად ადგილი აქვს კომუტაციური გადაძაბვის წარმოქმნას. 500 კვ ნომინალური ძაბვის ეგზ-ის მაგალითზე არასტაციონარული პროცესების მოდელირების პროგრამა ATPdraw-ში მოვახდინეთ არასიმეტრიული კომუტაციის მოდელირება. მოდელირებული სქემა ნაჩვენებია ნახაზ 3-ზე.

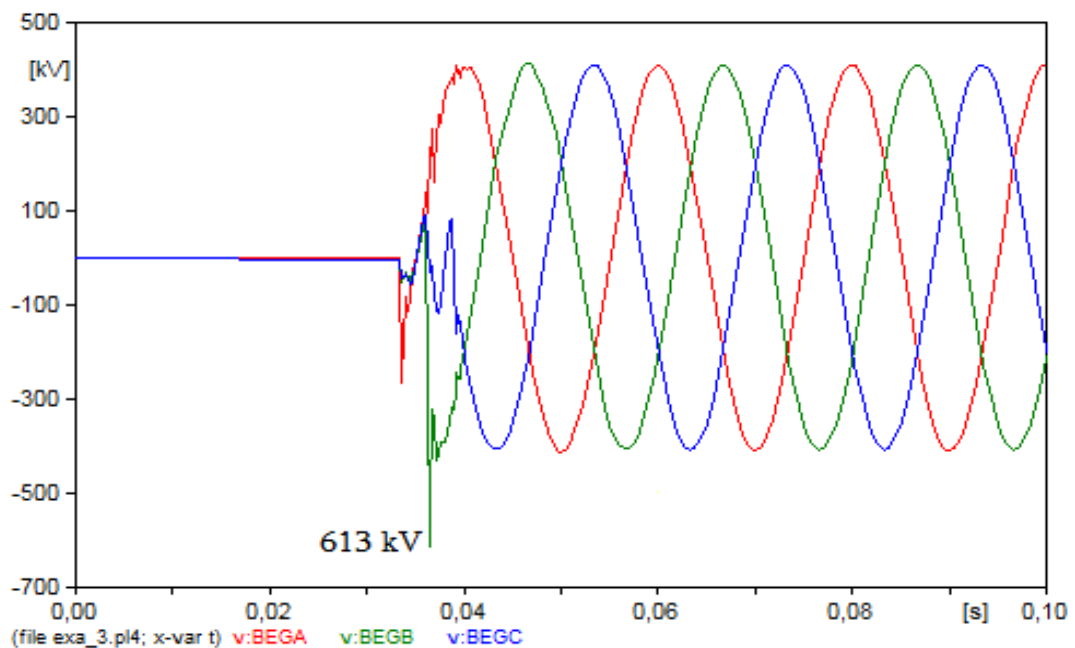


ნახაზი 3. მაღალი ძაბვის ეგზ-ის მოდელირებული სქემა

სქემა შეიცავს ციფრებით აღნიშნულ შემდეგ ელემენტებს:

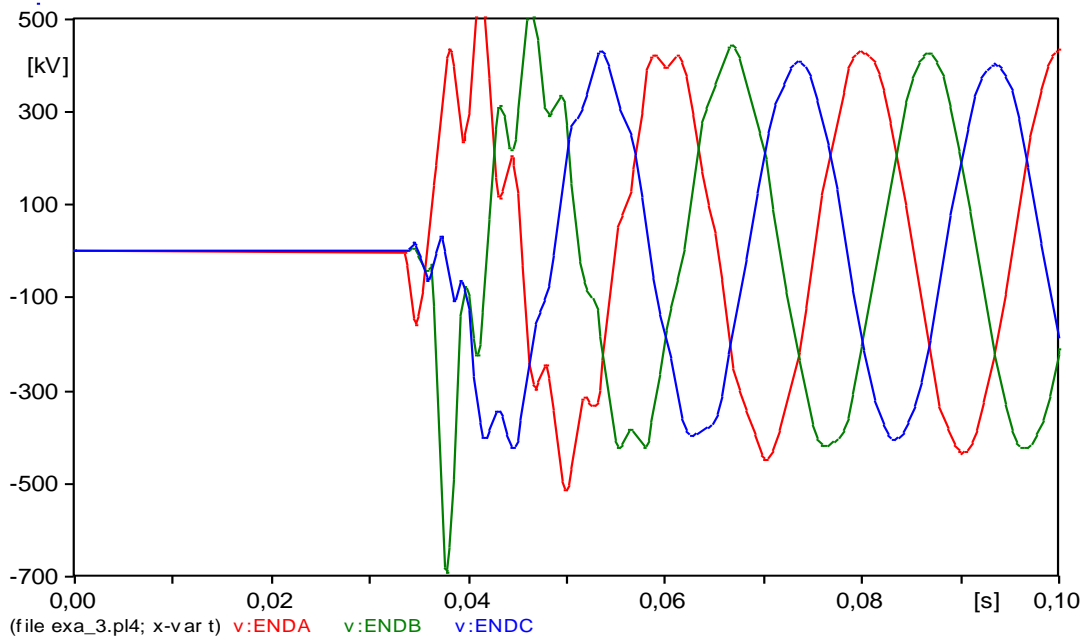
- 1 - სამფაზა ცვლადი ძაბვის სიმეტრიული წყარო;
- 2 - ხაზი, რომელზეც განხორციელებულია ტრანსპოზიცია;
- 3 - კვანძი ამომრთველამდე, სადაც იზომება ძაბვა;
- 4 - სამფაზა ამომრთველი, რომლის საშუალებითაც ვახორციელებთ არასიმეტრიულ კომუტაციას;
- 5 - ხაზის აქტიური გამტარობა;
- 6 - კვანძი ამომრთველის შემდეგ, სადაც იზომება ძაბვა;
- 7 - ხაზი ტრანსპოზიციის გარეშე;
- 8 - ხაზის ბოლო წერტილი;
- 9 - ხაზის ტევადური გამტარობა.

ნახაზ 4-ზე ნაჩვენებია ხაზის არასიმეტრიული კომუტაციის შედეგად 6 კვანძში (ხაზის თავში) მიღებული სამფაზა ძაბვის მრუდები. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს კომუტაციის შედეგად მაქსიმალური გადაძაბვა მივიღეთ მწვანე ფერით აღნიშნულ ფაზაზე - 613 კვ.



ნახაზი 4. ძაბვა ხაზის დასაწყისში

ნახაზ 5-ზე კი ნაჩვენებია კომუტაციის შედეგად ხაზის ბოლოში მიღებული ძაბვა. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს, ხაზის ბოლოში გადაძაბვის სიდიდე მეტი გამოდის ვიდრე ხაზის დასაწყისში და ამ კონკრეტული შემთხვევისთვის იგი აღწევს 700 კვ-ს.



ნახაზი 5. ძაბვა ხაზის ბოლოში

ამომრთველის ფაზების ჩართვის დროის ცვლილებით იცვლება გადაძაბვის სიდიდეები ფაზების მიხედვით, მაგრამ საერთო სურათი უცვლელია და ჩართვის დროების ნებისმიერი კომბინაციის შემთხვევაში ხაზის ბოლოში გადაძაბვა მეტი გამოდის ვიდრე ხაზის თავში. ეს გამოწვეულია კომუტაციის შედეგად გავრცელებული ტალღის არეკვლით ხაზის ბოლოში. [1]

თავი 1. სქემის მოდელირება და სახასიათო სცენარების განხილვა

1.1. კვლევის მეთოდოლოგია

სადისერტაციო თემის კვლევისთვის გამოყენებულია დღეისთვის ყველაზე ეფექტური და ფართოდ გავრცელებული მათემატიკური (კომპიუტერული) მოდელირების მეთოდი. კერძოდ, გამოყენებული იქნება კომპიუტერული მოდელირების რამდენიმე კომპლექსური საშუალება, რომლის მიხედვითაც ჩატარდება კვლევა. პირველ რიგში მოხდება გამოსაკვლევი წრედის დეტალური მოდელირება იმ პროგრამის იმ თითოეული მოდულისთვის, რომელიც მონაწილეობას მიიღებს სიმულაციის პროცესში. შემდეგ გაეშვება მოდელირებული სქემის რამდენიმე სახასიათო სცენარი და აქვე მოხდება დღეისთვის ამ მიმართულებით არსებული პრობლემების ხაზგასმა. მათი გადაჭრის რაციონალური გზების დასახვა მოხდება მოდელირების შედეგების დეტალური გაანალიზების შემდეგ.

1.2. HVDC სისტემის სქემის მოდელირება

მოდელირებისთვის გამოვიყენეთ საინჟინრო მოდელირების პროგრამა DigSILENT Power Factory. პროგრამაში მოცემულია HVDC-სისტემის შაბლონური მოდელი, რომელიც ჩვენ გამოვიყენეთ ანგარიშების ჩასატარებლად (ნახ.7).

ჩვენი მიზანია გადავიღოთ ძაბვის მახასიათებლები სხვადასხვა სცენარების დროს და დავაკვირდეთ მათ, თუ როგორ გავლენას ახდენენ ქსელის ძაბვაზე.

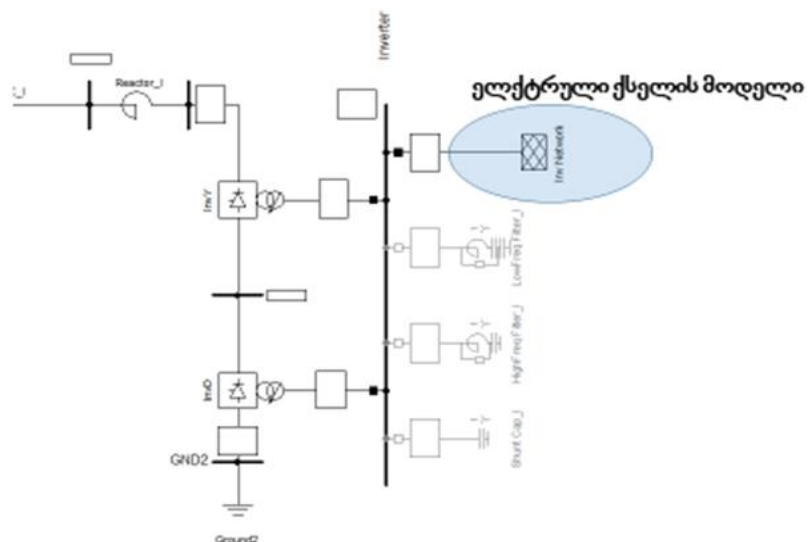
სქემაზე (ნახ. 7) მოცემული გვაქვს AC1-ის მხარეს ცვლადი ძაბვის სალტე თავისი ცვლადი ძაბვის ფილტრებით, AC2-ის მხარესაც მოცემული გვაქვს ცვლადი დენის სისტემა თავისი ფილტრებით, რომლებიც გამოიყენება ჰარმონიკების გასაფილტრად, რათა ჰარმონიკული

დამახინჯება არ გამოიწვიოს ქსელის ძაბვაში. შუა ნაწილში მოთავსებულია მარცხენა მხარეს 12 პულსიანი გამმართველები, რომელიც ცვლად დენს გარდაქმნის მუდმივად და მუდმივი დენის ხაზის საშუალებით მიდის მარჯვენა მხარეს მოთავსებულ ინვერტორებთან, რომლებიც ამ მუდმივ დენს ისევ გარდაქმნიან ცვლად დენად და გასცემენ მეზობელი სისტემის ცვლადი ძაბვის სალტეზე.

ჩვენი მიზანია დავაკვირდეთ უკვე გამართულ ძაბვას, როდესაც გამორთულია ცვლადი ძაბვის ფილტრები და ვნახოთ თუ რა გავლენას მოახდენს ფილტრებით და ფილტრების გარეშე ქსელში ჩართული HVDC-სისტემა, რომელიც 1000 მგვტ-ი სიმძლავრისაა.

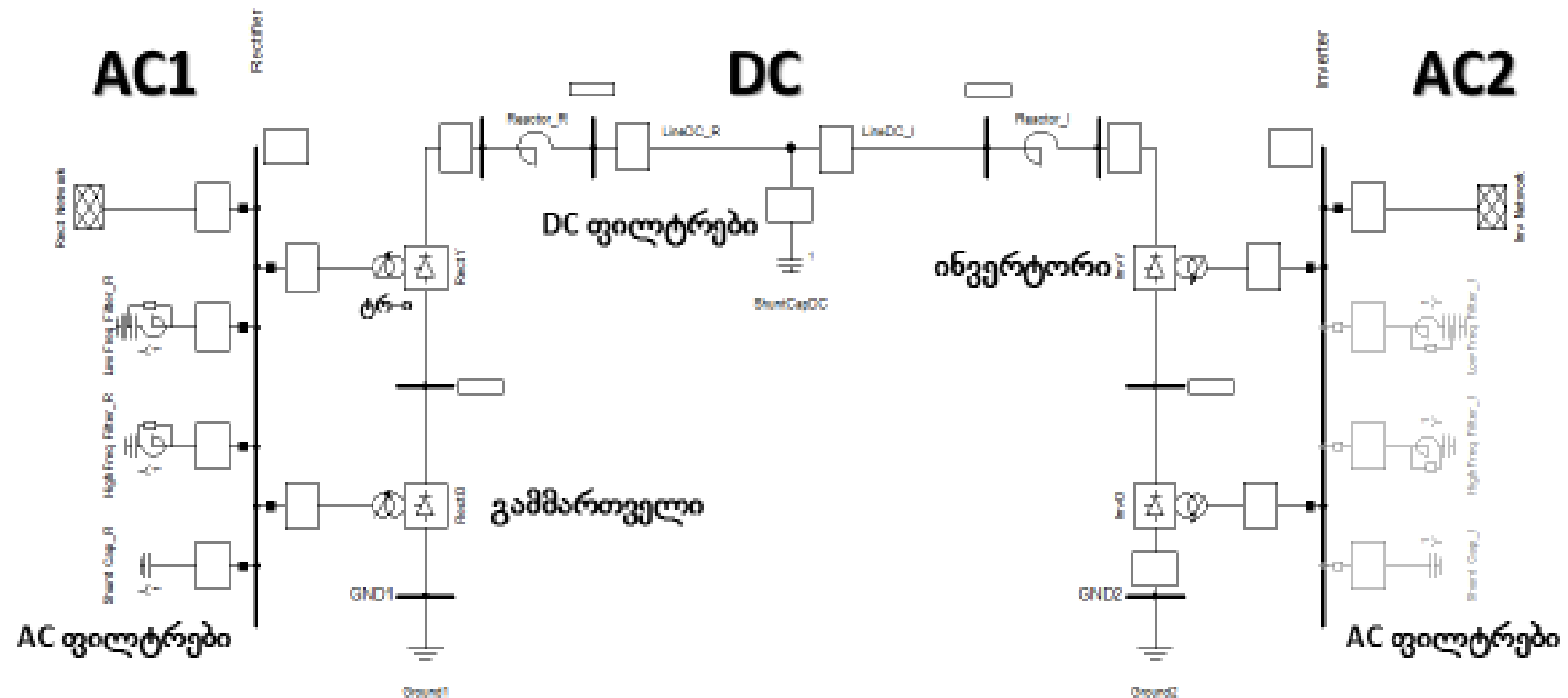
მოდელირებისას გამოვიყენებთ უსასრულოდ მძლავრ ელექტროსისტემას რომელიც მოცემულია ნახაზ 6-ზე. პროგრამაში შესაბამის ჩანართზე დაჭერით შევდივართ ჩვენ შაბლონურ ელექტროსისტემის პარამეტრებში (ნახ .8).

ელექტრული ქსელის მოდელი



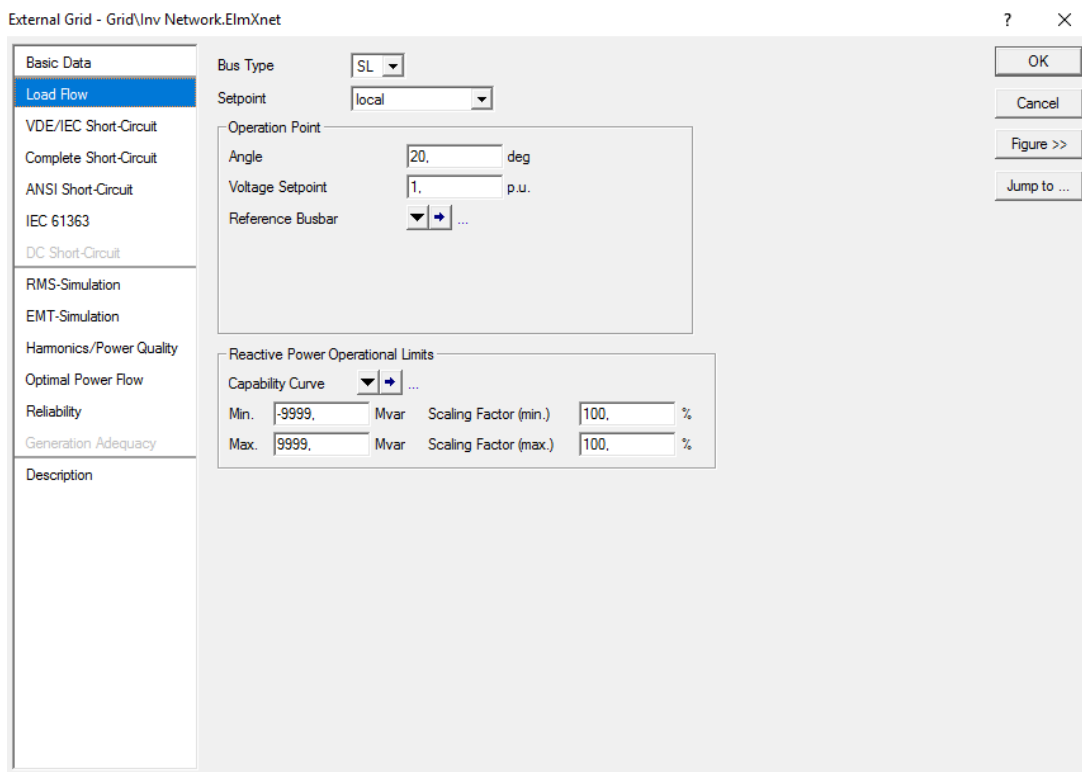
ნახაზი 6. ელექტრული ქსელის მოდელი

HVDC-ის ტიპური მოდელი



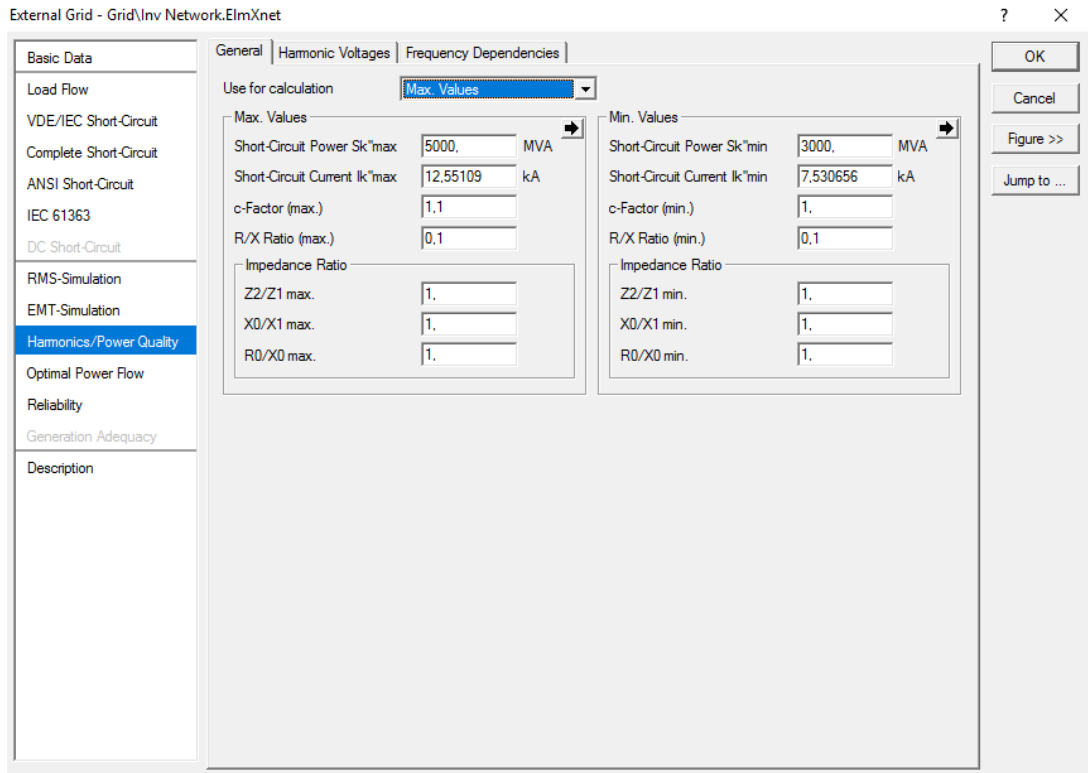
ნახაზი 7. PowerFactory-ის HVDC-ის მოდელი

სადაც მოცემულია მუშა წერტილის პარამეტრები, კერძოდ კუთხე დენსა და ძაბვას შორის რომელიც 20 გრადუსის ტოლია და ძაბვა ფარდობით ერთეულებში რომელიც 1 (p.u) ფარდობითი ერთეულის ტოლია. ძაბვის კონტროლისათვის მოცემული გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის მხარდაჭერის მაქსიმალური ზღვრები, ანუ რამდენის გამომუშავება ან მიღება შეუძლია სისტემას. ჩვენ ჰარმონიკული ანალიზისთვის გვესაჭიროება ჰარმონიკული და ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების გრაფა რომელიც მოცემულია ნახაზ 9-ზე. სადაც მოკლე შერთვის მაქსიმალური სიმძლავრე 5 000 მვა, ხოლო დენი 12,55 კა. მინიმალური მოკლე შერთვის სიმძლავრე 3 000 მვა, დენი - 7,5 კა. სწორედ ეს პარამეტრები გვჭირდება შემდგომი ანალიზისთვის.



ნახაზი 8. ნაკადგანაწილების გრაფა

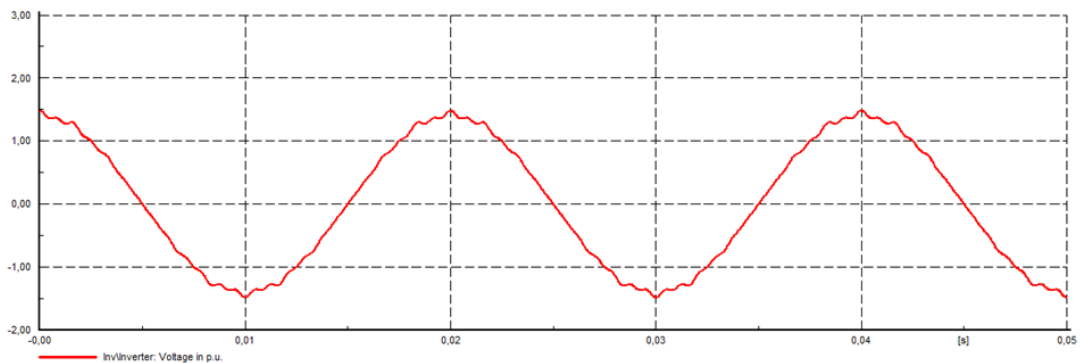
ასევე მოცემული გვაქვს ბაზისური სიდიდეების შესატანი გრაფა, მოკლე შერთვის პარამეტრების გრაფა, ნაკადგანაწილების ოპტიმალური ნაკადგანაწილება.



ნახაზი 9. ჰარმონიკული და ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების გრაფა

1.3. სახასიათო სცენარების განხილვა

პირველ ეტაპზე AC2 ცვლადი დენის სალტეზე ძაბვის დამახინჯების გასაგებად გამოვრთეთ ამ სალტეზე მიერთებული ყველა ცვლადი ძაბვის ფილტრები, შემდგომ 1000 მგვტ-იანი ჩანართი დავტვირთეთ 50 მგვტ-ით და დავაკვირდით ძაბვის მახასიათებელს (ნახ. 10)

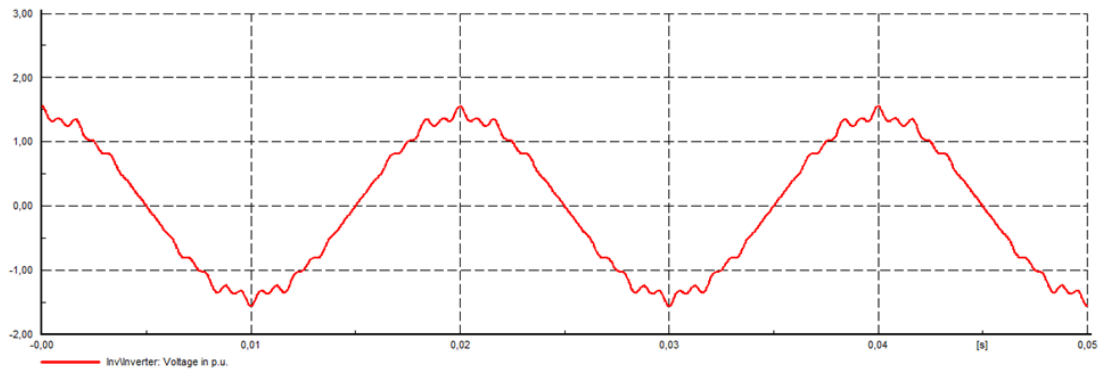


ნახაზი 10. ძაბვა ჩანართის 50 მგვტ-ით დატვირთვის დროს

თუ მრუდს დავაკვირდებით (ნახ.10) დავინახავთ რომ 1000 მგვტ-იანი ჩანართის 50 მგვტ-ით

კიდე 50 მგვტ-ით და ჯამში 100 მგვტ-ით დავტვირთედატვირთვისას ძაბვის სინუსოიდას არ აქვს იდეალური ფორმა, შეიმჩნევა მცირედი დამახინჯება.

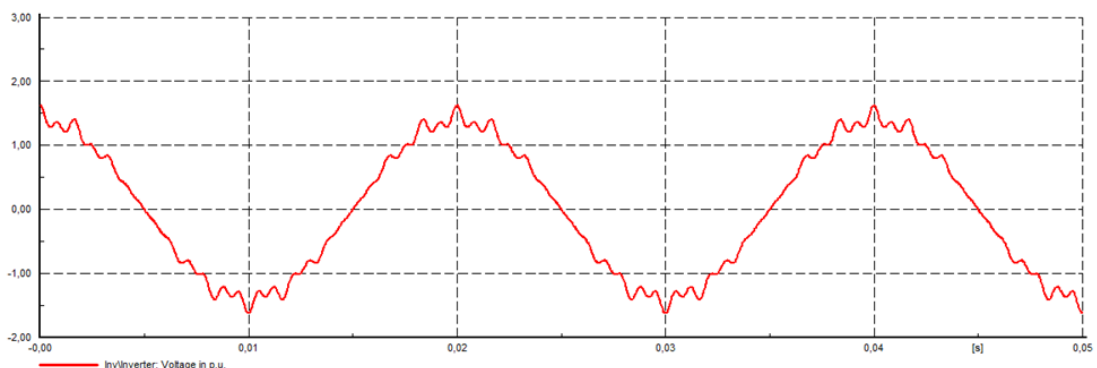
ამის შემდეგ 50 მგვტ-ი გავზარდეთ თ ჩანართი (ნახ. 11).



ნახაზი 11. ძაბვა ჩანართის 100 მგვტ-ით დატვირთვის დროს

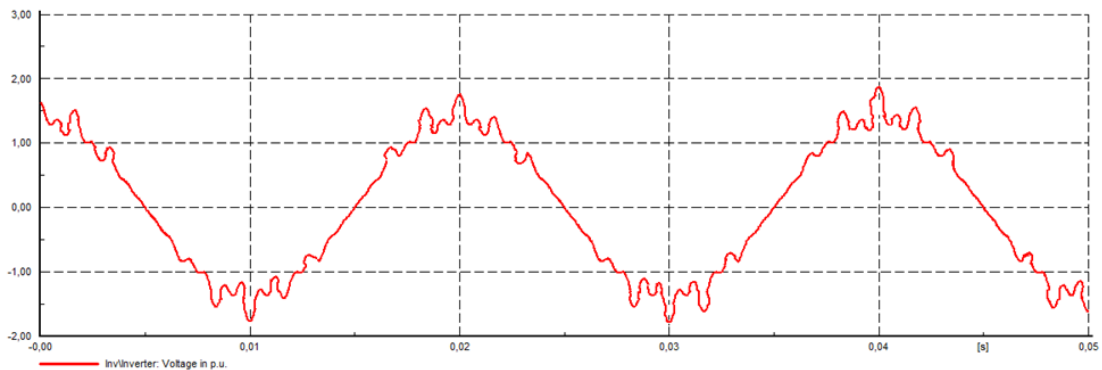
დიაგრამიდან ჩანს, რომ 50 მგვტ-ით დატვირთვისა და 100 მგვტ-ით დატვირთვის შორის განსხვავებაა და უკვე მკაფიოდ შეიმჩნევა სინუსოიდის დამახინჯება.

ამის შემდეგ სიმძლავრე კიდე გავზარდეთ 50 მგვტ-ით 150 მგვტ-ამდე და გადავიღეთ ძაბვის მრუდი (ნახ. 12).



ნახაზი 12. ძაბვა ჩანართის 150 მგვტ-ით დატვირთვის დროს

ვხედავთ, რომ სიმძლავრის ზრდასთან ერთად თუ როგორ იცვლება ძაბვის სინუსოიდის ფორმა.



ნახაზი 13. ძაბვა ჩანართის 250 მგვტ-ით დატვირთვის დროს

მოდელირებულ იქნა 1000 მგვტ სიმძლავრის კონვერტორული კლასიკური ტიპის ქვესადგური, რომლის სიმძლავრის ცვლილება ხდება მუდმივი დენის მნიშვნელობის ცვლილებით. კონვერტორი მიერთებულია ექვივალენტურ ქსელთან და მიერთების წერტილში ქსელის სიმძლავრე განისაზღვრება მიერთების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრის და დენის მნიშვნელობების მიხედვით,

შესაბამისად ქსელის გაძლიერების ან დასუსტების სცენარის სიმულაცია შესაძლებელია მიერთების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრის და დენის მნიშვნელობების ცვლილებით.

ამ ეტაპზე განხილულ იქნა კონვერტორის გავლენა ქსელის ძაბვის ფორმაზე და მოდელირების შედეგად ჩანს, რომ სიმძლავრის ზრდით პროპორციულად იზრდება მიერთების წერტილში ძაბვის ფორმის ჯამური დამახინჯება.

თავი 2. კვანძების ძაბვების სპექტრული ანალიზი

2.1. ჰარმონიკული შემადგენლობა

ჰარმონიკების გავლენით სინუსოიდური ტალღის დამახინჯების ხარისხის განსაზღვრისთვის გამოიყენება კოეფიციენტი, რომელსაც ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტს (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 ელენერგის 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 გაჟღენთვა. ტრანსფორმატორის გაჟღენთვა იწყება მაშინ, როდესაც მკვებავი ძაბვა აღემატება სიდიდეს, რომელიც გაჟღენთვის მახასიათებელზე არაწრფივ უბანზე გადასვლის წერტილს შეესაბამება. დამაგნიტების დენი იწყებს ზრდას და ასევე იზრდება ამ დენში ჰარმონიკული შემადგენლობა. გაჟღენთილი 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 ვარდნებიც არასინუსოიდურია. ახეს 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.

2.2. ჰარმონიკული ფილტრები ცვლადი ძაბვის მხარეს

HVDC სისტემა ცვლადი დენის წრედიდან მოითხოვს არასინუსოიდალურ დენს, რომელიც შეიცავს მაღალი რიგის ჰარმონიკებს. ამ ჰარმონიკების შესამცირებლად ცვლადი ძაბვის მხარეს აყენებენ ჰარმონიკულ ფილტრებს. მაგალითისთვის, 12 პულსიანი ხიდი გენერირებს 11, 13, 23, 25 და უფრო მაღალი რიგის ჰარმონიკებს. ფილტრებს აყენებენ, რათა ჩამოთვლილ ჰარმონიკათა ამპლიტუდები შემცირდეს ცვლადი ძაბვის სისტემისთვის დასაშვებ სიდიდემდე. სიმძლავრის კონვერსიის პროცესში კონვერტორი მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს, რომლის ნაწილიც კომპენსირდება სწორედ ამ ჰარმონიკული ფილტრების საშუალებით, ხოლო ნაწილი კონდენსატორთა ბატარეებით. CCC-ის შემთხვევაში (Capacitor commutated converter), რომელიც გამოჩნდა 1950 წლიდან, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ხდება კონვერტორის ტრანსფორმატორსა და კონვერტორს შორის დამონტაჟებული მიმდევრობით ჩართული კონდენსატორთა ბატარეების საშუალებით. ასეთ შემთხვევაში მცირდება გამოყენებული გამთიშველების და ამომრთველების რაოდენობა და შესაბამისად ფართი, რომელიც საჭიროა HVDC სისტემის მონტაჟისათვის, თუმცა კონდენსატორების კომუტაცია იწვევს ძაბვის ნახტომს, რაც სახიფათოა ელექტროტექნიკური მოწყობილობებისთვის, რომლებიც გათვლილია ნომინალურ ძაბვაზე სამშაოდ.

2.3. ჰარმონიკების გავლენა ელექტრული სისტემის ელემენტებზე

ჰარმონიკების გავლენის ხარისხი ელექტრული 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 ამ მოწყობილობაში ძალიან დიდი ჰარმონიკული დენების გავლისასაც კი მიყენებული ზიანი ძალიან უმნიშვნელოა. მაგალითად მახურებელი მოწყობილობები ან მძლავრი სამრეწველო ღუმელები არანაირ ზეგავლენას არ განიცდიან ჰარმონიკული დენებისგან. თუმცა ელექტრული სისტემის ზოგიერთი სხვა დანადგარი შესაძლოა დიდი უარყოფითი ზეგავლენის ქვეშ იყოს ჰარმონიკული დენების მიერ.

2.4. 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 მოწყობილობის გადახურებას იძლევა. ჰარმონიკებმა აგრეთვე შესაძლოა გამოიწვიონ მამუხრუჭებელი მომენტების ან მექანიკური ძალების შექმნა მბრუნავი მოწყობილობის ლილვზე, რამაც შესაძლოა რეზულტატში ლილვის გატყდომამდეც კი მიგვიყვანოს. ასეთი ძალების წარმოქმნის ნათელი მაგალითია მოვლენა, რომელსაც ქვესინქრონულ რეზონანს უწოდებენ. (SSR – subsynchronous resonance). გენერატორები შედგებიან ინდუქციური კოჭებისგან და სწორედ ამიტომ დიდი საფრთხე იქმნება და წინაპირობა რეზონანსული მოვლენის ელექტრულ ქსელში.

2.5. ტრანსფორმატორები

ტრანსფორმატორებში ჰარმონიკული დენები ძირითადად იწვევენ გადახურებას. ჰარმონიკის სიხშირის გაზრდასთან ერთად მის მიერ ტრანსფორმატორში გამოწვეული გადახურებაც ირზდება. 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 ჰარმონიული სპექტრი ტრანსფორმატორში იწვევს მაღალი სიხშირის ხმამაღალი ბგერების გამოცემას.

მაღალი რიგის ჰარმონიკებმა ტრანსფორმატორებში აგრეთვე შესაძლოა გამოიწვიონ ჰარმონიკული გადამეტებვები. ასეთი ტიპის გადამეტებვები 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 გაჟღენთვა, ნაადრევი დაბერება და აგრეთვე ხვიათაშორისი მოკლე შერთვები.

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

მაგალითად, გეომაგნიტური შტორმის დროს ელექტრულ სისტემაში შეიძლება წარმოიქმნას უამრავი სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკა. მაღალი

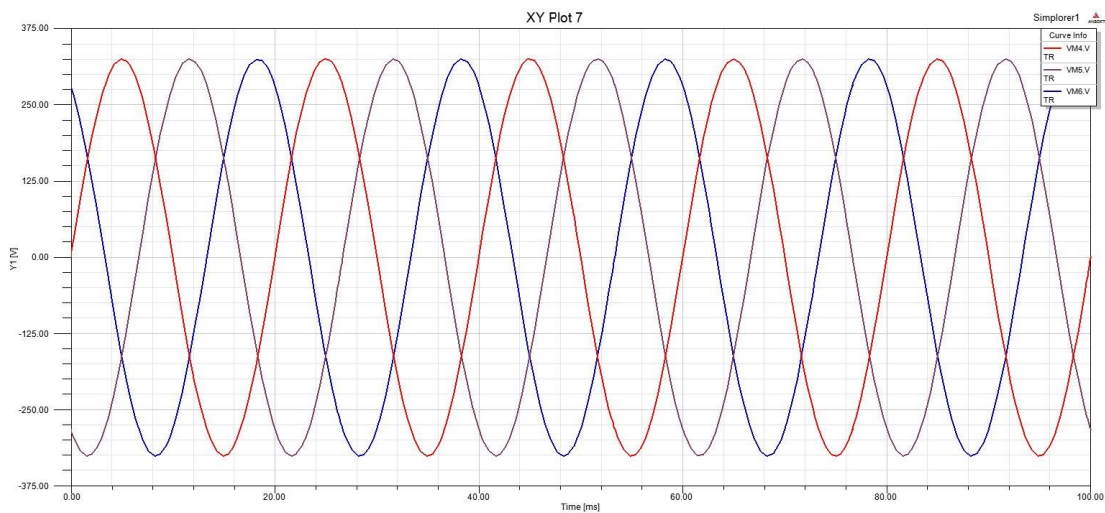
რიგის ჰარმონიკები პოულობენ დაბალი წინაღობის მქონე არხებს, პარალელური კონდენსატორების სახით და მიწაში ჩაედინებიან სწორედ მათი გავლით. რელეურმა დაცვამ შესაძლოა ეს დენები აღიქვას როგორც მოკლე შერთვის დენები და გამორთოს კონდენსატორი. ინდივიდუალურ კონდენსატორულ ქილებს შესაძლოა აგრეთვე გააჩნდეთ დნობადი მცველები. დიდი ამპლიტუდის ჰარმონიკულმა დენებმა შესაძლოა გამოიწვიოს ამ მცველების გაწყვეტა (გადნობა) და შესაბამისად კონდენსატორული ქილების გამორთვა წრედიდან.

2.7. ჰარმონიკების კონტროლი

ჰარმონიკების გავრცელებისა და მათი უარყოფითი გავლენის შესამცირებლად არსებობს ბევრი მეთოდი. მაგალითად, დაინდუქცირებული ჰარმონიკული დენებისა და ძაბვების ზემოქმედებისგან თავიდან აცილების მიზნით სატელეკომუნიკაციო მოწყობილობები ხშირად ეკრანირებულია. ამ ქვეთავში აღვწერთ ჰარმონიკების კონტროლის ორ მეთოდს. პირველი მეთოდი გულისხმობს მესამეული გრაგნილების სამკუთხედად შეერთებას, ხოლო მეორე, ჰარმონიკების უშუალო ფილტრაციას.

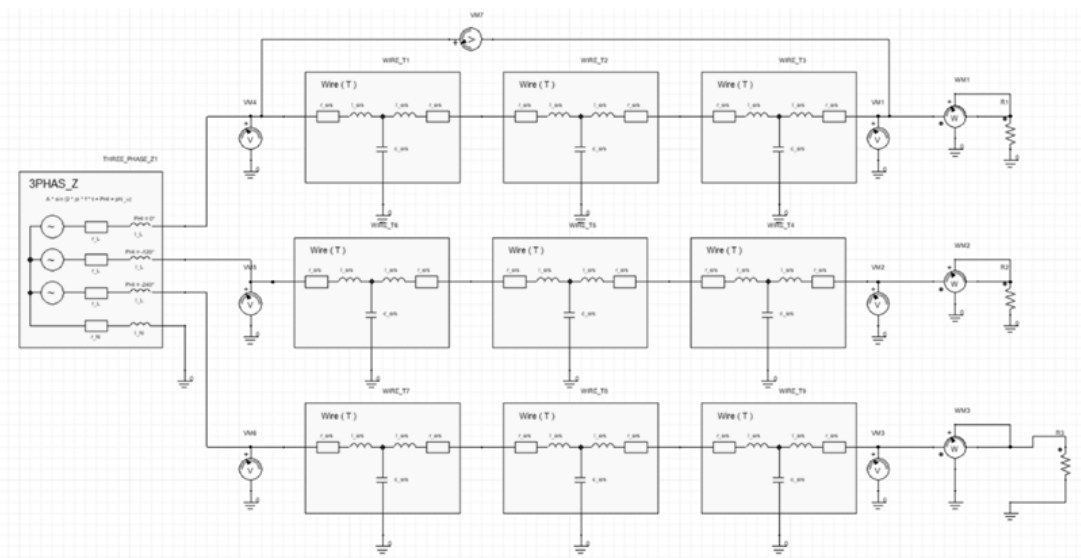
2.8. ძაბვის დამახინჯება ასიმეტრიული დატვირთვის დროს

სამფაზა სისტემაში ასიმეტრიული პროცესების შესასწავლად მოვახდინეთ ცვლადი დენის სამფაზა სისტემის მოდელირება საიჟინრო მოდელირების პროგრამა Ansoft Simplorer-ის გამოყენებით (ნახ. 15), სადაც მოცემულია სამფაზა ცვლადი ძაბვის წყარო, რომლის ამპლიტუდური ხაზური ძაბვის მნიშვნელობა 325 ვოლტია, სიხშირე 50 ჰერცი, ფაზებს შორის ძვრის კუთხე შესაბამისად 0, 120 და 240 გრადუსს შეადგენს, რაც იმაზე მიუთითებს რომ ჩვენს მიერ მოდელირებული ძაბვის წყარო არის იდეალურად სიმეტრიული (ნახ. 14).



ნახაზი 14. სამფაზა სიმეტრიული სისტემის სინუსოიდალური მრუდები

მოდელირებული სქემა ნაჩვენებია ნახაზ 15, სადაც ვზომავთ ძაბვებს ხაზის თავში და ბოლოში.



ნახაზი 15. Ansoft Simplorer-ში მოდელირებული სქემა

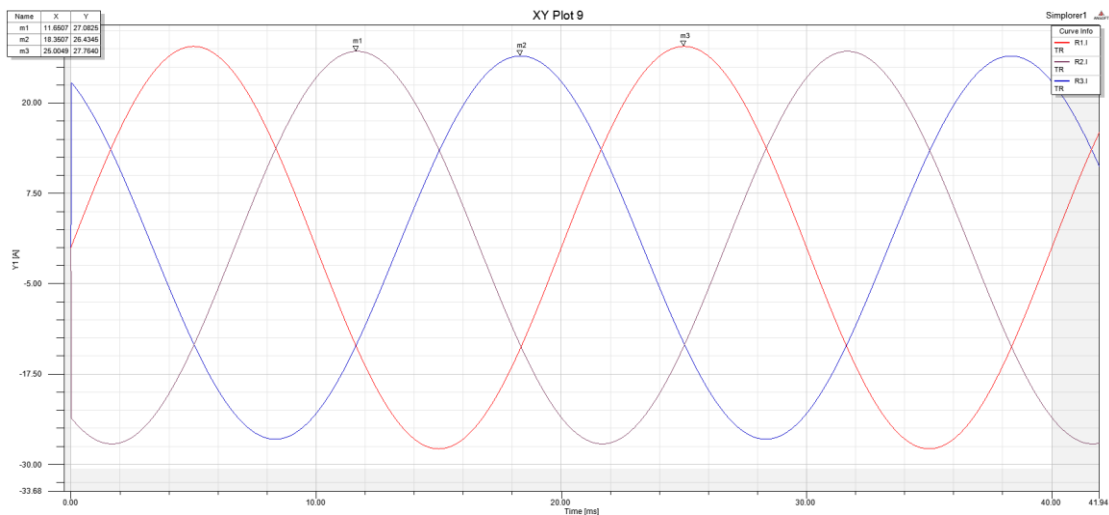
სამფაზა სისტემებში ასიმეტრიას იწვევს ფაზების სხვადასხვა დატვირთვა, სწორედ ამის მოდელირებისთვის თითოეულ ფაზაში მოვლეთ აქტიური წინაღობა ერთმანეთისგან განსხვავებული სიდიდეებით. კვლევის ჩასატარებლად საჭიროა ვიცოდეთ რა სიდიდის დენები და ძაბვაა

მოდებული თითოეულ ფაზაში, ასევე საჭიროა ვიცოდეთ რა სიმძლავრითაა დატვირთული ფაზები, ამისთვის სქემაში თითოეულ ფაზაზე ხაზსა და მიწას შორის ჩავრთეთ ვატმეტრები.

საქართველოში მოქმედი ქსელის წესების მიხედვით, ფაზებს შორის ასიმეტრია 1%-ს არ უნდა აღემატებოდეს, სწორედ ესაა ჩვენი კვლევის მიზანიც, ანუ დავადგინოთ კონკრეტული ასიმეტრიული დატვირთვის დროს რა სიმძლავრეზე შევძლებთ შევინარჩუნოთ ის ფარგლები რომელიც მოცემულია ქსელის წესების მიხედვით.

ანგარიში დავიწყეთ კონკრეტული მაგალითის გამოყენებით, კერძოდ A ფაზა დავტვირთეთ 10,1 ომი სიდიდის წინაღობით, B- ფაზა 10,3 ომით და C - ფაზა 10,6 ომით, მათი ჯამური სიმძლავრე სამივე ფაზაში ტოლია 11,304 კილოვატის.

თითოეულ ფაზაში დენების გაზომვა მოვახერხეთ მოდელირების პროგრამის სპეციალური მოდულის საშუალებით და გამოვიტანეთ შესაბამისი მრუდები (ნახ. 16), საიდანაც ავიღეთ შესაბამისი ანათვლები ფაზების მიხედვით და შევიტანეთ ცხრილ. 1-ში.



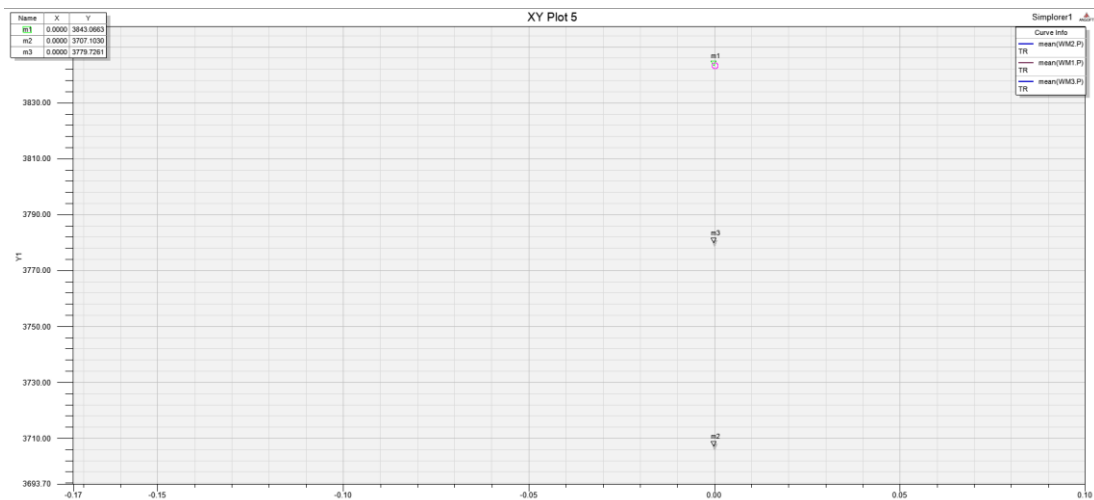
ნახაზი 16. დენების სიდიდეები ფაზების მიხედვით

დატვირთვა თითო ფაზაზე იანგარიშება ფორმულით $I^2 R = P$, სადაც I არის დენის ეფექტური მნიშვნელობა, ამიტომ ჩვენს მიერ ნაანგარიშები დენები

უნდა გავყოთ $\sqrt{2}$ -ზე, რათა მივიღოთ დენის მნიშვნელობა პროგრამის საშუალებით გავზომეთ თითოეული ფაზის დატვირთვა და გამოვიანგარიშოთ $P_{ჯამ} = P_1 + P_2 + P_3$.

ცხრილი 1. ანათვლები ფაზების მიხედვით

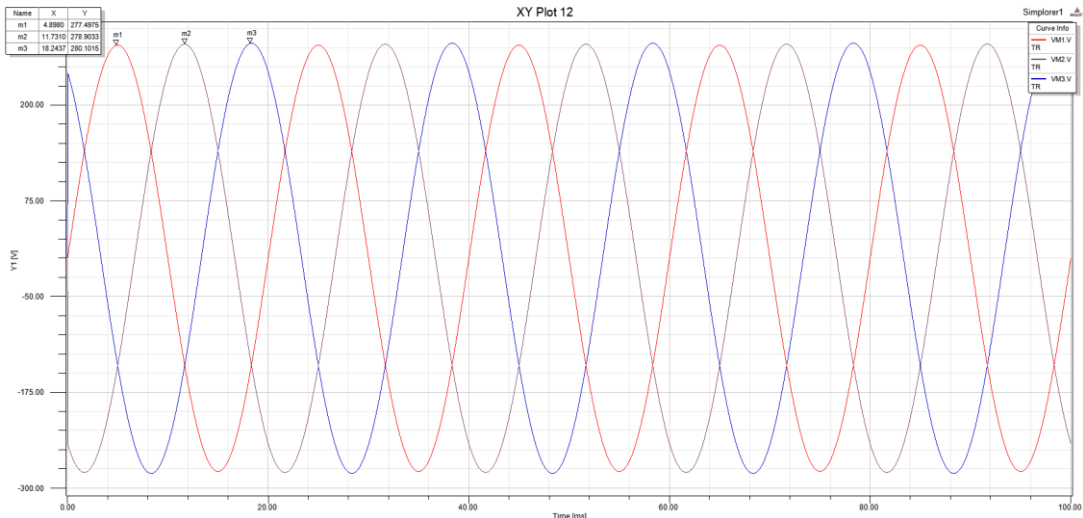
R_1 (ომი)	R_2 (ომი)	R_3 (ომი)	I_1 (ა)	I_2 (ა)	I_3 (ა)	$P_{ჯამ}$ (კვტ)	U_1 (ვ)	U_2 (ვ)	U_3 (ვ)	$U_{საშ}$ (ვ)	$U_{დასტად}$ (%)
10.1	10.3	10.6	27	26.4	27.5	11.30	278	279	280	279	0.358
9.09	9.27	9.54	29.6	28.9	30.1	12.17	273.5	274.6	275.9	275	0.363
8.18	8.34	8.58	32.4	34.6	32.9	13.07	268.8	269.9	271.2	270	0.456
7.36	7.5	7.72	35.3	34.5	35.8	14.00	263.7	264.8	266.3	265	0.5
6.62	6.75	6.9	38.45	37.8	39	14.96	258	259.5	260.7	259	0.52
5.9	6	6.21	42.2	41.1	42.7	15.97	252	253.1	255.2	253	0.869
5.3	5.4	5.59	45.7	44.6	46.4	16.91	245.8	247.1	249.2	247	0.89
4.7	4.8	5	49.9	48.5	50.7	17.93	238.3	239.9	242.6	240	1.08



ნახაზი 17. სიმპლავრეები ფაზების მიხედვით

ძაბვების ანგარიშისთვის გამოვიყენეთ ასევე პროგრამის შესაბამისი მოდული, რომელზედაც გამოსახულია ფაზების ძაბვების სიდიდეები (ნახ. 4) და შემდგომ ვიანგარიშეთ საშუალო ძაბვის სიდიდე:

$$\frac{U_{მაქს} + U_{საშ} + U_{მინ}}{3} = U_{საშ}$$



ნახაზი 18.ძაბვის სიდიდების ფაზების მიხედვით

ძაბვების ანგარიშის შემდეგ ვიანგარიშეთ ფაზებს შორის გადახრა შემდეგი ფორმულის გამოყენებით:

$$\frac{U_{მაღ} - U_{საშ}}{U_{საშ}} = U_{დას.გად}$$

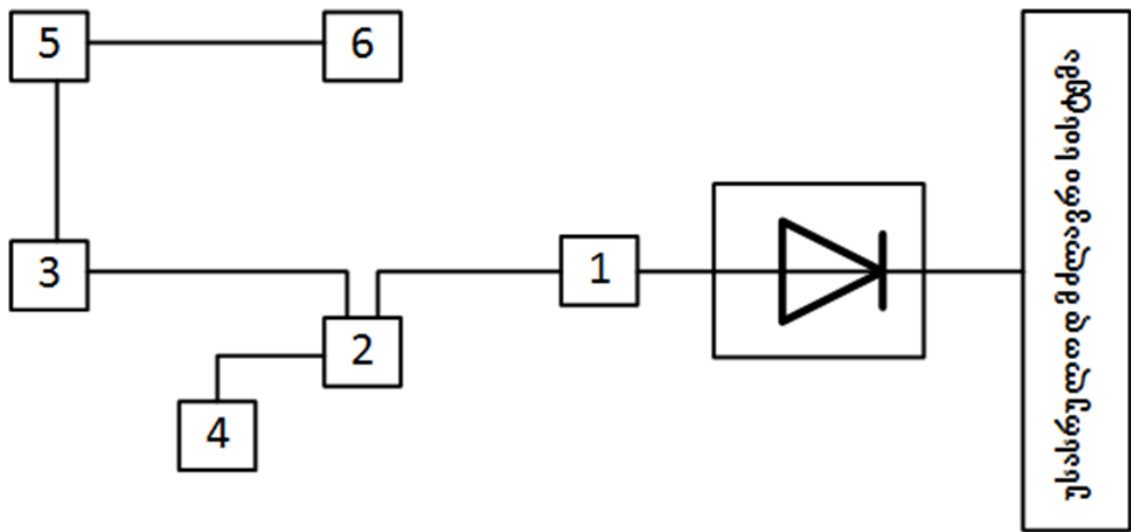
ანგარიშის პირველ ეტაპზე დავადგინეთ რომ კონკრეტული დატვირთვის დროს, რომელიც შეადგენდა 11.304 კილოვატს, ვნახეთ რომ ფაზების ძაბვების ჯამური გადახრამ შეადგინა 0,358%, რაც არსებული ქსელის წესებით დასაშვებია.

ჩვენ დავიწყეთ დატვირთვის 10% ბიჯებით ცვლა რის შედეგადაც დავადგინეთ კონკრეტული დატვირთვის და სქემის პირობებში რა იყო დასაშვები სიმძლავრე, რომელის დროსაც ძაბვების გადახრა არ აღემატებოდა 1%-ს რომელიც, როგორც ზემოთ ვახსენეთ დადგენილია საქართველოში მოქმედი ქსელის წესებით.

ჩვენმა კვლევამ აჩვენა, რომ დატვირთვის 17.931 კილოვატის ზევით გაზრდის შემთხვევაში ფაზების ასიმეტრიის ზღვარი ცდება 1%-იან ნიშნულს (ცხრილი 1). ეს ყოველივე ყურადსაღებია, როდესაც ვახდენთ ცალფაზა მომხმარებლის კომუტაციას, რადგან სწორად უნდა შევარჩიოთ არსებული მომხმარებლის სიდიდე, რათა მისმა კომუტაციამ არ გამოიწვიოს დადგენილი ზღვრების და ნორმების დარღვევა.

2.9. კვანძების ძაბვების სპექტრული ანალიზისთვის სქემის მოდელირება

მოდელირებისთვის გამოვიყენეთ საინჟინრო მოდელირების პროგრამა Ansoft Simplorer, სადაც შევქმენით კონკრეტული 6 კვანძიანი სქემა, რომლებიც უსასრულოდ მძლავრ სისტემას უკავშირდებიან HVDC კონვერტორული ქვესადგურის გავლით (ნახ. 19). აღნიშნული სისტემა არის 500 კვ ძაბვის და შესაბამისად სქემის ელემენტებში შეტანილია შესაბამისი პარამეტრები (ნახ. 20).



ნახაზი 19. Ansoft Simplorer-ში მოდელირებული 6 კვანძიანი სქემა

როგორც ნახაზ 20-დან ჩანს, მოცემული კონვერტორული ქვესადგური მიერთებულია პირველ კვანძთან, რომელზეც მოდებულია ცვლადი დენის ფილტრები. პირველ კვანძს კავშირი აქვს მეორე კვანძთან, ხოლო მეორე კვანძს კავშირი აქვს მეოთხე და მესამე კვანძებთან, ეს უკანასკნელი უკავშირდება მეხუთე კვანძს და მეხუთე კვანძის გავლით მეექვსე კვანძთან რომელსაც კავშირი აქვს მხოლოდ მეხუთე კვანძთან, აღნიშნული კვანძების ნომინალური ძაბვაა 500 კვ. აღნიშნული ქსელი წარმოდგენილია სამზაფზა შესრულებით, სადაც გათვალისწინებულია ტევადობები ხაზსადა მიწას შორის, ასევე ხაზის გრძივი და განივი წინაღობები. მხედველობაში მიღებულია ტრანსფორმატორების გრაგნილების გაჟღენთვაც, რადგან ამან შესაძლებელია გამოიწვიოს ინტერჰარმონიკების წარმოქმნა ქსელში.

ჩვენი ამ მოდელირების მიზანია დავადგინოთ სიმძლავრის 100 მგვტ-იდან 1000 მგვტ-მდე ცვლილებისას როგორი იქნება ჰარმონიკული სპექტრი თითოეული კვანძისთვის.

განვიხილოთ ორი შემთხვევა: პირველი იყო, როდესაც ცვლადი ძაბვის ფილტრები გამორთული იქნებოდა და ჩავატარეთ თითოეული კვანძისთვის ძაბვების სპექტრული ანალიზი, ხოლო მეორე შემთხვევაში მოქმედებაში გვქონდა ცვლადი ძაბვის ფილტრები და ამ შემთხვევაშიც ჩავატარეთ იგივე ანგარიშები.

თითოეული შემთხვევისთვის გამოთვლილია ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი (Total Harmonic Distortion- THD). ეს სიდიდე როგორც წესი ითვალისწინებს მრუდის მთელ სპექტრს. თუმცა, გამომდინარე იმ ფაქტიდან რომ ჰარმონიკის სიხშირის ზრდასთან ერთად მისი ამპლიტუდა სულ უფრო და უფრო მცირდება არ აქვს აზრი მთელი დიაპაზონის გათვალისწინებას. აქედან გამომდინარე ანგარიშებში ჩვენ გათვალისწინებული გვაქვს ჰარმონიკული სპექტრი 37 ჰარმონიკის ჩათვლით, რაც სავსებით საკმარისია პრეციზიული რეზულტატის მისაღწევად. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება გამოითვლება ფორმულით:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=2}^{\infty} U_{\gamma}^2}}{U_1} 100$$

სადაც

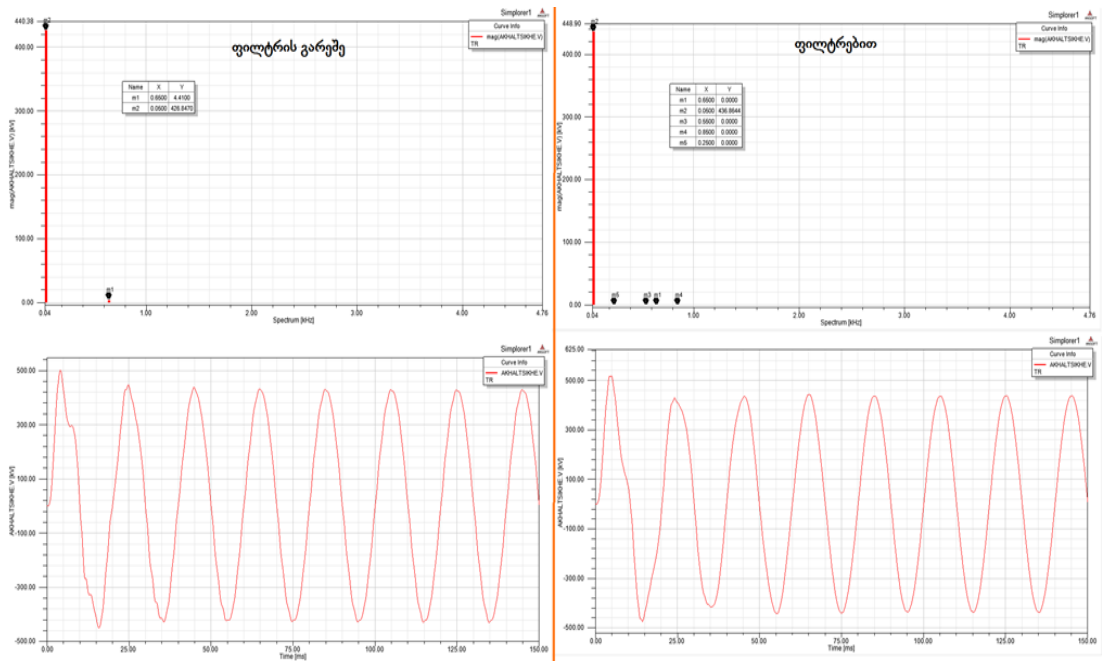
U_{γ}^2 – γ რიგის ჰარმონიკის კვადრატია

U_1 - კი პირველი რიგის ჰარმონიკა, ანუ 50 ჰერციანი მდგენელი ჩვენს შემთხვევაში

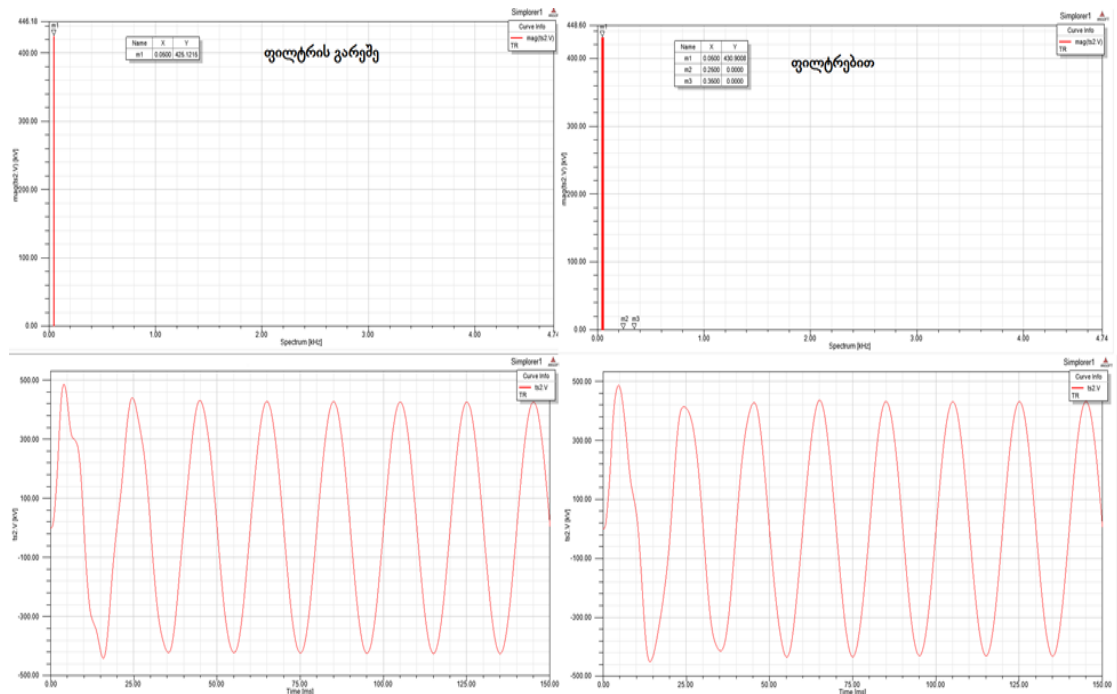
თითოეული კვანძისთვის პროგრამის სპეციალური მოდულის საშუალებით გადავიღეთ ძაბვების სპექტრული დიაგრამები.

ქვემოთ მოცემულია ძაბვისა და ჰარმონიკების მრუდები მინიმალური (100 მგვტ) და მაქსიმალური (1000 მგვტ) კონვერტორული ქვესადგურის დატვირთვის დროს.

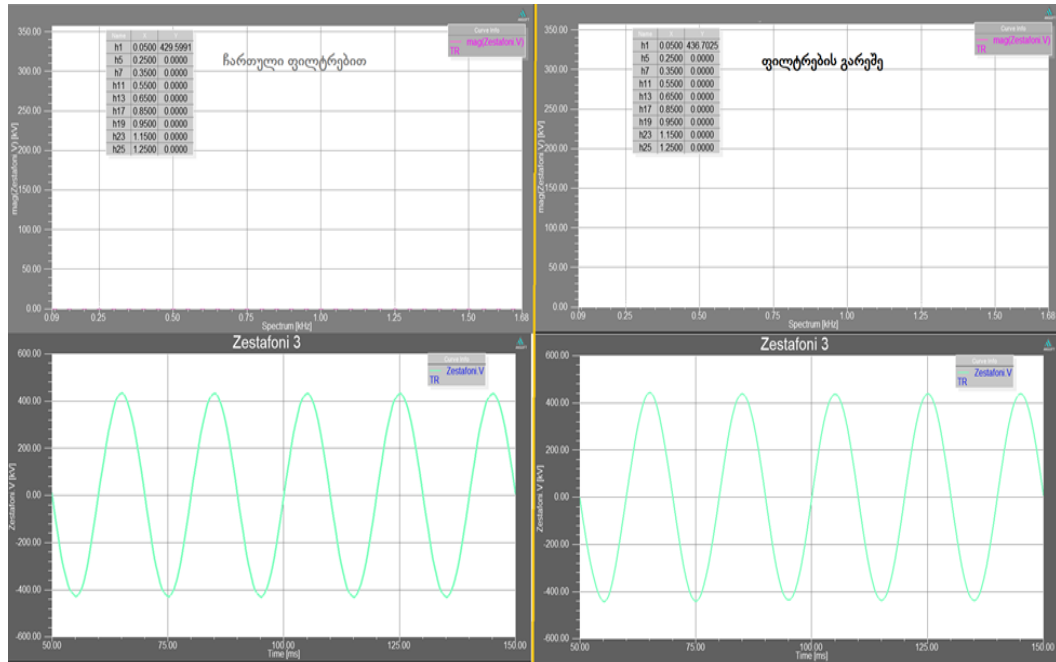
მინიმალური დატვირთვის დროს (100 მგვტ)



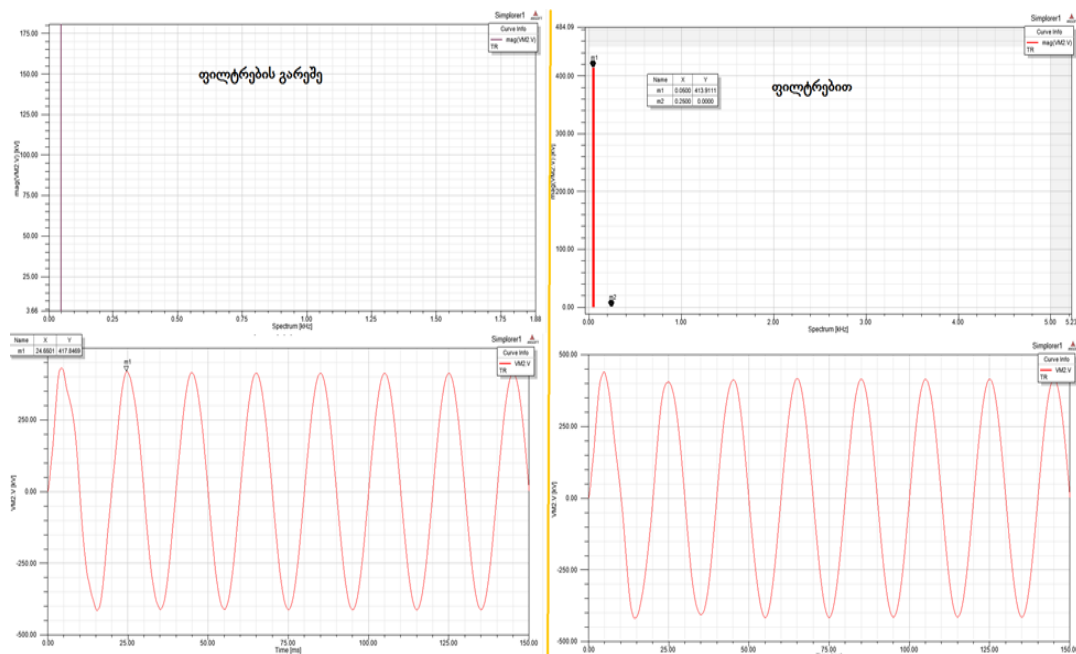
ნახაზი 21. კვანძი 1-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით



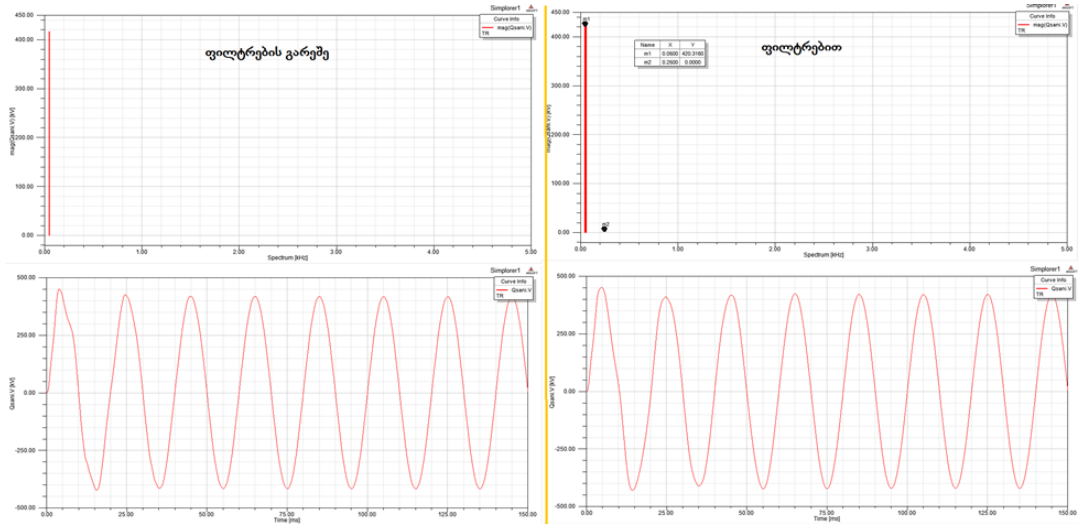
ნახაზი 22. კვანძი 2-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით



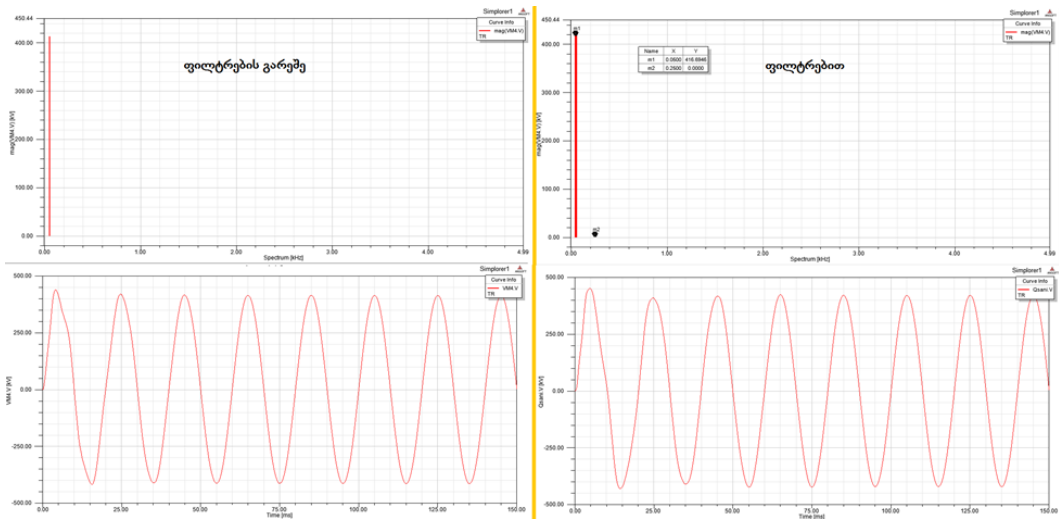
ნახაზი 23. კვანძი 3-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით



ნახაზი 24. კვანძი 4-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით



ნახაზი 25. კვანძი 5-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მძრ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით



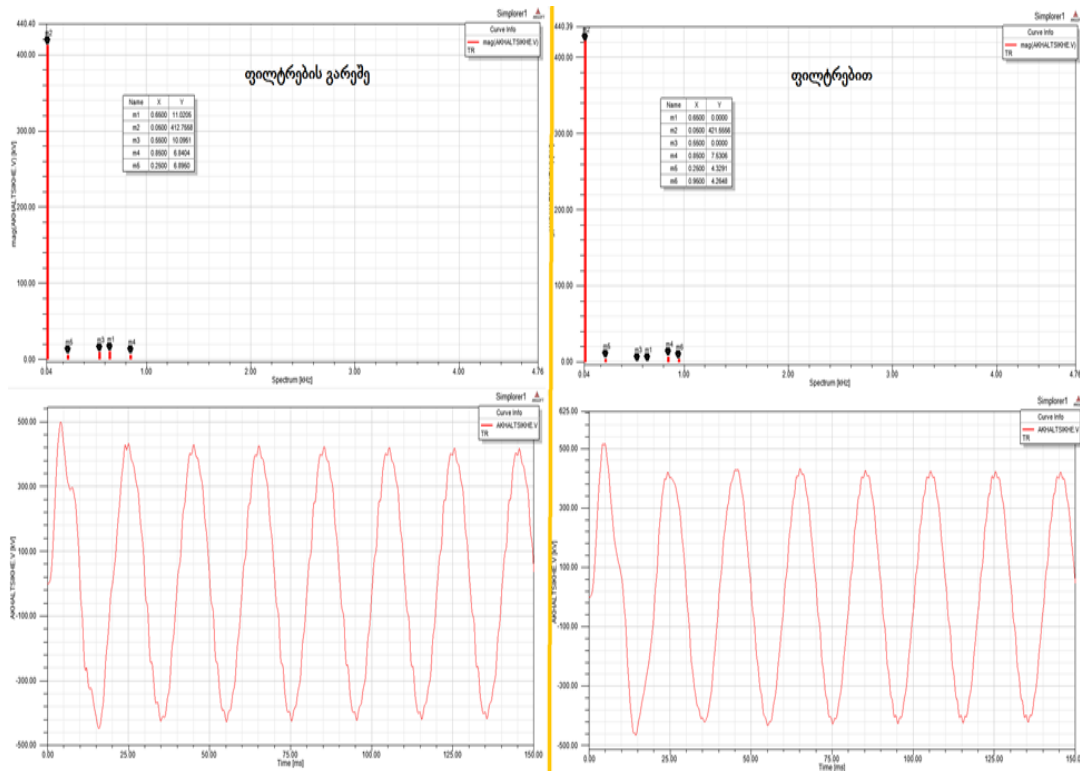
ნახაზი 26. კვანძი 6-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მძრ ჩართულია 100 მგვტ-ი სიმძლავრით

ზემოდ მოყვანილი მრუდებიდან ჩანს, რომ მუდმივი დენის ჩანართის მინიმალურ საოპერაციო ზღვარზე მუშაობისას (100 მგვტ), მოდელირებული ქსელში სხვადასხვა კვანძებში გვაქვს ძაბვის სინუსოიდის ერთმანეთისგან განსხვავებული დამახინჯებული ფორმები, რაც იმას გულისხმობს, რომ თითოეული კვანძის ჰარმონიკული დამახინჯება დამოკიდებულია იმაზე

თუ სად მდებარეობენ ისინი ჰარმონიკების წყაროდან, ჩვენ შემთხვევაში მუდმივი დენის კონვერტორული ქვესადგურიდან.

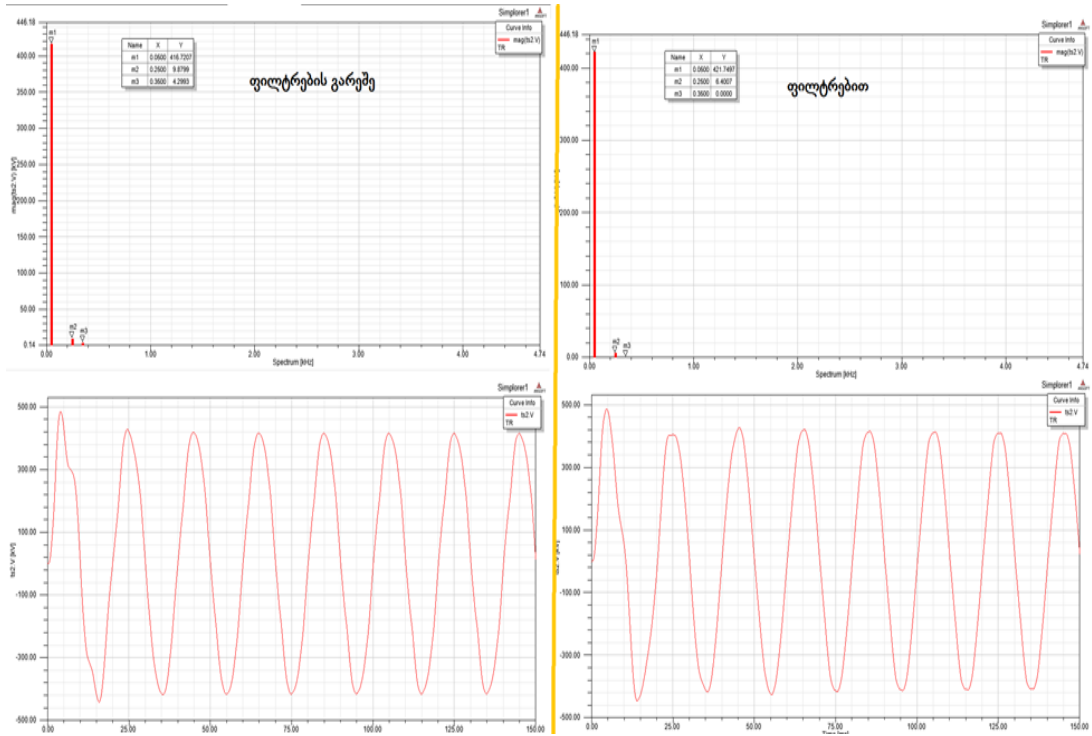
ეხლა ვნახოთ ჩანართის 1000 მგვტ-ის სიმძლავრის დატვირთვისას რა სურათი გვექნება იმავე კვანძებში:

მაქსიმალური დატვირთვის დროს (1000 მგვტ)

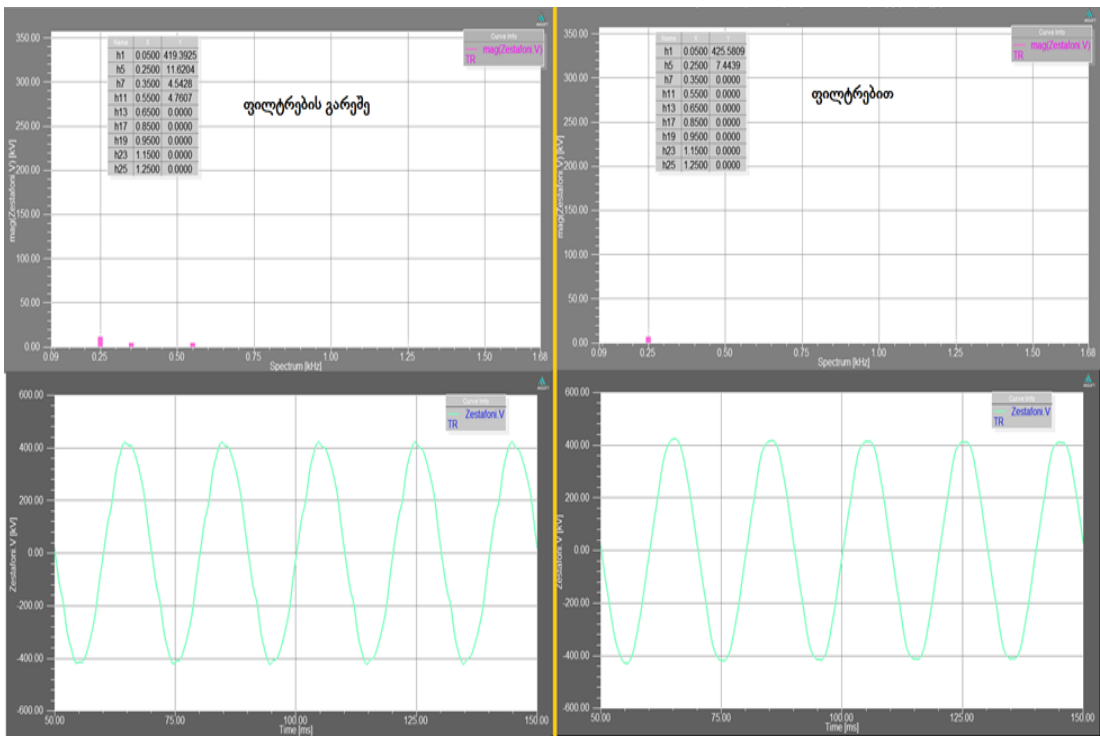


ნახაზი 27. კვანძი 1-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მძრ ჩართულია 1000 მგვტ-ი სიმძლავრით

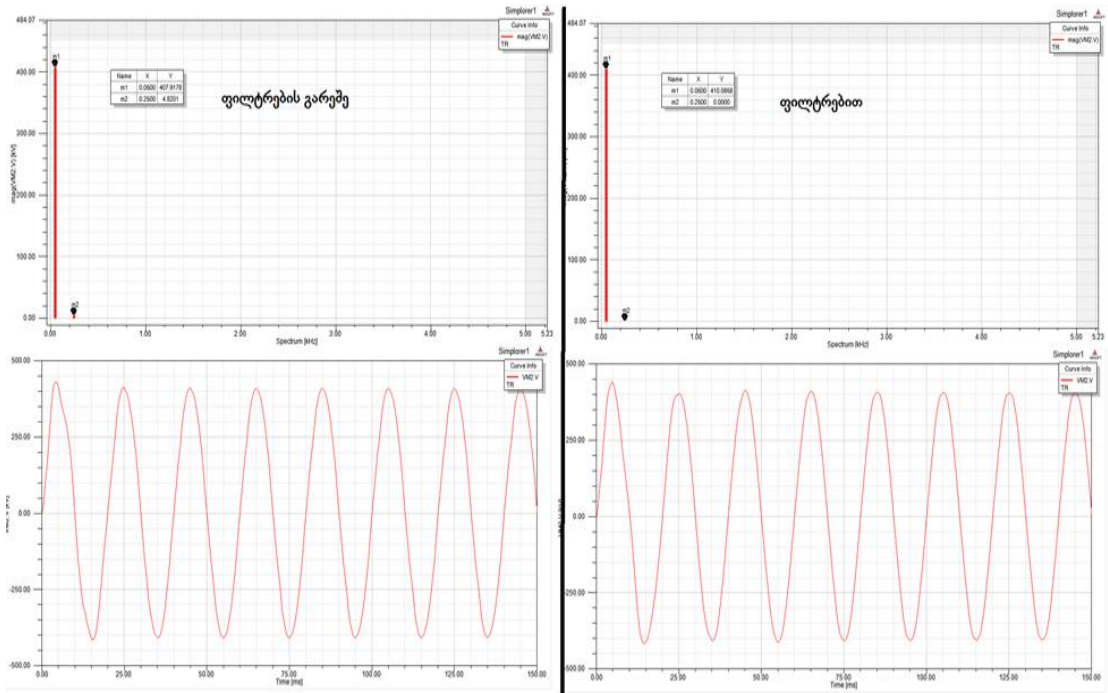
თუ ნახაზ 27-ს დავაკვირდებით შევამჩნევთ რომ როდესაც მუდმივი დენის ჩანართი მუშაობს 1000 მგვტ სიმძლავრით, ძაბვის სინუსოიდის დამახინჯება საგრძნობლად გაიზარდა და თავი იჩინა სხვადასხვა რიგის და სიხშირის ჰარმონიკებმა. აღნიშნულ ნახაზზე ჩანს კვანძი 1-ის ძაბვის ფორმა, სწორედ ამ კვანძზეა მოდებული მუდმივი დენის ჩანართი და ამიტომ ჰარმონიკული შემადგენლობის კუთხით აღნიშნული კვანძი ყვლაზე მგრძნობიარეა.



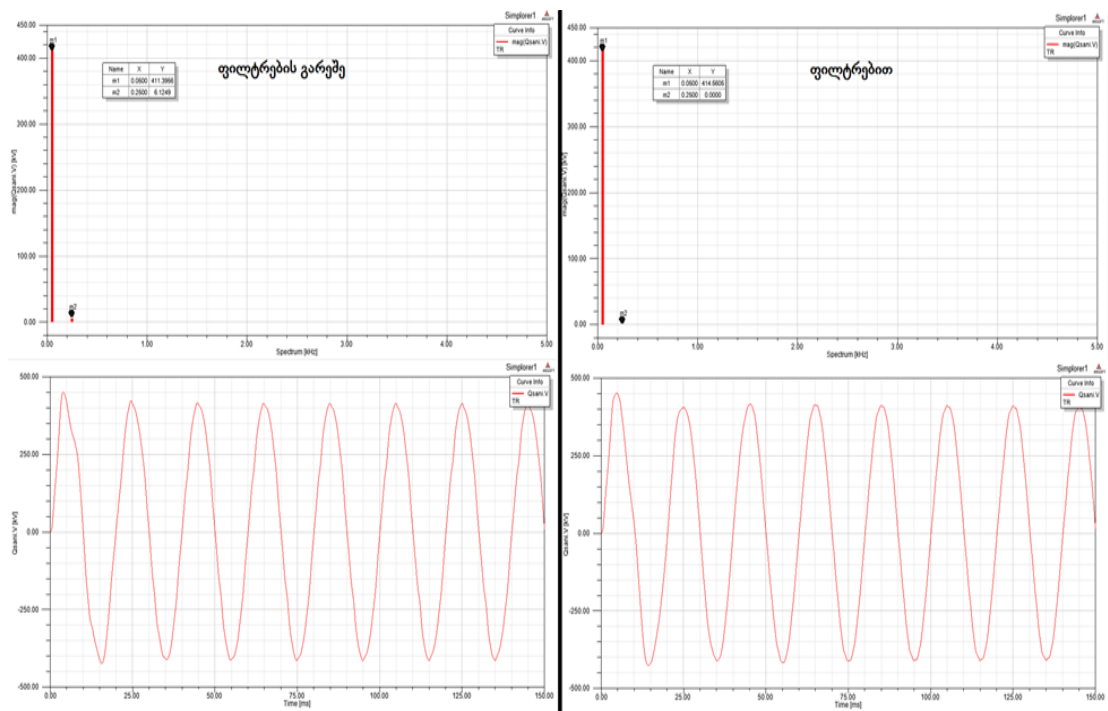
ნახაზი 28. კვანძი 2-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგვტ-ი სიმძლავრით



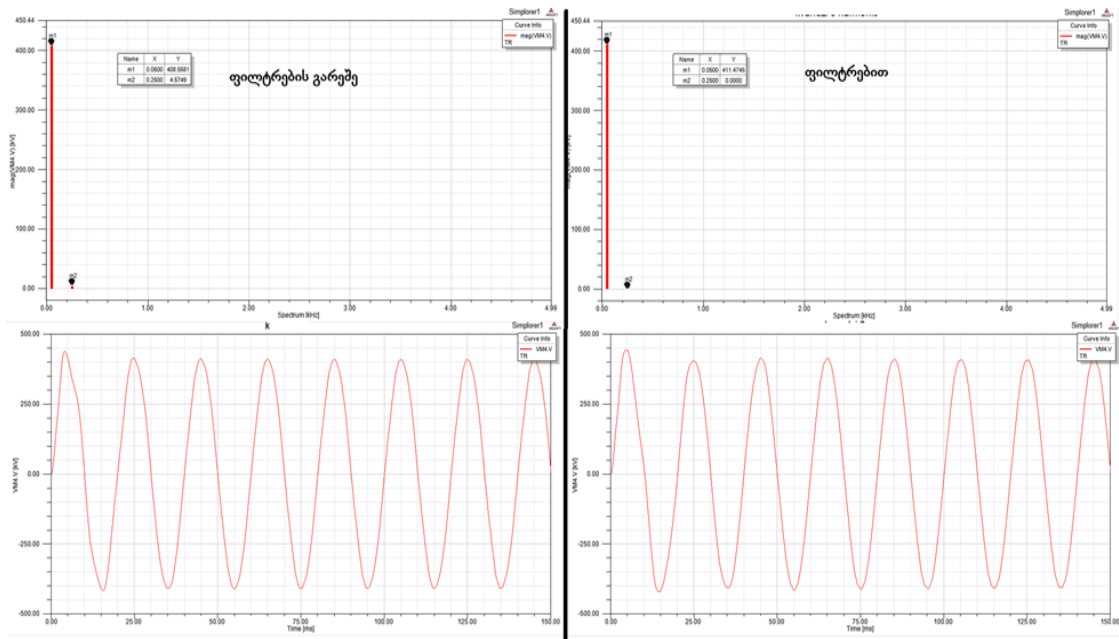
ნახაზი 29. კვანძი 3-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგვტ-ი სიმძლავრით



ნახაზი 30. კვანძი 4-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგცტ-ი სიმძლავრით



ნახაზი 31. კვანძი 5-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგცტ-ი სიმძლავრით



ნახაზი 32. კვანძი 6-ში მოცემული ძაბვის დამახინჯების მრუდები, ფილტრების ჩართვის დროს და ფილტრების გარეშე, როდესაც მდჩ ჩართულია 1000 მგეცტი-სიმძლავრით

ჩანართის 1000 მეგაჰერცის დატვირთვისას უკვე ნათლად ჩანს თუ რა გავლენას ახდენს სიმძლავრის მომატება კვანძების ძაბვების ჰარმონიკულ სპექტრზე, კერძოდ გაიზარდა ჰარმონიკების წყარო რის შედეგადაც სისტემის ყველა წერტილში შეიმჩნევა სინუსოიდის დამახინჯება.

ზემოთ აღნიშნული ანალიზების შედეგები შევიტანეთ ცხრილი 3 და ცხრილი 4-ში.

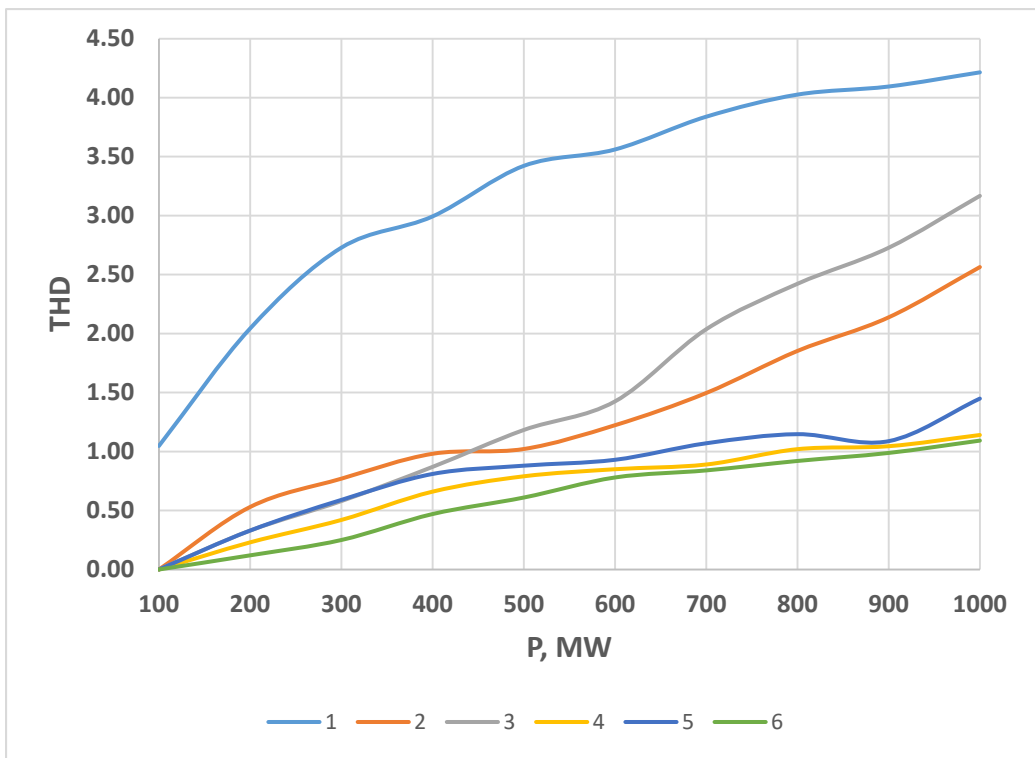
ჩვენ მიერ ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ დამოკიდებულება სიმძლავრესა და ჰარმონიკულ დამახინჯებას შორის არაწრფივია, რაც იმაში გამოიხატება, რომ სიმძლავრის ზრდასთან ერთად ადგილი აქვს დამახინჯების არაწრფივ ცვლილებას, რაც გრაფიკებიდან ნათლად ჩანს. ეს იმას ნიშნავს, რომ სხვადასხვა ჰარმონიკულ სიხშირეზე ქსელში ადგილი აქვს ჰარმონიკულ რეზონანსულ მოვლენებს. ყოველივე ამის თავიდან ასაცილებლად მუდმივი დენის ჩანართის დეველოპერები იყენებენ ცვლადი ძაბვის ფილტრებს, რომლებიც ქმნიან სისტემაზე ნაკლებ წინაღობას და ახდენენ კონკრეტული რიგის ჰარმონიკების ფიტლრაციას და არამხოლოდ.

ცხრილი 2. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთულია ცვლადი ძაბვის ფილტრები

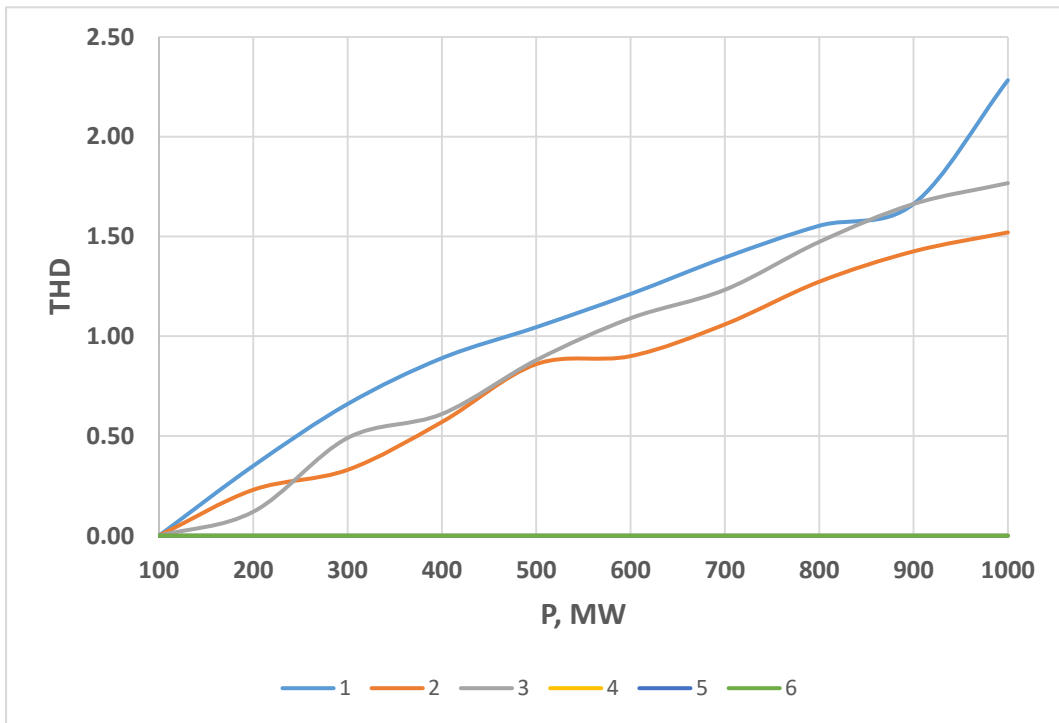
	ჯამური დამახინჯება %-ებში კვანძების მიხედვით					
P, მგვტ	1	2	3	4	5	6
100	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	2,04	0,53	0,33	0,23	0,33	0,12
300	2,73	0,77	0,58	0,42	0,59	0,25
400	2,99	0,98	0,87	0,66	0,81	0,47
500	3,42	1,02	1,18	0,79	0,88	0,61
600	3,56	1,22	1,43	0,85	0,93	0,78
700	3,84	1,50	2,04	0,89	1,07	0,84
800	4,03	1,85	2,42	1,02	1,15	0,92
900	4,09	2,14	2,73	1,05	1,09	0,99
1000	4,21	2,56	3,17	1,14	1,45	1,09

ცხრილი 3. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართულია ცვლადი ძაბვის ფილტრები

	ჯამური დამახინჯება %-ებში კვანძების მიხედვით					
P, მგვტ	1	2	3	4	5	6
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,35	0,23	0,12	0,00	0,00	0,00
300	0,66	0,33	0,49	0,00	0,00	0,00
400	0,89	0,57	0,61	0,00	0,00	0,00
500	1,05	0,86	0,88	0,00	0,00	0,00
600	1,21	0,90	1,09	0,00	0,00	0,00
700	1,39	1,06	1,23	0,00	0,00	0,00
800	1,55	1,27	1,47	0,00	0,00	0,00
900	1,66	1,43	1,66	0,00	0,00	0,00
1000	2,28	1,52	1,77	0,00	0,00	0,00



ნახაზი 33. სიმპლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები



ნახაზი 34. სიმპლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები

თავი 3. ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირება

3.1. მოდელირება

ელექტრულ სისტემის მოდელირებისას სისტემის ელემენტების წარმოდგენა ხდება მათი ჩანაცვლების სქემებით. ყველა ელემენტისთვის, მათ შორის ძალოვანი ელექტრონიკის მოწყობილობებისთვის არსებობს როგორც გამარტივებული ასევე კომპლექსური ჩანაცვლების სქემები. რიგ შემთხვევებში მარტივი ჩანაცვლების სქემების გამოყენება საკმარისია იმისთვის, რომ მიღწეულ იქნას მოდელირების კონკრეტული მიზანი. მაგალითად, ნორმალური რეჟიმების ანგარიშისას (ნაკადგანაწილება) სავსებით საკმარისია, რომ ელექტროგადამცემი ხაზი წარმოვადგინოთ II-ებრი ჩანაცვლების სქემის სახით. თუმცა, იმპულსური ან რეზონანსული პროცესების მოდელირებისას II-ებრი ჩანაცვლების სქემა მოთხოვნებს ვეღარ პასუხობს, რადგან ხაზის განივი ტევადობა მხოლოდ ორ ნაწილადაა გაყოფილი და ჩართულია თავსა და ბოლოში, ხოლო გრძივი ინდუქციური წინაღობა წარმოდგენილია მხოლოდ ერთი ინდუქციურობის სახით და ჩართულია პარალელურ ტევადურ წინაღობებს შორის გრძივ ინდუქციური წინაღობის სახით. რეალობაში ელექტროგადამცემი ხაზის ყოველ სასრულ მონაკვეთს, მაგალითად ყოველ ერთ მეტრს გააჩნია, როგორც გრძივი ინდუქციური წინაღობა ასევე განივი ტევადობა. ამ მიზეზის გამო ზემოაღნიშნული პროცესების მოდელირებისას გამოიყენება განაწილებულპარამეტრებიანი ჩანაცვლების სქემა, რაც ნიშნავს რომ ელექტროგადამცემი ხაზი წარმოდგენილია რამდენიმე ათეულ/ასეულ სეგმენტად წარმოდგენილი T-ებრი ჩანაცვლების სქემით. ანალოგიურად თუ ძალოვანი ტრანსფორმატორის წარმოდგენა ნაკადგანაწილების მოდელირებისას ხდება F-ებრის სქემით იმპულსური და რეზონანსული პროცესების მოდელირებისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას მისი პარაზიტული პარამეტრებიც, როგორცაა მაგალითად პარაზიტული ტევადობები გრაგნილებს შორის და გრაგნილებს და კორპუსს შორის.

ნაკადგანაწილების მოდელირებისას როგორც წესი ძალოვანი ელექტრონიკის, მაგალითად კონვერტორული ქვესადგურის წარმოდგენა ხდება ასევე გამარტივებული გზით და ის ჩანაცვლდება ძაბვისგან დამოუკიდებელი მუდმივი დატვირთვის სახით. რაც შეეხება ჰარმონიკულ ფილტრებს ნაკადგანაწილებაში მათი მოდელირებისთვის საკმარისია ისინი ჩანაცვლდეს მარტივი ინდუქციურობების და/ან ტევადობების სახით. რეალურად ფილტრები, თუნდაც პასიური საკმაოდ ბევრ კომპონენტს შეიცავს და ინდუქციურობასა და ტევადობებში მათი წარმოდგენის იდეა გამომდინარეობს იმ ფაქტიდან, რომ როგორი კომპლექსურიც არ უნდა იყოს ფილტრი სისტემის ნომინალურ სიხშირეზე ის იქცევა ან ინდუქციურობის, ან ტევადობის სახით. სწორედ ამიტომ ნაკადგანაწილებისთვის მათი ასეთი გამარტივება დასაშვებია.

კონვეტორულ ქვესადგურებში გამოყენებულ ცვლადი ძაბვის ფილტრებს, როგორც წესი ორი ფუნქცია აქვთ:

1. სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკების ფილტრაცია და
2. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია.

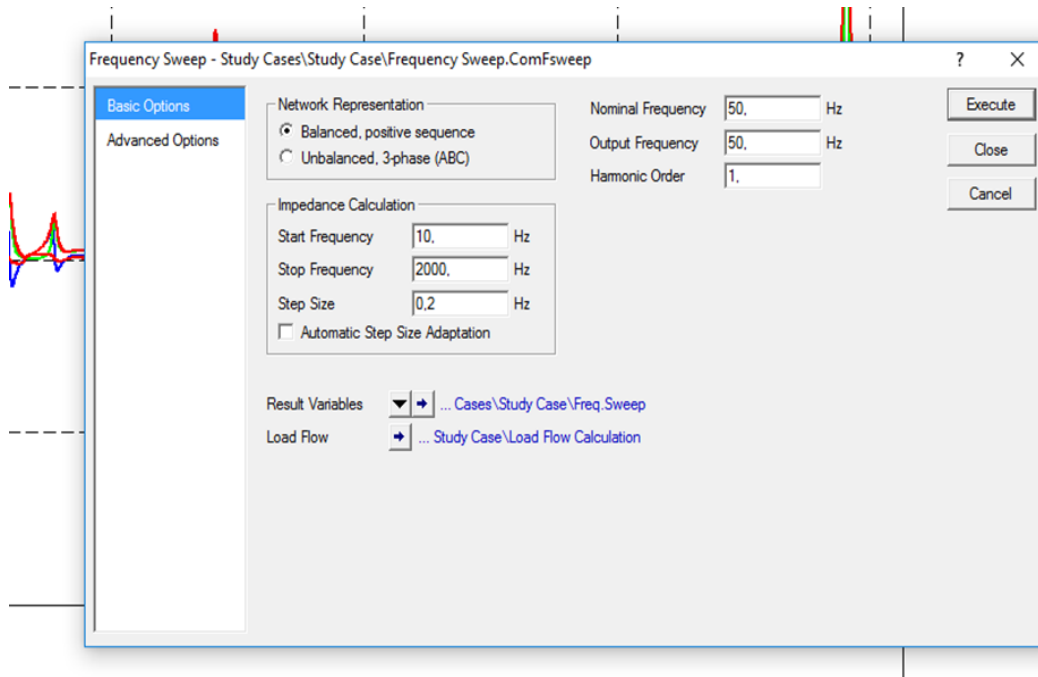
ჰარმონიკული მოვლენები ნაკადგანაწილების ანგარიშისას არ განიხილება. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისთვის კი საკმარისია მარტივი ტევადური და ინდუქციური ჩანაცვლების სქემების გამოყენება, რაც ამართლებს ზემოთ ნახსენებ ფილტრების მოდელირების მიდგომას.

როგორც ვთქვით სისტემის ნომინალურ სიხშირეზე ფილტრმა უნდა გამოავლინოს ისეთი რეაქტიული ბუნება (ინდუქციური ან ტევადური), რომელსაც ქვესადგურის დიზაინის ფაზაზე განსაზღვრავენ რეაქტიული სიმძლავრის გონივრული კომპენსირების მისაღწევად. როგორც კი ფილტრს მოედება სისტემის ნომინალური სიხშირისგან განსხვავებული ძაბვა, ჩნდება ალბათობა, რომ მან შეიცვალოს ბუნება, ანუ გადავიდეს ინდუქციურიდან ტევადურში ან პირიქით. სიხშირის შეცვლამ ვიწრო დიაპაზონში შესაძლოა არ გამოიწვიოს ბუნების მყისიერი შეცვლა, მაგრამ აუცილებლად მოახდენს იმ რეაქციის გაძლიერებას ან შესუსტებას, რომელიც გააჩნდა ელემენტს

სიხშირის შეცვლამდე. შესაბამისად სიხშირული სპექტრის განხილვისას ბუნებრივია, რომ მიუღებელი იქნება ფილტრების წარმოდგენა მხოლოდ ინდუქციურობით, ან მხოლოდ ტევადობით, როგორც ამას ვაკეთებდით სისტემის ნომინალურ სიხშირეზე.

სიხშირული სკანირების მოდელირებისთვის პროგრამა DigSILENT Powerfactory-ის გააჩნია სპეციალური მოდული. ამ მოდულის გამოყენებამდე საჭიროა მოდელის ელემენტების მომზადება მაღალსიხშირული პროცესებისთვის განკუთვნილი სპეციალური ველების შევსების გზით.

სიხშირული სკანირების მოდულის გაშვებისთვის არ არის აუცილებელი ნაკადგანაწილების ანგარიში, რადგან ეს პროცესი საჭიროებს მხოლოდ ტოპოლოგიური ინფორმაციის არსებობას. ჩვენ შემთხვევაში სკანირებისთვის ელექტრული ქსელი წარმოდგენილია სიმეტრიული, დაბალანსებული პარამეტრების სახით. სკანირების დასაწყებად აუცილებელია საწყისი და საბოლოო სიხშირეების არჩევა. ასევე აუცილებელია სკანირების ბიჯის შერჩევა. სკანირების ბიჯის ავტომატურ ადაპტაციას გააჩნია როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი მხარეები. დადებით მხარედ შეიძლება ჩაითვალოს, კონკრეტული ანგარიშის დროს სისწრაფე, რაც გამოიხატება უფრო ნაკლები ბიჯის საჭიროებაში ადაპტაციის გარეშე ანგარიშთან შედარებით. ეს ნიშნავს რომ შერჩეული ბიჯი ანგარიშის გაშვებისას ცვლადი სიდიდე ხდება და დროის ოპტიმიზაციის მიზნით შესაძლოა ბევრჯერ მეტი იყოს წინასწარ შერჩეულ მნიშვნელობაზე. უარყოფით მხარედ შეიძლება ჩაითვალოს შემდეგი გარემოება: ორი რეზულტატის შედარებისას რომელთაც გააქტიურებული აქვთ ბიჯის ავტომატური ადაპტაცია, შესაძლოა წავაწყდეთ უხერხულობას. კერძოდ, სიხშირული ღერძზე დანაყოფების დამთხვევა პრაქტიკულად მიუღწეველი ხდება, რაც საბოლოო ჯამში პრეციზიული ანალიზის შესაძლებლობას გვაკარგვინებს. ასე რომ, ადაპტაციით გაშვებული ვარიანტი მისაღებია მხოლოდ მაშინ, როდესაც საკვლევი სცენარი მხოლოდ ერთია.



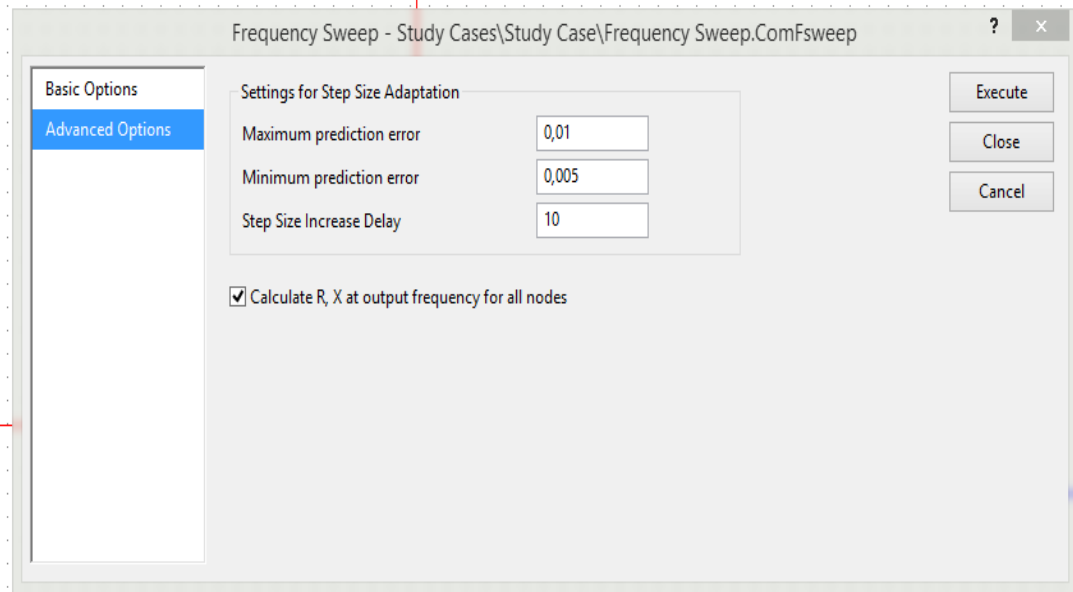
ნახაზი 35. სიხშირული სკანირების მონაცემების შესატანი ფანჯარა PowerFactory-ში

აღნიშნულ სურათზე საწყისი სიხშირე 10 ჰერცია ხოლო საბოლოო 2000 ჰერცი. ბიჯის ადაპტაციის გარეშე 0.2 ჰერცია. რაც ნიშნავს, რომ სკანირების გაშვებისას მივიღებთ ყველა წერტილის შესახებ ინფორმაციას 10 ჰერციდან დაწყებული 0.2 ჰერცი ბიჯით 2000 ჰერცამდე. ე.ი. უხეშად რომ ვთქვათ სიხშირულ ღერძზე გვექნება დაახლოებით 10000 მდე წერტილი.

Nominal Frequency - ნომინალური სიხშირე - ეს არის სისტემის ბაზისური სიხშირე, რომელის როგორც წესი 50 ჰერცის ტოლია.

Output Frequency - გამომავალი სიხშირე - ეს არის სიხშირე რომლისთვისაც ნაჩვენები იქნება შედეგები ცალხაზოვან სქემაზე. მისი სიდიდე გავლენას არ ახდენს ანგარიშებზე.

Harmonic Order - ჰარმონიკული რიგი - მისი დახმარებით ნომინალური სიხშირე ყოველთვის ტოლი იქნება გამომავალი სიხშირის, ანუ თუ ვცვლით ჰარმონიკულ რიგს, ავტომატურად შეიცვლება გამომავალი სიხშირეც. ეს გვეხმარება ცდომილების შემცირებაში, რაც შეიძლება გამოიწვიოს სიხშირის სიდიდის მექანიკურად შეტანამ პროგრამში.



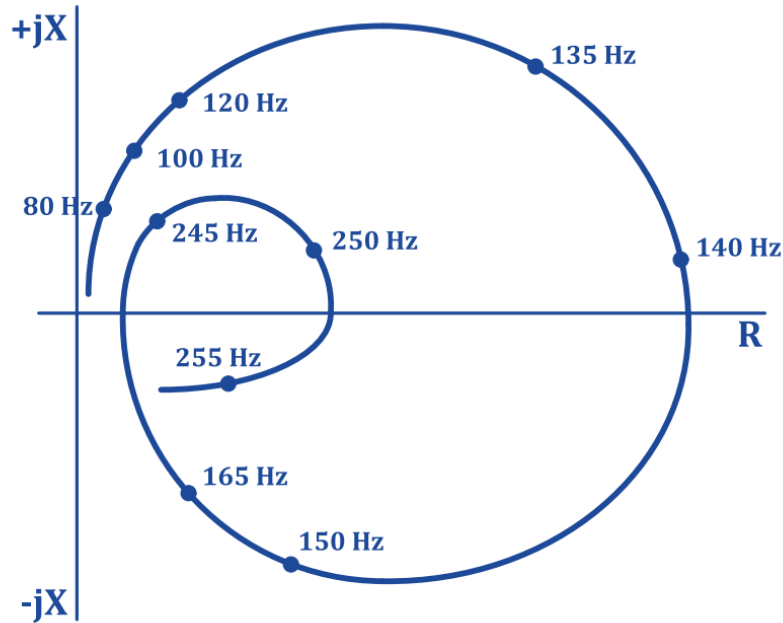
ნახაზი 36. სიხშირული სკანირების დამატებითი მონაცემების შესატანი ფანჯარა PowerFactory-ში

დამატებით მონაცემების გრაფაში (ნახაზი 36.) მოცემულია ავტომატური ადაპტაციის მახასიათებლები, სადაც მაქსიმალური პროგნოზირების ცდომილება ჩვეულებრივ 0,01 ხოლო მინიმალური პროგნოზირების ცდომილება 0,005. ბიჯის ზომის ზრდის დაყოვნება 10-ს უდრის. აქვე მოცემულია R და X-ის საანგარიშო მოსანიშნი გამომავალ სიხშირესთან ყველა კვანძისთვის. ჩვეულებრივ პროგრამა ანგარიშებს ექვივალენტურ წინაღობას მხოლოდ შერჩეული კვანძებისთვის, თუ ეს მოსანიშნი მონიშნული იქნება იგი იანგარიშებს ყველა კვანძისთვის სრულ წინაღობას.

3.2. წინაღობების სიხშირეზე დამოკიდებულების წრის მეთოდი

ელექტროსისტემას, რომელზედაც მიერთებულია კონვერტორული ქვესადგური, რომელიც თავის მხრივ წყაროა ჰარმონიკების, გააჩნია როგორც ინდუქციური ასევე ტევადური ხასიათის წინაღობები, რომელბიც ერთმანეთთან გატოლებისას იწვევენ რეზონანსულ მოვლენას ქსელში. თუ რომელიმე რიგის ჰარმონიკულ სიხშირეზე მოხდება რეზონანსი და დაგვიკება მარტო აქტიური წინაღობა, ეს იმას ნიშნავს რომ ამ ჰარმონიკულ რიგიზე

სისტემას გააჩნია მცირე წინაღობა. 37-ე ნახაზზე მოცემულია სისტემის წინაღობის მრუდი სხვადასხვა სიხშირეზე.

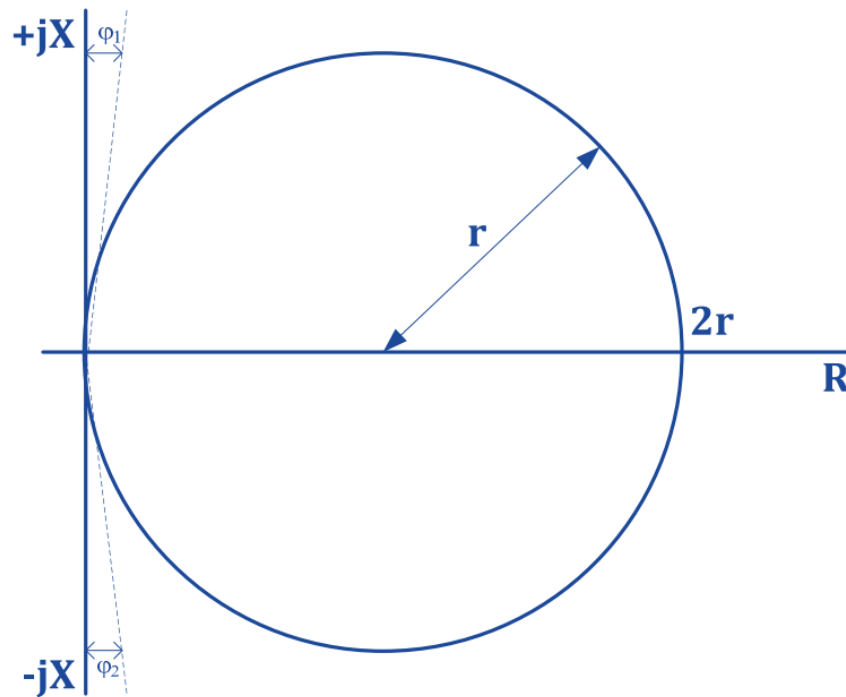


ნახაზი 37. მკვებავი სისტემის წინაღობები სიხშირის მიხედვით

ნახაზიდან ჩანს, რომ ქსელს 140 ჰერციდან 200 ჰერცამდე აქვს ტევადური ხასიათი, ხოლო 0-დან 140 ჰერცამდე კიდე ინდუქციური ხასიათი. ნახაზზე გადაზომილია ასევე ქსელის აქტიური წინაღობაც, რომელთან მახლობლობაში სისტემა დგება რეზონანსის მოვლენის წინაშე, ჩვენ შემთხვევაში ეს გვაქვს 140, 240, 250 და 255 ჰერცების მახლობლობაში. სისტემის წინაღობა მგრძნობიარეა სიხშირის მცირედი ცვლილებისასაც კი.

ზემოდ მოყვანილი სისტემის წინაღობების მრუდი მართებულია სისტემის მხოლოდ ერთი ტოპოლოგიისთვის, ანუ თუ სისტემის წინაღობას დავტოვებთ იგივეს და არ მოვახდენთ ქსელის სხვადასხვა ელემენტების კომუტაციას. ასეთ დროს სისტემას სხვადასხვა სიხშირეზე ექნება მრუდზე ნაჩვენები ფორმა. ხოლო თუ ჩვენ მოვახდენთ სისტემის წინაღობის შეცვლას, აღნიშნულ მრუდს შეეცვლება ფორმა და სხვადასხვა სიხშირეზე გვექნება სხვადასხვა წინაღობა და ის მრუდი უსარგებლო ხდება. ამიტომ ამის ნაცვლად იყენებენ წრეს, რომელიც თავის დიამეტრში მოიცავს ყველა

სისტემის სიხშირულ წერტილს არსებულ და სამომავლო ტოპოლოგიისთვის (ნახ. 38).



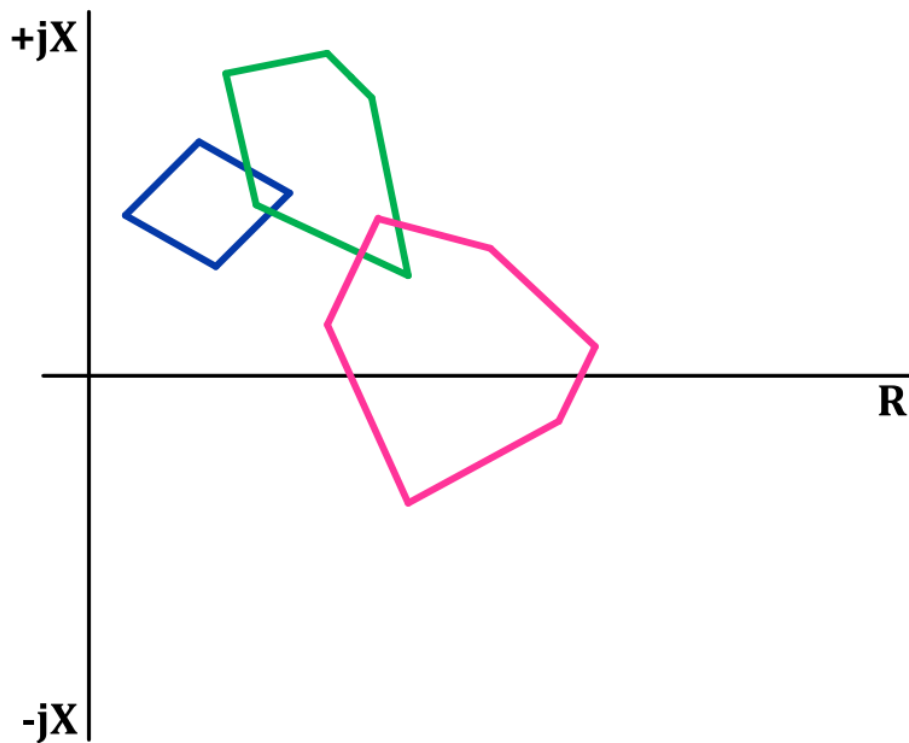
ნახაზი 38. სისტემის წინაღობათა წრე

ფილტრების შესარჩევად აიღება წრიდან ნებისმიერი სიდიდის წინაღობა, რომელიც გამოიწვევს მაქსიმალურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას. რეალურ სისტემას, რომ მივუახლოვოთ ვზღუდავთ ϕ_1 და ϕ_2 კუთხეებით არეაღს, ასევე აქტიური R წინაღობის სიდიდით.

მაღალი რიგის ჰარმონიკების ჩახშობის თვალსაზრისით ფილტრების შერჩევის ეს მეთოდი უსაფრთხოა, რამდენადაც ითვალისწინებს სისტემის მომავალ გაფართოებასაც, თუმცა ასე შერჩეული ფილტრები ძვირია, რადგანაც შერჩეულია დიდი მარაგით. თანამედროვე ენერგეტიკაში მწარმოებლები მომხმარებლებს სთავაზობენ მათთვის ხელსაყრელ ნებისმიერი კონფიგურაციას ცვლადი ძაბვის ფილტრებს, რომლებიც შექმნილი იქნება სწორედ იმ დისკრეტულობით რაც ესაჭიროება კონკრეტულ სისტემასა თუ მომხმარებელს. [4]

3.3. წინაღობების სიხშირეზე დამოკიდებულების პოლიგონის მეთოდი

კონკრეტული რიგის ჰარმონიკისთვის სისტემის წინაღობა, სისტემის სხვადასხვა შემადგენლობისა (გენერაცია-დატვირთვა) და ქსელის ყველა შესაძლო კონფიგურაციისათვის, სხვადასხვაა. ამ წინაღობათა სიმრავლე R , X სიბრტყეზე შეიძლება წარმოვადგინოთ მრავალკუთხედის სახით, რომელსაც წინაღობათა პოლიგონს უწოდებენ (ნახ.39).



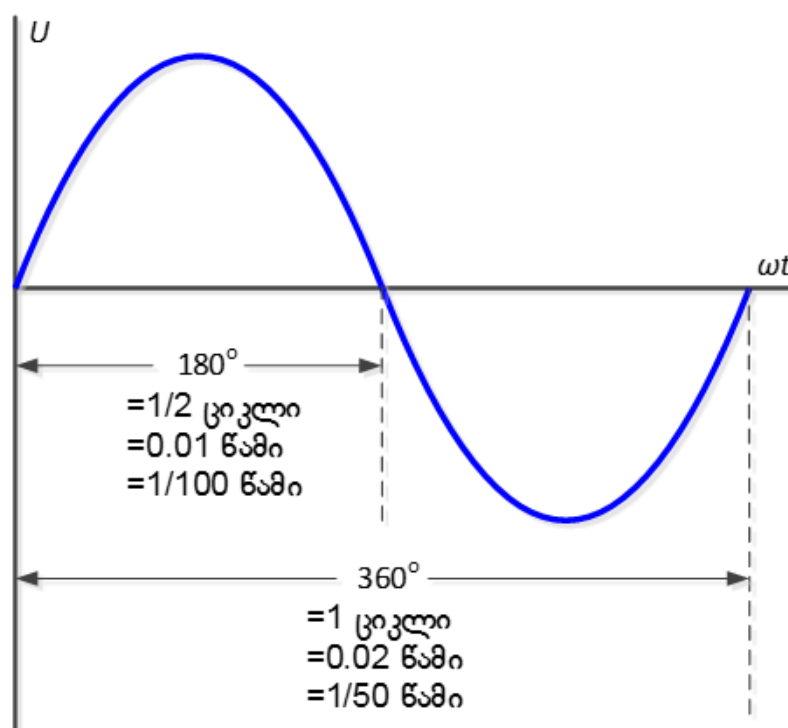
ნახაზი 39. წინაღობების პოლიგონი

კომპიუტერული პროგრამის დახმარებით მოიძებნება შესაბამისი პოლიგონი თითოეული ჰარმონიკისთვის. მათი საშუალებით შევირჩევთ ფილტრებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ მათდამი წაყენებულ მოთხოვნებს (მაქსიმალური ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების კოეფიციენტის სიდიდე არ აღემატებოდეს დასაშვებს).[4]

ეს მეთოდი გვაძლევს სისტემის წინაღობების ყველაზე რეალისტურ შეფასებას და თავიდან გვაცილებს ფილტრების ზედმეტი მარაგით შერჩევის პრობლემას.

3.4. ჰარმონიკული სიხშირე

საქართველოს ელექტრული სისტემა მუშაობს 50 ჰერც სიხშირეზე, რაც ნიშნავს, რომ სისტემის შემადგენელი ელემენტი გათვლილია ამ სიხშირეზე. იდეალურ შემთხვევაში სისტემაში შემავალმა გენერატორებმა უნდა უზრუნველყონ 50 ჰერცი სიხშირის სინუსოიდური ძაბვების გენერაცია და ძლიერი დატვირთვის რეჟიმებშიც კი, გენერატორში გამავალი დენის ფორმა არ უნდა განსხვავდებოდეს სინქრონულისგან ასეთ იდეალურ პირობებში გენერატორის მიერ გენერირებულ ძაბვას აქვს ნახაზ 40-ზე ნაჩვენები სახე.

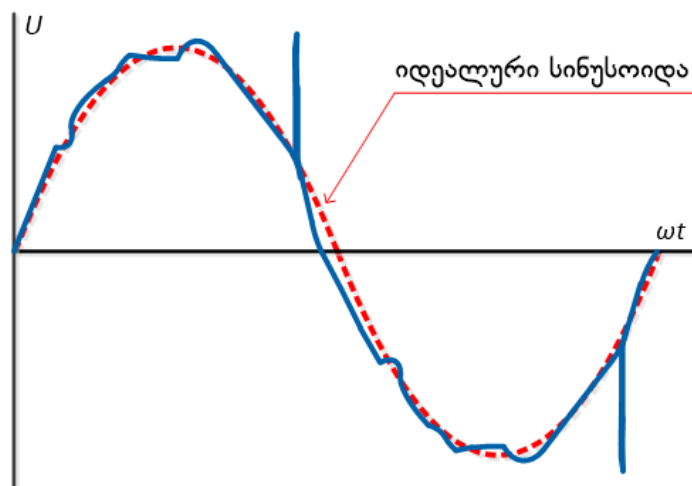


ნახაზი 40. 50 ჰერციანი სინუსოიდა

იდეალურ 50 ჰერციან ძაბვას ვუწოდებთ ძირითად შემდგენს, ან ფუნდამენტალურ (ძირითად) ჰარმონიკას. ნახაზ 40-ზე ნაჩვენები ძირითადი შემდგენი წარმოადგენს იდეალურ სინუსოიდას, რომელიც მეორდება 50-ჯერ ყოველ ერთი წამის განმავლობაში. ამასთან, მისი დადებითი და უარყოფითი ნახევარციკლები არიან იდენტურნი.

ელექტრული მოწყობილობების დიდი ნაწილის მოქმედების პრინციპი ხშირად დამყარებულია მკვებავი ცვლადი ძაბვის განმეორებად (პერიოდულ) ბუნებაზე. მაგალითად, ასეთი ტიპის მოწყობილობა შესაძლოა გამოიმუშავებდეს მკვებავი სინუსოიდური ძაბვის ნულზე გადასვლასთან დაკავშირებულ სინქრონულ დროით სიგნალებს. 50 ჰერციანი სისტემისთვის ცვლადი ძაბვის ან დენის სინუსოიდა ყოველ ნახევარ ციკლში (0,01წმ) ერთხელ არ გადაკვეთს ნულს, მაშინ აღნიშნული მოწყობილობის ნორმალური ფუნქციონირება დიდი ალბათობით დაირღვევა.

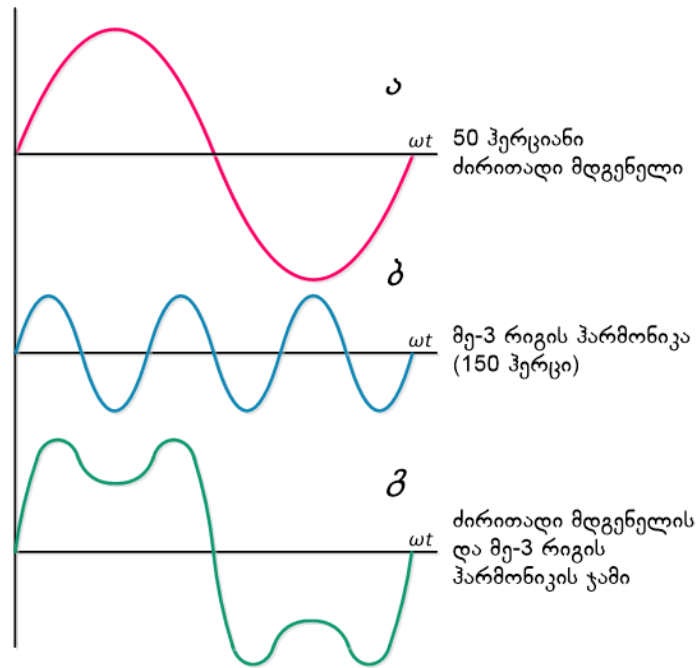
ყველა რეალურ და მათ შორის საქართველოს ელექტროსისტემაშიც ძაბვები ფუნდამენტალური ჰარმონიკის გარდა დამატებით შეიცავენ განსხვავებულ სიხშირის მქონე კომპონენტებსაც. 41-ე ნახაზზე ნაჩვენებია მოდელირებით მიღებული დამახინჯებული ძაბვის ფორმა, რომლის მსგავსიც შიძლება წარმოიქმნას ელექტრული სისტემის ნებისმიერ ძლიერ ინდუსტრიულ არეაში.



ნახაზი 41. 50 ჰერცზე დამახინჯებული სინუსოიდა

ადვილი შესამჩნევია, რომ იგი არ არის სუფთა სინუსოიდა და გააჩნია დაკბილული მონაკვეთები. 42-ე ნახაზიდან ასევე ჩანს, რომ დამახინჯებული სინუსოიდა ნულს შესაძლოა კვეთდეს არა ზუსტად ნახევარი ციკლის გასვლის შემდეგ, არამედ მისგან განსხვავებულ დროს. აღნიშნული დამახინჯებით სინუსოიდა გარდა ძირითადი შემდგენლისა

შეიცავს აგრეთვე 50 ჰერცისგან განსხვავებული სიხშირის მქონე კომპონენტებსაც. ამ კომპონენტებს ჰარმონიკულ შემდგენებს ვუწოდებთ.

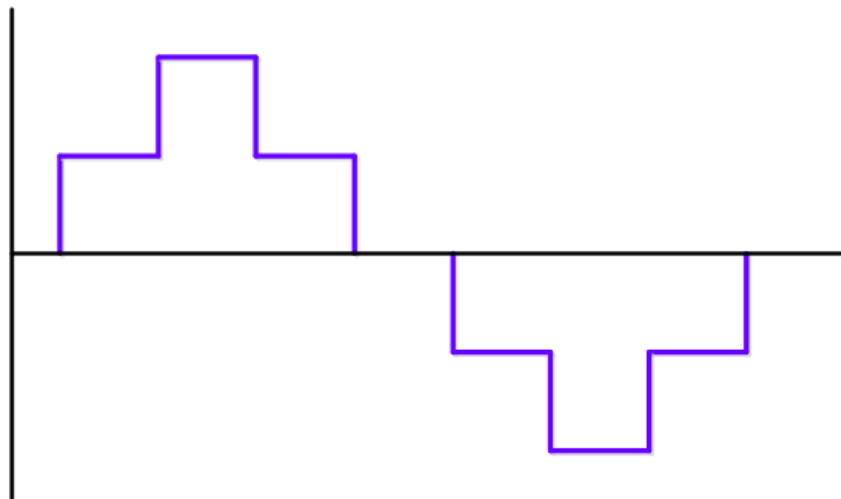


ნახაზი 42. სისტემის ძაბვა ჰარმონიკული კომპონენტებით

არსებობს კარგად დამუშავებული მეთოდი, რომლის საშუალებითაც პერიოდული ფუნქციებისთვის შესაძლებელია შევისწავლოთ და განვსაზღვროთ ასეთი ფუნქციების ჰარმონიკული შემადგენლობა. ამ მეთოდს ფურიეს ანალიზი ეწოდება. მისი საშუალებით ხდება სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკების რიგის (ჰარმონიკების ნომრის) განსაზღვრა. მაგალითად, თუ გაქვს ძირითადი 50 ჰერციანი ჰარმონიკა და მასთან შერეული 100 ჰერციანი ჰარმონიკა, მაშინ ამ 100 ჰერციან კომპონენტს ვუწოდებთ მე-2 რიგის ჰარმონიკას. სახელწოდება „მე-2 რიგი“ გამომდინარეობს 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 და საკმაოდ ხშირია მე-3 რიგის ჰარმონიკა (150 ჰც), მაგრამ არის

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

მესამე ნახაზი ასახავს ჰარმონიკული კომპონენტების გავლენას ძაბვის ან დენის ფორმაზე. 34-ე,ა ნახაზზე ილუსტრირებულია იდეალური, ფუნდამენტალური 50 ჰერციანი სინუსოიდა, 34-ე,ბ ნახაზზე კი საკმაოდ დიდი ამპლიტუდის მქონე მე-3 რიგის ჰარმონიკა (150 ჰც), რომელიც რაღაც გზით მოხვდა ელექტრულ სისტემაში. 34-ე,გ ნახაზი წარმოადგენს ოსცილოგრაფის ჩვენებას, როდესაც კომბინირდებიან ფუნდამენტალური მდგენელი და მე-3 რიგის ჰარმონიკა (ჰარმონიკების ზედდება).



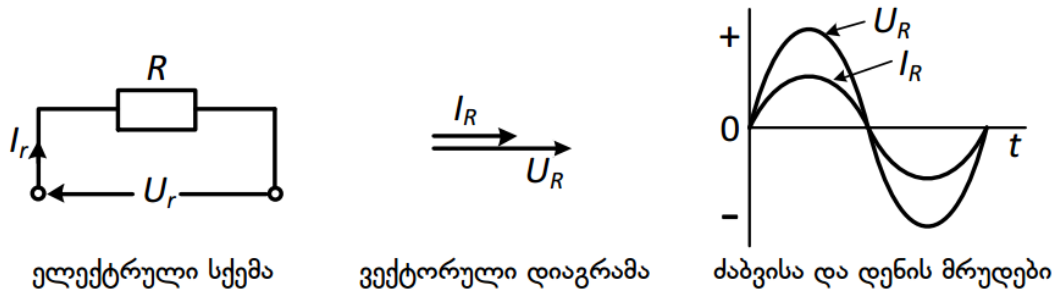
ნახაზი 43. ფუნდამენტალური, მე-5, მე-7, მე-11, მე-13, მე-17, მე-19, 23-ე და 25-ე ჰარმონიკების ჯამი

ძაბვის ან დენის მრუდი შეიძლება შეიცავდეს რამდენიმე ჰარმონიკულ მდგენელს ერთდროულად. მაგალითად, მე-35 ნახაზზე ნაჩვენები 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.

3.5. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა აქტიური დატვირთვით

ასეთ წრედში დენი IR და ძაბვა UR არიან ერთ ფაზაში. ნახაზ 44-ზე მოცემულია აღნიშნული წრედის ელექტრული სქემა, ვექტორული დიაგრამა

და ძაბვისა და დენის მრუდები.



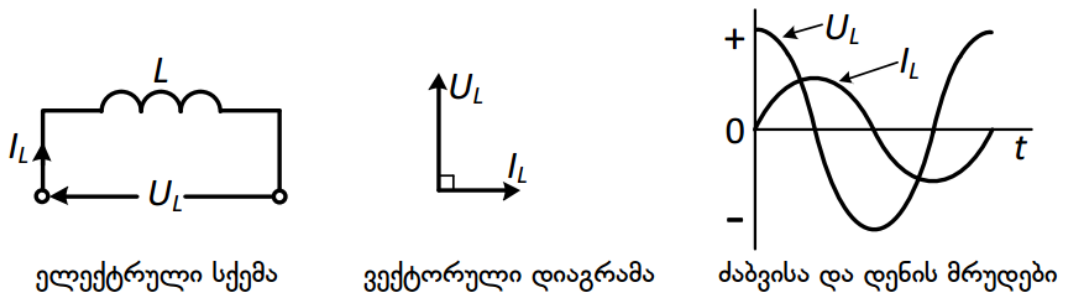
ნახაზი 44. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება აქტიური დატვირთვის დროს

3.6. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა ინდუქციური დატვირთვით

სუფთა ინდუქციურ წრედში (ნახ.45) I_L დენი ჩამორჩება U_L ძაბვას 90° -ით (ე.ი. $\pi/2$ რადიანით). ასეთ წრედში ინდუქციური კოჭის მიერ შექმნილ წინაღობას ეწოდება ინდუქციური წინაღობა და აღინიშნება X_L – ით და იზომება ომებში.

$$X_L = \frac{U_L}{I_L} = 2\pi fL$$

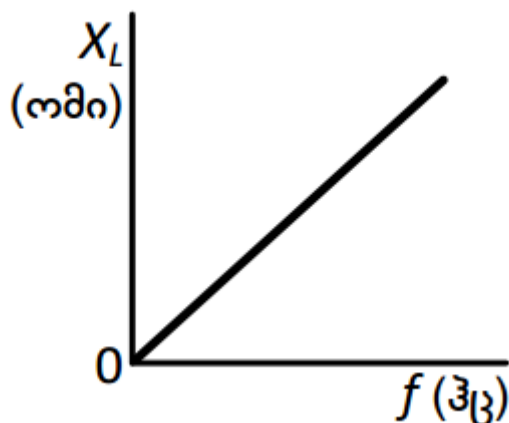
სადაც f - მკვებავი ძაბვის სიხშირეა ჰერცებში, L კი - ინდუქციურობაა



ჰენრებში.

ნახაზი 45. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება ინდუქციური დატვირთვის დროს

X_L –ის სიდიდე პროპორციულადაა დამოკიდებული f სიხშირეზე, ანუ სიხშირის წრდისას პროპორციულად იზრდება ინდუქციური წინაღობა. ეს დამოკიდებულება ნაჩვენებია 46-ე ნახაზზე.



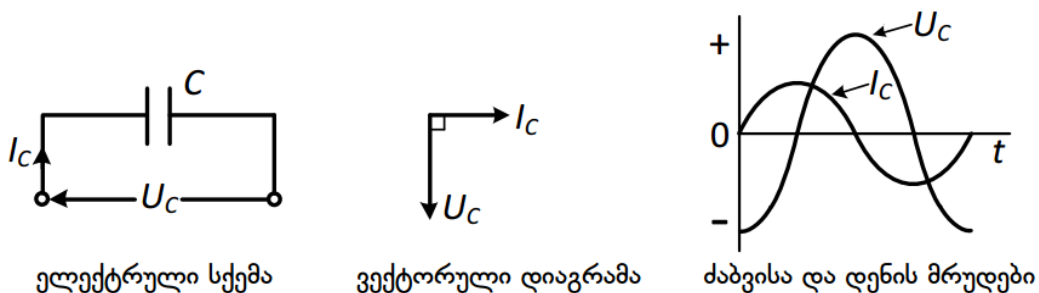
ნახაზი 46. ინდუქციური წინააღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდი

3.7. მარტივი ელექტრული წრედი სუფთა ტევადური დატვირთვით

სუფთა ტევადურ წრედში (ნახ.47) I_C წინ უსწრებს U_C ძაბვას 900-ით (ე.ი. $\pi/2$ რადიანით). ტევადური ელემენტის (კონდენსატორის) მიერ შექმნილ წინააღობას ეწოდება ტევადური წინააღობა და აღინიშნება X_C – თი და იზომება ომებში.

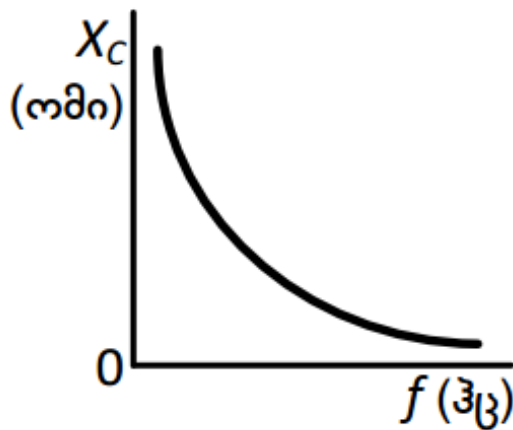
$$X_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

სადაც C არის ტევადობა ფარადებში.



ნახაზი 47. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულება ტევადური დატვირთვის დროს

X_C -ს სიდიდის f სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდი ნაჩვენებია 48-ე ნახაზზე. სიხშირის ზრდისას ტევადური წინააღობას მცირდება, მაგრამ არ უტოლდება ნულს, რადგან მიღებული მრუდი არაწრფივია.



ნახაზი 48. ტევადური დატვირთვის და სიხშირის დამოკიდებულების მრუდი

3.8. მიმდევრობითი რეზონანსი

როგორც აღვნიშნეთ, მიმდევრობით შეერთებულ R-L-C წრედში, როდესაც $X_C = X_L$, ადგილი აქვს რეზონანსის მოვლენას. ამ დროს $U_L = U_C$. ამასთან $Z=R$, ე.ი. მიმდევრობითი წრედის სრული წინააღობა ყველაზე მცირე არის რეზონანსული მოვლენის დროს $I=U/R$, ანუ მიმდევრობით წრედში შესაძლო მაქსიმალური დენი გადის რეზონანსის დროს. რადგან $X_C = X_L$, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

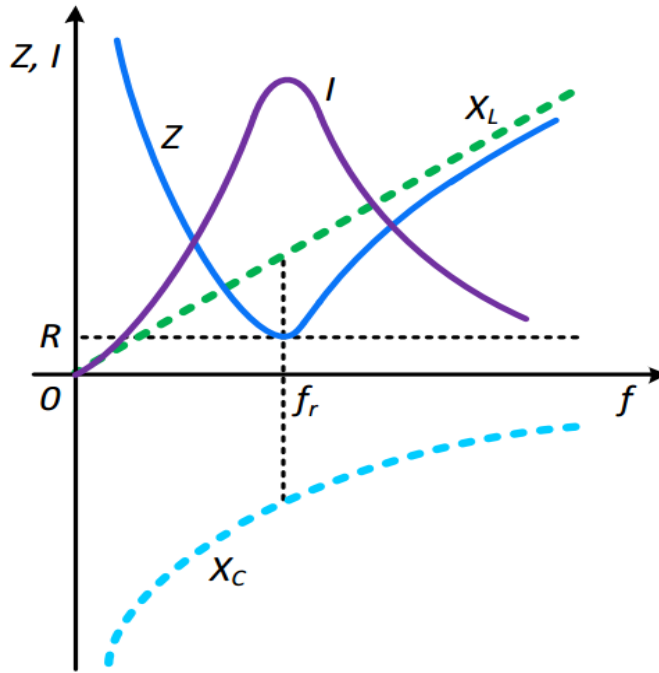
აქედან მივიღებთ:

$$f_r^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC} \rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

სადაც f_r რეზონანსული სიხშირეა, ანუ სიხშირე რომელზედაც X_C უტოლდება X_L - ს.

მიმდევრობით წრედში რეზონანსის დროს სრული წინააღობისა და დენის ტიპიური მრუდები 49-ე ნახაზზეა ნაჩვენები.

რეზონანსის დროს, თუ მიმდევრობითი წრედის ლ მცირეა X_L – თან და X_L - თან შედარებით, მაშინ შესაძლებელია U_L და U_C რამდენიმეჯერ აღემატებოდნენ მკვებავ U ძაბვას.



ნახაზი 49. სხვადასხვა წინაღობების სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდები

$$\text{ძაბვის გაძლიერება რეზონანსის დროს} = \frac{\text{ძაბვა } L\text{-ზე (ან } C\text{-ზე)}}{\text{წყაროს ძაბვა}}$$

აღნიშნულ სიდიდეს ხშირად ხარისხის კოეფიციენტსაც უწოდებენ (ვთქვათ თუ წრედი მუშაობს რეზონატორად). ეს კოეფიციენტი აღინიშნება Q ასოთი (Q factor quality factor – ხარისხის კოეფიციენტი)

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{IX_L}{IR} = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f_r L}{R}$$

მერეს მხრივ:

$$Q = \frac{U_C}{U} = \frac{IX_C}{IR} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{2\pi f_r CR}$$

რეზონანსული სიხშირე იქნება:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{აქედან} \quad 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

საბოლოო ხარისხის კოეფიციენტი იქნება:

$$Q = \frac{2\pi f_r L}{R} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(\frac{L}{R}\right) = \frac{1}{R} \sqrt{\left(\frac{L}{C}\right)}$$

3.9. სიხშირის გატარების ზოლი და შერჩევითობა

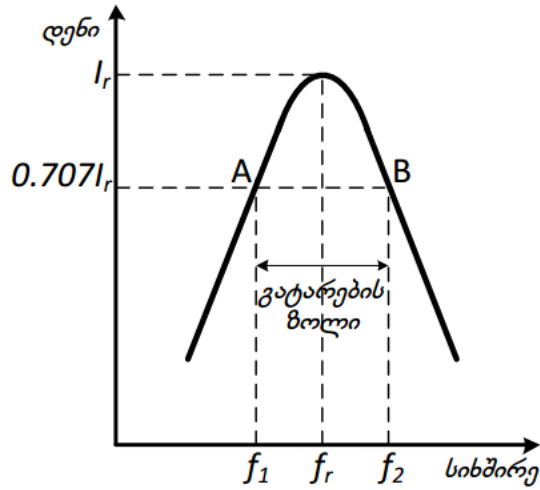
50-ე ნახაზზე ნაჩვენებია მიმდევრობით შეერთებულ R-L-C წრედში გამავალი დენის დამოკიდებულება წრედზე მოდებული ძაბვის სიხშირეზე. რეზონანსულ სიხშირეზე დენს აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა. ამ გრაფიკზე აგრეთვე ნაჩვენებია A და B წერტილები სადაც დენი $I=0.707IR$ და ამ წერტილებს სიხშირის ღერძზე შეესაბამება f_1 და f_2 სიხშირეები. წრედის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე არის I^2R -ის ტოლი. $I=0.707IR$ წერტილზე სიმძლავრე იქნება $(0.707IR)^2R=0.5 IR^2R$. ე.ი. f_1 და f_2 სიხშირეებზე წრედი მოითხოვს ნახევარ სიმძლავრეს მაქსიმალურ სიმძლავრესთან შედარებით. ამიტომ ამ წერტილებს ნახევარი სიმძლავრის შესაბამისი წერტილები ეწოდება. ამ ორ წერტილს შორის მანძილს, ანუ $(f_2 - f_1)$ სხვაობას ეწოდება სიხშირის გატარების ზოლი. შესაძლოა ვაჩვენოთ, რომ:

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad \text{ან} \quad (f_2 - f_1) = \frac{f_r}{Q}$$

შერჩევითობა არის R-L-C წრედის შესაძლებლობა ან უნარი, რომ იგი ეფექტურად მუშაობდეს იმ სიხშირეებზე რომელზედაც იგი გათვლილია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, თუ წრედი მუშაობს კონკრეტულ რეზონანსულ სიხშირეზე, ამ სიხშირის ზემოთ და ქვემოთ წრედი უნდა გამოდიოდეს რეზონანსიდან.

ანუ რაც უფრო მაღალია ხარისხის კოეფიციენტი Q და რაც უფრო ვიწროა გატარების ზოლი $(f_2 - f_1)$, მით უფრო შერჩევითია აღნიშნული წრედი. ე.ი. R-L-C წრედის მაღალი შერჩევითობა ნიშნავს ვიწრო გატარების ზოლის და მაღალი ხარისხის კოეფიციენტის კომბინაციას.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მაღალი ხარისხის კოეფიციენტის მქონე წრედები გამოიყენება ტელეკომუნიკაციაში, მაგრამ მძლავრ R-L-C წრედებში (მაგალითად გადაცემის ქსელში) ამ კოეფიციენტის მაღალი სიდიდე უარყოფითი მხარეა, რადგან შეიძლება გამოიწვიოს იზოლაციაზე ძაბვის მატება საშიშ სიდიდემდე და უარეს შემთხვევაში მისი გარღვევაც კი.

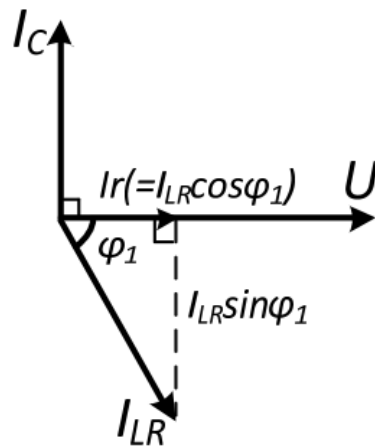


ნახაზი 50. გატარების ზოლის ამსახველი მრუდი

3.10. რეზონანსული სიხშირე

როდესაც I_{LR} დენის ვერდიკალური კომპონენტი I_C -ს ტოლია, მაშინ

$$I_C = I_{LR} \sin \varphi_1 \quad (\text{ნახ.51})$$



ნახაზი 51. აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დენების ვექტორები

რეზონანსის დროს:

$$\frac{U}{X_C} = \left(\frac{U}{Z_{LR}} \right) \left(\frac{X_L}{Z_{LR}} \right)$$

საიდანაც

$$Z_{LR}^2 = X_C X_L = (2\pi f_r L) \left(\frac{1}{2\pi f_r C} \right) = \frac{L}{C}$$

აქედან

$$\left(\sqrt{R^2 + X_L^2}\right)^2 = \frac{L}{C} \quad \text{და} \quad R^2 + X_L^2 = \frac{L}{C}$$

$$(2\pi f_r L)^2 = \frac{L}{C} - R^2 \quad \text{და} \quad 2\pi f_r L = \sqrt{\frac{L}{C} - R^2} \quad \text{და} \quad f_r = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{L}{C} - R^2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{L^2 C} - \frac{R^2}{L^2}}$$

ე.ი. პარალელურ წრედში რეზონანსული სიხშირე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad \text{ჰც}$$

(როდესაც უმნიშვნელო სიდიდისაა, მაშინ:

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

ანუ იგივეა, რაც გვექონდა მიმდევრობითი რეზონანსის დროს).

რეზონანსული დენი

ნახაზიდან რეზონანსული დენი ტოლია:

$$I_r = I_{LR} \cos\varphi_1 = \left(\frac{U}{Z_{LR}}\right) \left(\frac{R}{Z_{LR}}\right) = \frac{UR}{Z_{LR}^2}$$

ამასთან წინა პარაგრაფიდან:

$$Z_{LR}^2 = \frac{L}{C}$$

აქედან გამომდინარე

$$I_r = \frac{UR}{\frac{L}{C}} = \frac{URC}{L}$$

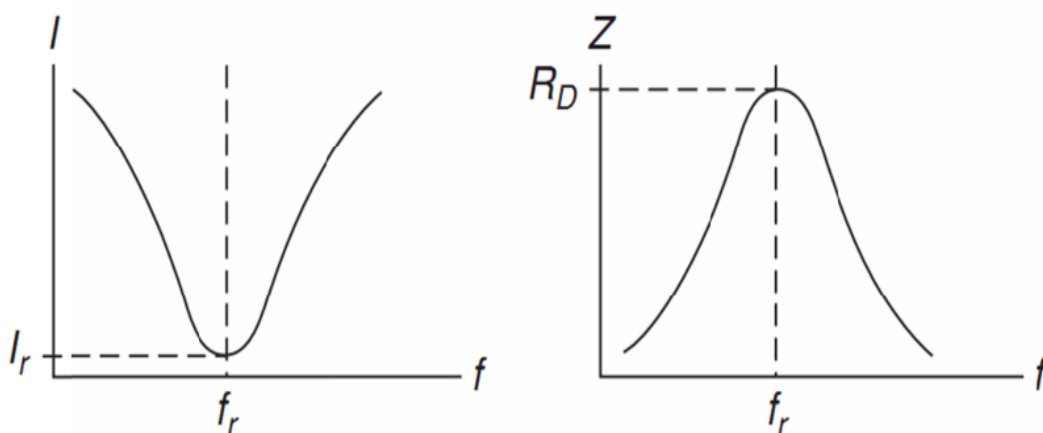
მიმდევრობითი რეზონანსისგან განსხვავებით ასეთ წრედში დენი მინიმალური სიდიდის არის რეზონანსის დროს.

3.11. დინამიკური წინაღობა

რადგან დენი და ძაბვა რეზონანსის მომენტში ერთ ფაზაში არიან, წრედის სრული წინაღობა იქცევა აქტიური წინაღობის მსგავსად. რეზონანსის მომენტში წრედის სრულ წინაღობას დინამიკური წინაღობა ეწოდება და R_D – თი აღინიშნება.

$$R_D = \frac{L}{RC} \text{ (ომი)}$$

დენის და წინაღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდები 52-ე ნახაზზეა ნაჩვენები. ამ ნახაზებიდან ჩანს რომ მიმდევრობით რეზონანსთან შედარებით სურათს აქვს რევერსული ხასიათი.



ნახაზი 52. დენისა და სრული წინაღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდები

3.12. გადამლობი წრედი

პარალელური რეზონანსული წრედი ყოველთვის განიხილება როგორც გადამლობი წრედი, რადგან რეზონანსულ სიხშირეზე აქვს მაქსიმალური წინაღობა და რეზულტატში დენი მინიმალურ სიდიდემდეა შემცირებული. სახელწოდებაც გადამლობი წრედი გამომდინარეობს პარალელური რეზონანსის ბუნებიდან.

3.13. ხარისხის კოეფიციენტი

პარალელურ რეზონანსული წრედის პარალელურ შტოებში დენები შესაძლოა გაცილებით დიდი იყოს წყაროს დენთან შედარებით. აღნიშნული წრედის ხარისხის კოეფიციენტი არის ფარდობა პარალელურ შტოში გამავალი დენისა წყაროს დენთან. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ ასეთი წრედის ხარისხის კოეფიციენტი არის დენის გაძლიერების სიდიდე.

$$\begin{aligned} \text{ხარისხის კოეფიციენტი (Q)} &= \text{დენის გაძლიერება} = \frac{\text{ცირკულირებული დენი}}{\text{წყაროს დენი}} = \frac{I_c}{I_r} = \\ &= \frac{I_{LR} \sin \varphi_1}{I_r} = \frac{I_{LR} \sin \varphi_1}{I_{LR} \cos \varphi_1} = \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} = \tan \varphi_1 = \frac{X_L}{R} \end{aligned}$$

ე.ი. რეზონანსის დროს პარალელური წრედის ხარისხის კოეფიციენტი:

$$Q = \frac{2\pi f_r L}{R}$$

(ბოლო ფორმულა იგივეა რაც გვექონდა მიმდევრობითი რეზონანსული წრედისთვის) უნდა აღინიშნოს, რომ პარალელურ რეზონანსულ წრედში ხარისხის კოეფიციენტი გვიჩვენებს დენის გაძლიერების სიდიდეს, როდესაც მიმდევრობით რეზონანსულ წრედში ეს პარამეტრი წარმოადგენდა ძაბვის გაძლიერებას.

როგორც წესი ქსელის სიხშირეზე პარალელური წრედების ხარისხის კოეფიციენტი დაბალია, ჩვეულებრივ 10-ზე ნაკლები, მაგრამ რადიო სიხშირეებისთვის ხარისხის კოეფიციენტი შეიძლება ძალიან მაღალი იყოს.

3.14. აქტიური წინაღობის გავლენა სიხშირულ სპექტრზე

ზემოთ მოყვანილი რეაქტიული წინაღობები X_L, X_C დამოკიდებულია სიხშირეზე. რაც უფრო მაღალია სიხშირე ინდუქციურ დატვირთვაში, მით უფრო დიდი წინაღობა აქვს მას, ხოლო ტევადურ დატვირთვაში კი პირიქით. სწორედ ეს განაპირობებს, რომ სისტემის სრული წინაღობა დამოკიდებულია სიხშირეზე.

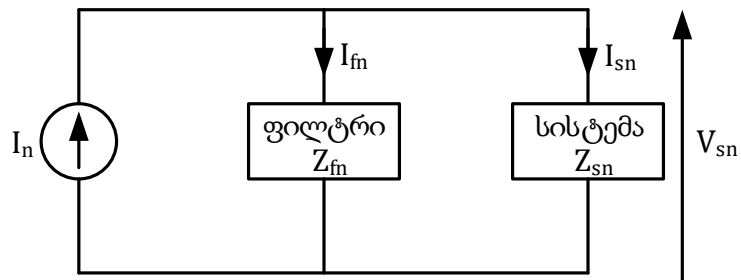
სრული წინაღობის ერთერთი ძირითადი შემადგენია აქტიური

წინააღმდეგობა, როგორც ზემოთ მოყვანილი თავებიდან ჩანს სიხშირე მის წინააღმდეგობაზე არ მოქმედებს, მაგრამ როდესაც ვიხილავთ სისტემის სრულ წინააღმდეგობის დამოკიდებულებას სიხშირეზე, მისი უგულებელყოფა არამიზანშეწონილია, რადგან სრული წინააღმდეგობა შეიცავს როგორც აქტიურ ისე წარმოსახვით მდგენელის კომპლექსურ სახეში. სიხშირის ცვლილება მოქმედებს კომპლექსური რიცხვებით წარმოდგენილ ელემენტებზე და მათზე მათემატიკური მოქმედებით ვიღებთ, რომ სისტემის წინააღმდეგობის გამოთვლისას აქტიური წინააღმდეგობა მნიშვნელოვნად ცვლის მიღებულ შედეგს. ეს პროცესი განხილული იქნება ქვემოთ მოყვანილ თავებში.

3.15. მოდელის აღწერა და გაანგარიშებების ჩატარება

მიერთების წერტილად პირობითად აღებულია 220 კვ ძაბვის სალტე, რომელიც წარმოადგენს მოდელირებული სისტემის ნაწილს. ანალიზის მიზანია მიერთების წერტილში განისაზღვროს ქსელის წინააღმდეგობის სიხშირულ სპექტრზე დამოკიდებულების სურათი, რათა წინასწარ გვეჩვენოს ინფორმაცია მოსალოდნელი ეფექტის შესახებ, რომელიც შეიძლება გამოიწვიოს ამ წერტილში რაიმე სახის მოწყობილობის მიერთებამ, რომელსაც გააჩნია მძლავრი ელექტრონული გამოსასვლელი. მაგალითად, ეს შეიძლება იყოს ქარის ელექტროსადგური ან მძლავრი მომხმარებელი, რომელიც გენერირებს ჰარმონიკებს. დავუშვათ, მიერთების წერტილზე უნდა მიერთდეს ქარის ელექტროსადგური რომლის გენერატორიც ქსელთან ერთდება სიხშირული კონვერტორით (B2B ტიპის). პრაქტიკულად მისი გამოსასვლელი წარმოადგენს ძალოვან ინვერტორს. მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე ასეთი ინვერტორის გამოსასვლელზე ძაბვა ყოველთვის შეიცავს მნიშვნელოვანი ოდენობის და ამპლიტუდის ჰარმონიკებს. მათ ჩასახშობად კლასიკური მეთოდი არის ცვლადი ძაბვის ფილტრების გამოყენება, რათა არ მოხდეს გენერირებული ჰარმონიკების ქსელში შეღწევა. მეორეს მხრივ, ჰარმონიკების ქსელში შეღწევა არ შეღწევის

საკითხი დამოკიდებულია უმარტივესი სქემის მოქმედების პრინციპზე, რომელიც ნაჩვენებია ნახაზ 53-ზე.



ნახაზი 53. სისტემის წინალობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა სადაც,

I_n - კონვერტორის მიერ გენერირებული ჰარმონიკული დენებია

I_{fn} - ფილტრებში გამავალი ჰარმონიკული დენები

I_{sn} - მკვებავ სისტემაში შეჭრილი ჰარმონიკული დენები

Z_{fn} - ფილტრის ჰარმონიკული წინალობაა

Z_{sn} - სისტემის ჰარმონიკული წინალობაა მიერთების წერტილში

V_{sn} - ჰარმონიკული ძაბვის ვარდნა მიერთების წერტილში

ძაბვის და დენის დამახინჯებები თითოეული ჰარმონიკისთვის შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n$$

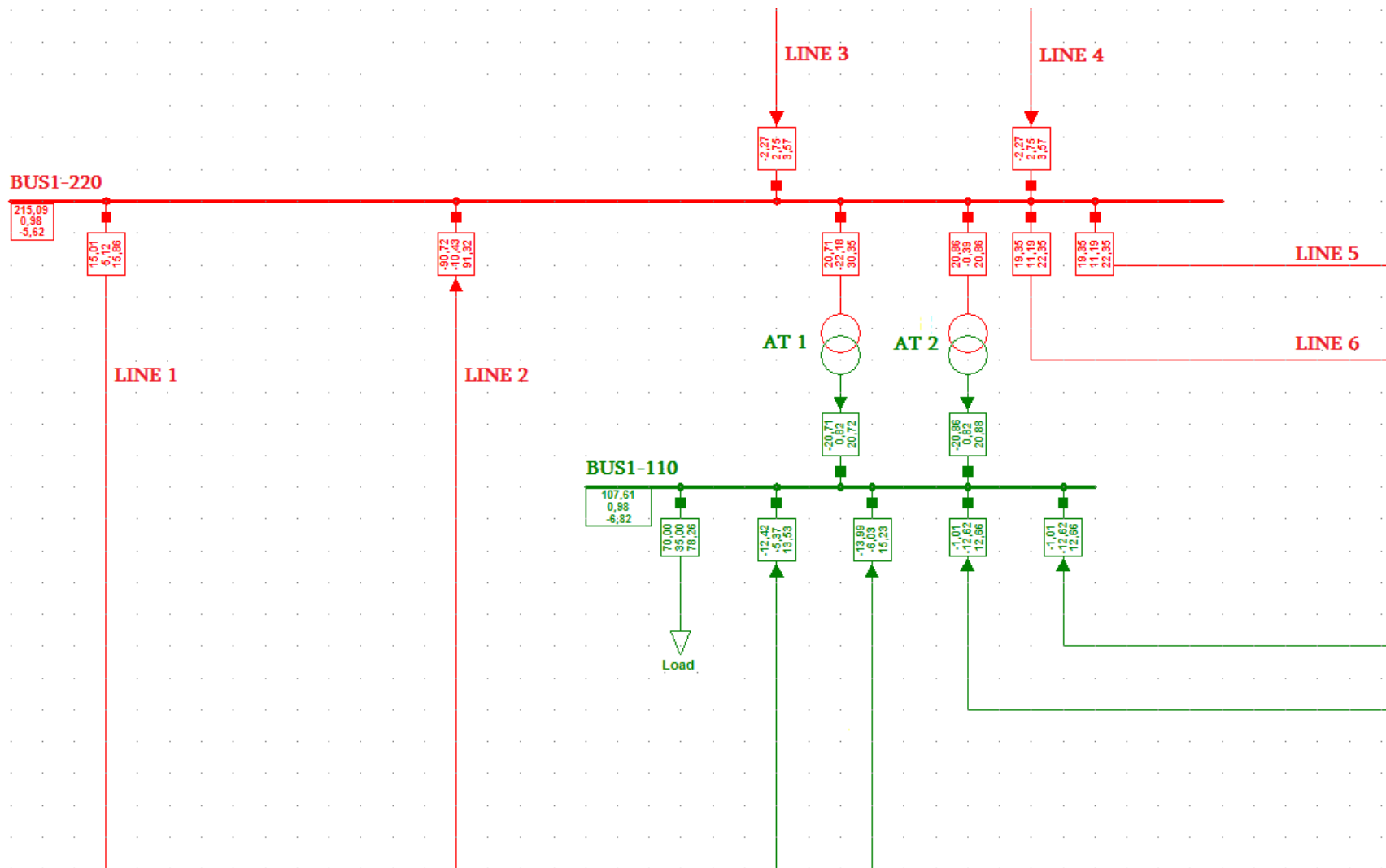
$$V_{sn} = \frac{Z_{fn} \times Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n$$

ნახაზიდან და ფორმულებიდან ცალსახად ჩანს, რომ თუ კონკრეტულ ჰარმონიკულ სიხშირეზე სისტემის წინალობა უფრო ნაკლები იქნება ვიდრე ფილტრის წინალობა ამავე სიხშირეზე, მაშინ აღნიშნული ჰარმონიკა უფრო მარტივ გზას გამონახავს სისტემისკენ, არ გაივლის ფილტრში და ქსელში შესვლით გამოიწვევს ჰარმონიკული დამახინჯების გაზრდას. აქედან გამომდინარე, ფილტრის დიზაინის შერჩევასა აუცილებელია შეფასდეს მიერთების წერტილში ქსელის წინალობები იმ სიხშირეებზე, რომელსაც გენერირებს ჰარმონიკული წყარო. მხოლოდ ამის შემდეგ აქვს აზრი ზოგადად ფილტრების შერჩევას საუბარს. აქვე უნდა ითქვას, რომ სხვა

წერტილში მიერთებისას ქსელის ჰარმონიკული წინააღმდეგობის სურათი შეიცვლება, რაც გამოწვეულია ჩანაცვლების სქემის ცვლილებით. შესაბამისად ერთი და იგივე ჰარმონიკული წყაროს სხვადასხვა წერტილში მიერთების შემთხვევაში ერთი და იგივე ფილტრი არ გამოდგება და საჭირო გახდება მისი რედიზაინი. ხაზი უნდა გაესვას იმ გარემოებასაც, რომ მიერთების წერტილში წინააღმდეგობის სპექტრული სურათი ძლიერ არის დამოკიდებული ქსელის ტოპოლოგიაზე, რაც ნიშნავს რომ ამ კვანძზე მიერთებული ელემენტების სტატუსი (ჩართულობა-გამორთულობა) ცვლის ჩანაცვლების სქემას, რადგან კონკრეტული ელემენტის ჩართვა გამორთვა იწვევს ჩანაცვლების სქემაზე შესაბამისი წინააღმდეგობის სტატუსის ცვლილებას. ამ კვლევის მიზანიც სწორედ ტოპოლოგიის გავლენის შესწავლაა კვანძის სპექტრულ სურათზე. [4]

მოდელირებული, ფიქტიური სისტემა შეიცავს მრავალ, კვანძს მომხმარებელს, გენერაციის ობიექტებს და ქსელის სხვა ელემენტებს რომლებიც გვხვდება რეალურ სისტემაშიც. დაკვირვებისთვის ვიყენებთ მხოლოდ ერთ კვანძს, რომელსაც ნახაზზე BUS1 ჰქვია (ნახ. 54). ამ კვანძიდან გადის 6 ეგზ, რომელთაც განსხვავებული სიგრძეები აქვთ რაც აისახება მათ ჩანაცვლების სქემაზეც. 220 კვ კვანძს 110 კვ კვანძთან აკავშირებს ორი პარალელურად ჩართული ავტოტრანსფორმატორი. ჩანაცვლების სქემაზე ავტოტრანსფორმატორებისთვის გათვალისწინებულია პარაზიტული ტევადობებიც, რომლებიც ბუნებრივად იქმნება ხვიებს შორის და ხვიებსა და ტრანსფორმატორის კორპუსს შორის. ასეთი ტევადობები ნაკადგანაწილების ანგარიშისას დიდ როლს არ თამაშობენ, მაგრამ ქსელის სპექტრული ანალიზის ჩატარებისას მათი გათვალისწინება სასურველია.

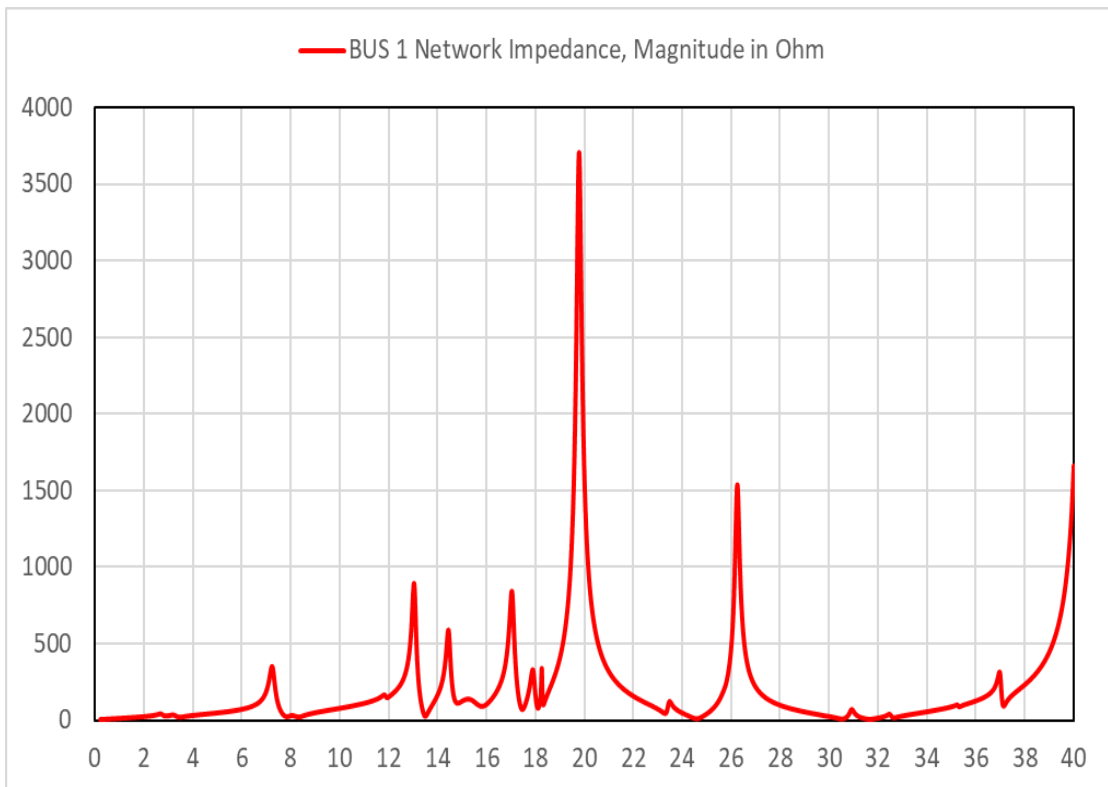
როგორც ზემოთ ითქვა ამ კვლევის მიზანია მიერთების წერტილში დავადგინოთ ქსელის წინააღმდეგობის მნიშვნელობები სხვადასხვა ჰარმონიკულ სიხშირეზე. სულ განხილულია 6 სცენარი. პირველ სცენარში კვანძზე მიერთებული ყველა ელემენტი ჩართულია, ხოლო შემდეგ სცენარებში ხდება N-1 პრინციპით რამდენიმე ელემენტის გათიშვა



ნახაზი 54. მოდელირებული ქვესადგურის სქემა, სადაც ხდება დაკვირვება

და ქსელზე დაკვივრება. თითოეული სცენარისთვის ნაჩვენებია მიერთების წერტილში ქსელის აქტიური, რეაქტიული, სრული წინაღობებისა და ფაზის სიხშირულ სპექტრზე დამოკიდებულების მრუდები. სიხშირული სპექტრი მოიცავს 0 - 2000 ჰერც დიაპაზონს 0.2 ჰერციანი ბიჯით. 2000 ჰერცში მოაზრებულია მე-40 ჰარმონიკა.

1. BUS 1 –ზე მიერთებული ყველა ელემენტი ჩართულია

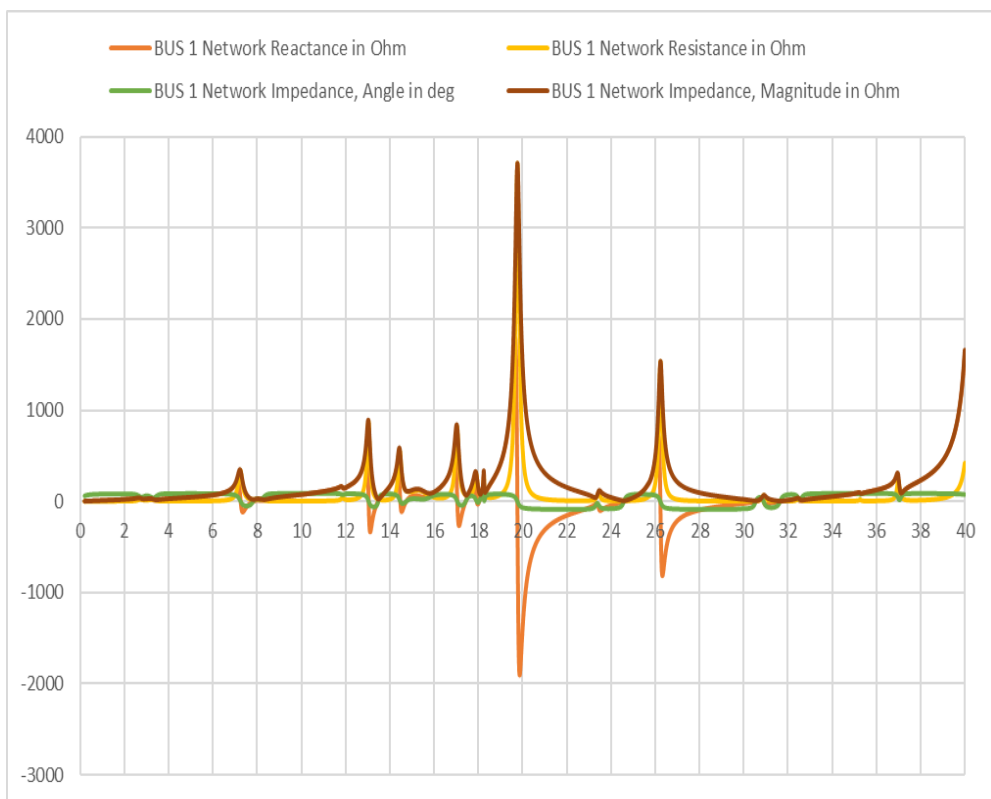


ნახაზი 55. ყველა ელემენტი ჩართულია, სისტემის სრული წინაღობის მრუდი

ნახაზ 55-ზე ნაჩვენებია BUS 1 კვანძში ქსელის სრული წინაღობა სცენარისთვის, როდესაც ყველა ელემენტი ჩართულია. დიაგრამიდან ჩანს რომ ქსელის წინაღობა საგრძნობლად მცირდება მე-3, მე-8, მე-13, 25-ე, 31-ე და 32-ე ჰარმონიკული სიხშირეების მახლობლობაში. ამის გამომწვევი მიზეზი არის რეზონანსული მოვლენები აღნიშნულ სიხშირეებზე. შესაძლოა ამ სიხშირეებზე სრულ რეზონანს ადგილი არ ჰქონდეს, მაგრამ ახლოს იყოს რეზონანსულ წერტილთან.

ნახაზ 56-ზე ნაჩვენებია იგივე სცენარისთვის სრული, აქტიური რეაქტიული წინაღობები და წინაღობების საკმუთხედის კუთხე აქტიურსა და სრულს წინაღობებს შორის. საინტერესო მომენტებია მე-20 და 26-ე ჰარმონიკებთან ახლოს, როდესაც ქსელის რეაქტიული წინაღობის ბუნება ინდუქციურიდან მკვეთრად გადადის ტევადურში გადადის, ამ გადასვლას ადასტურებს ფაზის ნიშნის ცვლილებაც, რადგან იგი კვეთს ორდინატთა ღერძს.

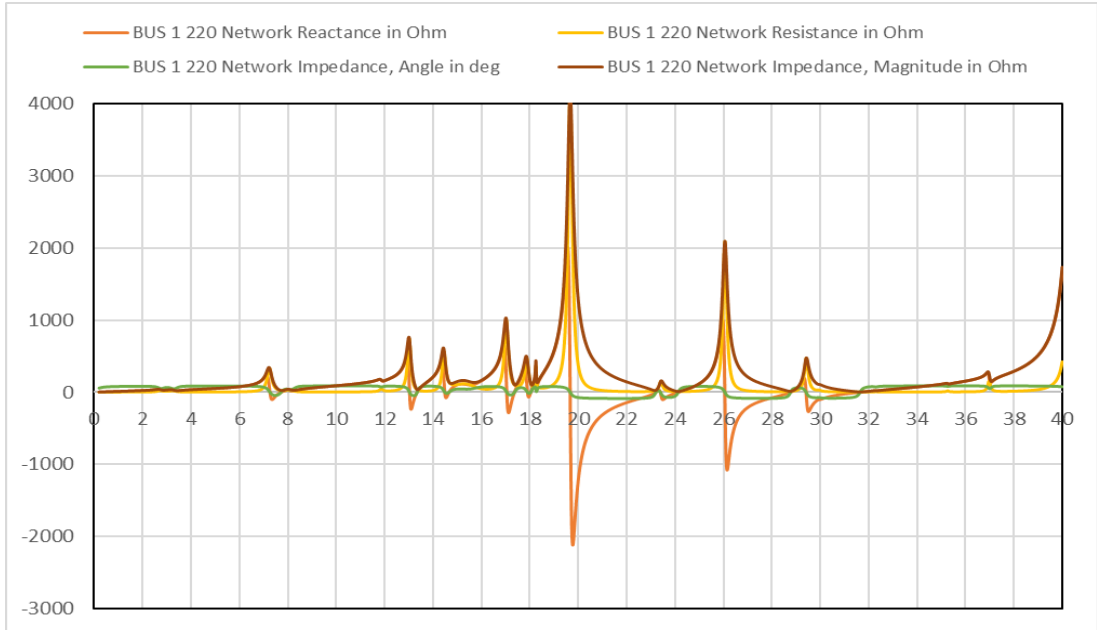
ყველა შემდეგი სცენარისთვის ოთხივე პარამეტრი ნაჩვენებია ერთ გრაფიკზე.



ნახაზი 56. ყველა ელემენტი ჩართულია

1. LINE 3 -ის გათიშვა

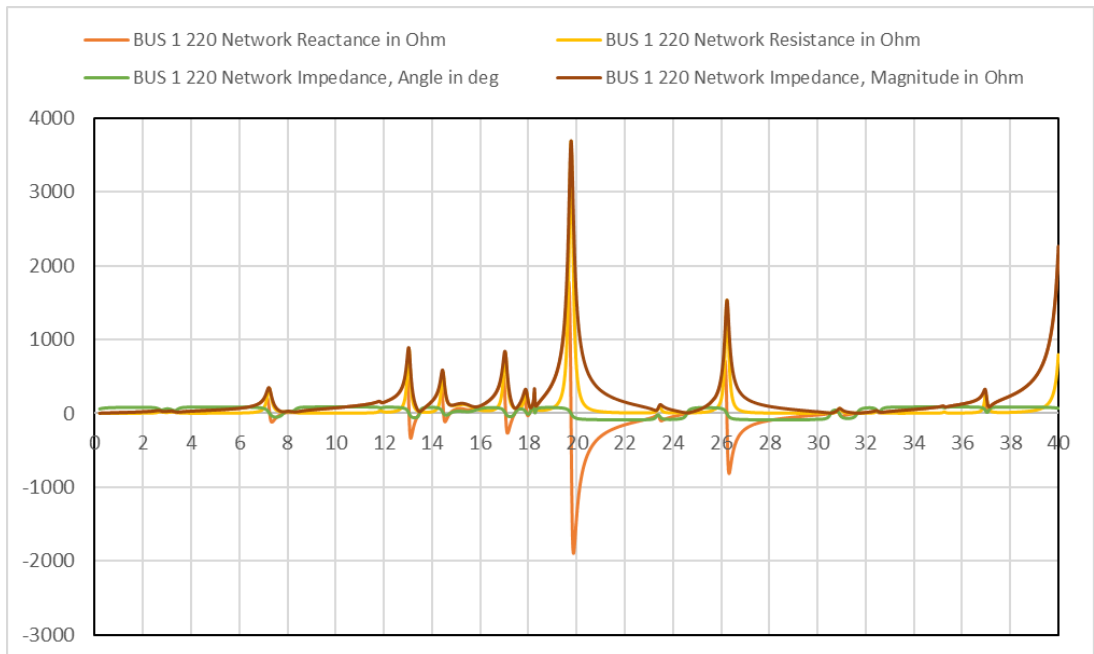
LINE 3-ის გათიშვისას სურათი იცვლება, რაც ძირითადად გამოიხატება გარკვეულ სიხშირეებზე ქსელის წინაღობების გაზრდით (ნახაზი 57). LINE 4 -ის გათიშვას არ განვიხილავთ რადგან მოდელირებულ სქემაზე იგი LINE 3 -ის იდენტურია, ანუ მისი მეორე ჯაჭვია.



ნახაზი 57. LINE 3 -ის გათიშვა

2. LINE 5-ის გათიშვა

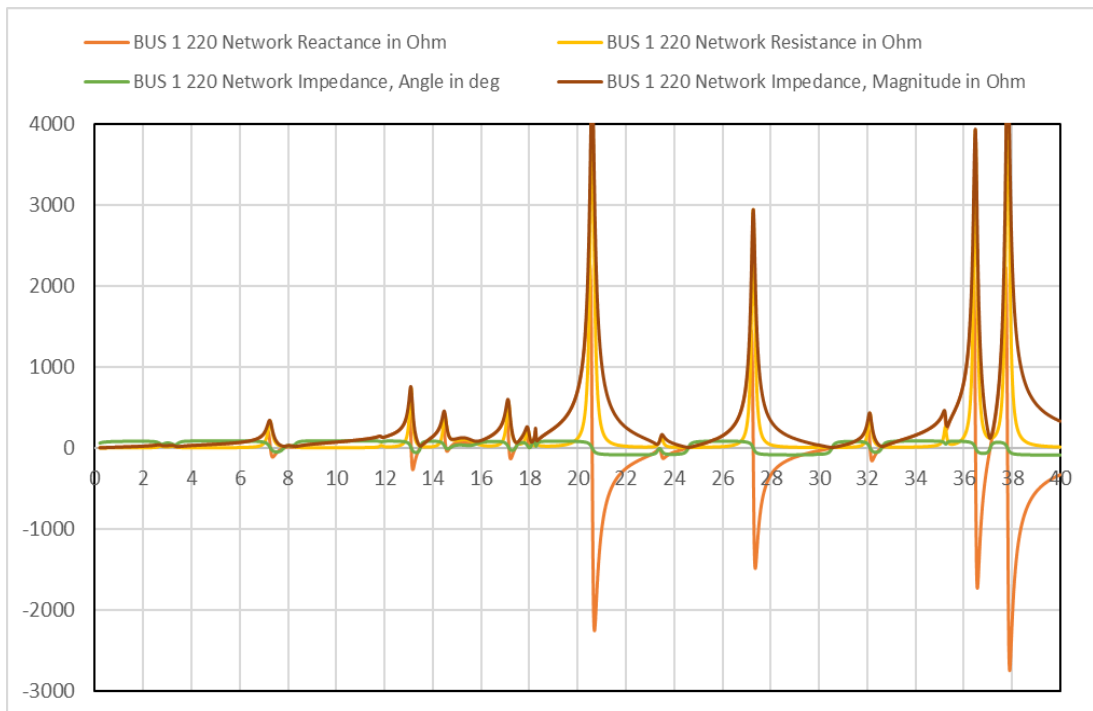
LINE 5-ის გათიშვისას თითქმის მთელ სპექტრზე ქსელის წინაღობები მცირდება და ზოგიერთი რეზონანსული წერტილი წანაცვლებულია მარჯვნივ.



ნახაზი 58. LINE 5 -ის გათიშვა

3. LINE 1-ის გათიშვა

LINE 1-ის გათიშვისას ზოგიერთ სიხშირეზე ადგილი აქვს წინაღობების გაზრდას, ამასთან ჩნდება ახალი რეზონანსული კონტურები, რომლებიც წინა სცენარებში არ არსებობდა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგიერთი რეზონანსული წერტილი წინა სცენარებთან შედარებით წანაცვლებულია სიხშირულ დერძზე.

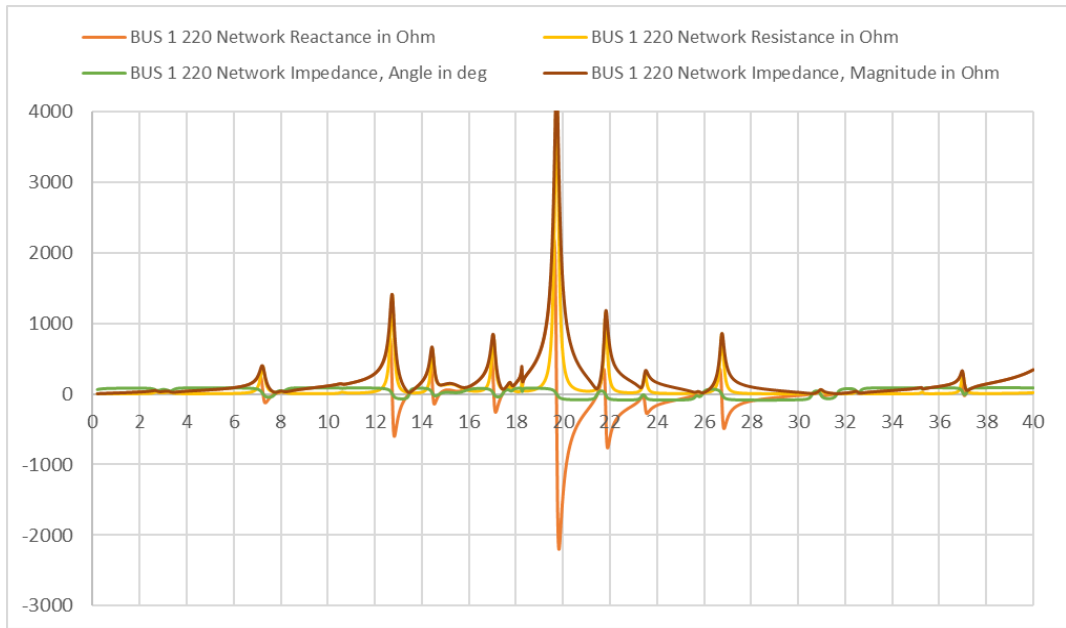


ნახაზი 59. LINE 1 -ის გათიშვა

4. LINE 2-ის გათიშვა

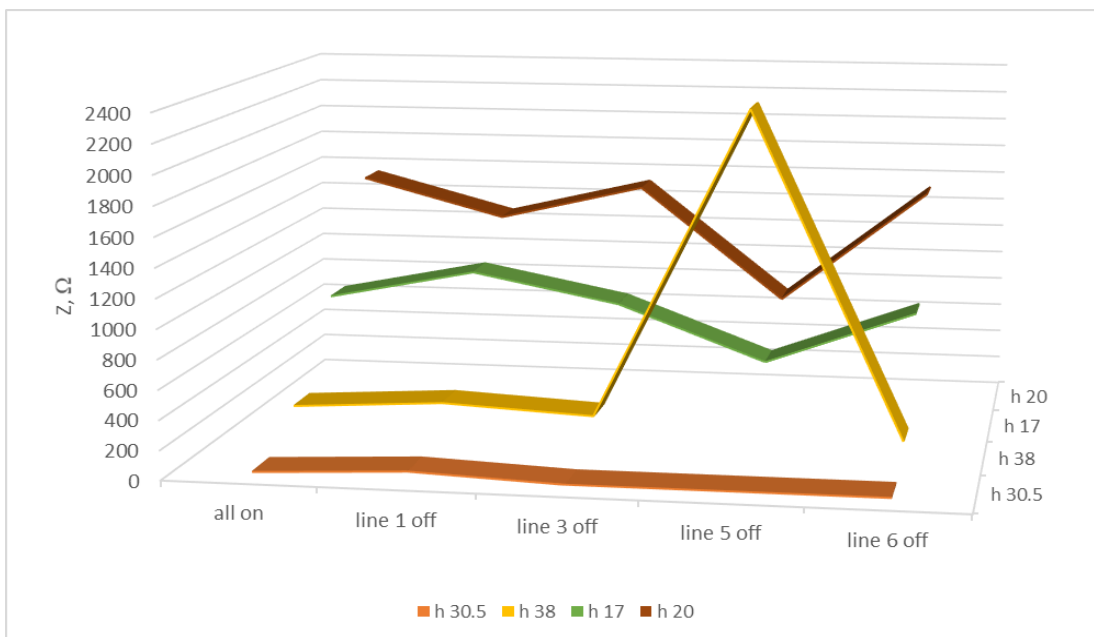
აქ სურათი კიდევ უფრო იცვლება და ადგილი აქვს როგორც ახალი რეზონანსული კონტურების წარმოქმნას, ასევე არსებული რეზონანსული კონტურების გადაადგილებას სიხშირულ დერძზე.

სურათზე ჩანს, რომ მე-20, 22-ე, 24-ე ლუწი რიგის ინტერჰარმონიკებზე გვაქვს სისტემაში რეზონანსი. მე-20 რიგის ჰარმონიკაზე ხდება ქსელის წინაღობის რადიკალური ცვლილება, ანუ სისტემის წინაღობა ინდუქციური ხასიათიდან მთლიანად გადადის ტევადურში, ასევე თუ დავაკვირდებით ძვრის კუთხეს დენსა და ძაბვას შორის ვნახავთ ამ სხვაობას.



ნახაზი 60. LINE 2-ის გათიშვა

ნახაზ 61-ზე ნაჩვენებია შემთხვევითი პრინციპით აღებული რამდენიმე ჰარმონიკული სიხშირისთვის სცენარზე დამოკიდებული ქსელის სრული წინაღობების ამსახველი მრუდები, რაც კიდევ ერთხელ უსვამს ხაზს იმ ფაქტს, რომ ტოპოლოგიის შეცვლამ შესაძლოა მკვეთრად შეცვალოს ქსელის წინაღობა კონკრეტულ სიხშირეზე.



ნახაზი 61. ზოგიერთი ჰარმონიკული წინაღობა

აღნიშნული სცენარების განხილვა იძლევა მკაფიო წარმოდგენას თუ როგორ ცვლის ტოპოლოგიის ცვლილება ქსელის წინააღმდეგობის სპექტრულ სურათს. როგორც შედეგებიდან ჩანს საკმაოდ ბევრი წერტილია სპექტრში, სადაც სისტემის იმპედანსი ძალიან მცირეა. ეს გარემოება აუცილებლად უნდა იქნას გათვალისწინებული ფილტრების შერჩევამდე. ყველა კონკრეტული სცენარის განხილვა რა თქმა უნდა რთულია, მაგრამ მსგავსი ანალიზის ჩატარება ისეთი სცენარებისთვის, რომელიც კონკრეტული სისტემისთვის ყველაზე სახასიათო და ხშირია აუცილებელია. ჩატარებული ანალიზიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თუ ქსელში მოხდება ისეთი ახალი ელემენტის დამატება, რომელსაც რეაქტიული ბუნება გააჩნია, აუცილებელია ქსელში არსებული ფილტრების ეფექტურობის ხელახალი შეფასებაც.[6]

თავი 4. სხვადასხვა დისკრეტულობის მქონე ფილტრების კომუტაციით გამოწვეული ძაბვის ნახტომების ანალიზი

4.1. შუნტური კონდენსატორის კომუტაციის მოდელირება

როგორც წინა თავებში აღვნიშნეთ, კონვერტორული ქვესადგურები ჰარმონიკების ფილტრაციისთვის იყენებენ სხვადასხვა დისკრეტულობის და კონსტრუქციის ცვლადი ძაბვის ფილტრებს, რომლებიც შედგებიან მიმდევრობითი და პარალელურად შეერთებული კონდენსატორებისგან. ისინი თავისი ბუნებიდან გამომდინარე გენერირებენ რეაქტიულ სიმძლავრეს, რაც თავის მხრივ მოქმედებს ძაბვის სიდიდეზე.

ფილტრების კომუტაცია იწვევს ძაბვის ნახტომს, რომელც კონტროლდება საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის დადგენილება №10 „ქსელის წესების“ მუხლი 37. გადამცემი ქსელის მუშაობის სტანდარტების მე-7 ქვეთავის მიხედვით, რომელიც ეხება ძაბვის ცვლილების მნიშვნელობებს:

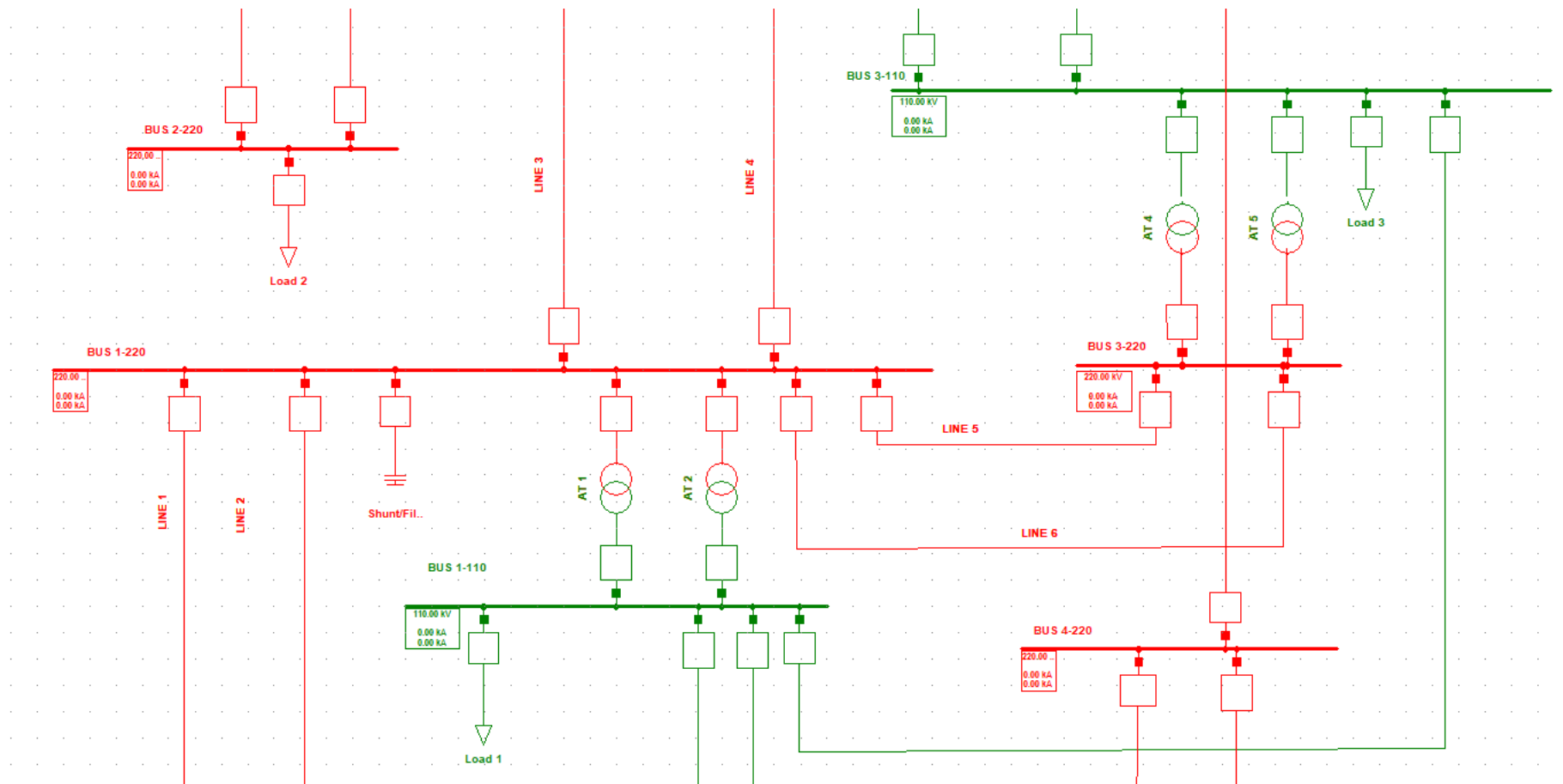
ა) საბაზო სცენარით ოპერირებისას, ე.ი. როცა ყველა ხაზი მწყობრშია, ძაბვის (ნახტომისებური) ცვლილების მნიშვნელობა გამოწვეული კონდენსატორის და მაშუნტირებელი რეაქტორის გადართვით არ უნდა აღემატებოდეს ნომინალური ძაბვის 3.0%-ს;

ბ) გაუთვალისწინებელი შემთხვევისას (N-1), ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობა ამ შემთხვევის წინ და მის შემდეგ არ უნდა იყოს 10%-ზე მეტი.

[5]

ზემოაღნიშნულის გათვალისწინებით ჩავატარეთ მოდელირება, რომლის მიზანიცაა გამოგვევლინა რეაქტიული სიმძლავრის ის სიდიდე რომლის კომუტაციაც არ დაარღვევდა ქსელის წესებით განსაზღვრულ ნორმას.

მოდელირებისთვის გამოვიყენეთ პროგრამა PowerFactory-ი რომელშიც გვაქვს დამოდელორებული ელექტროგადამცემის ქსელი.

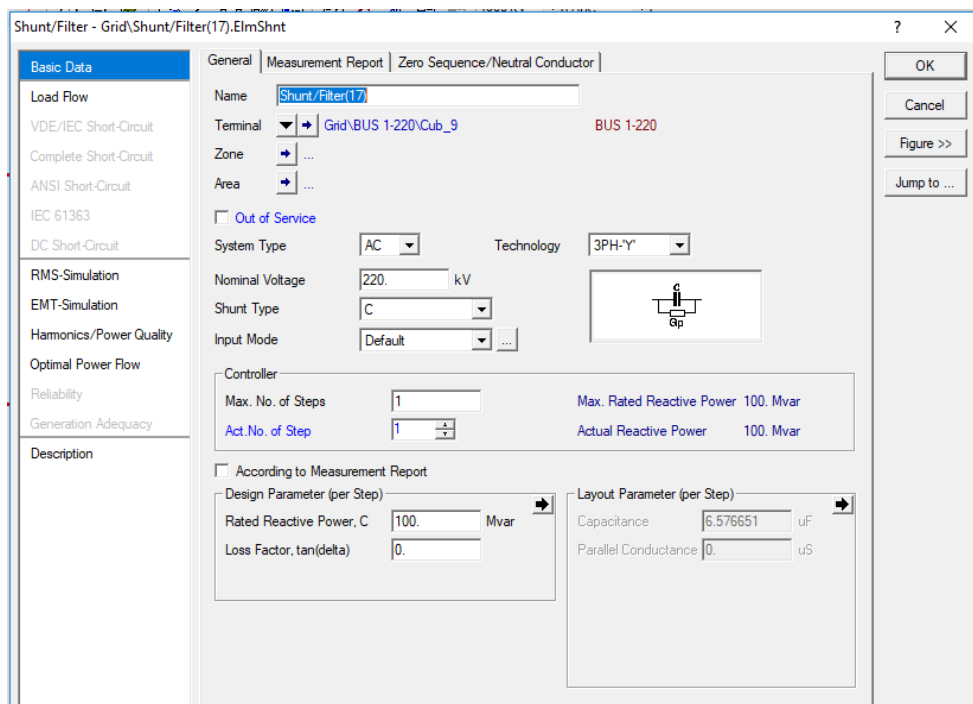


ნახაზი 62. მოდელირებული სქემა, სადაც მიერთებულია შუნტური კონდენსატორი

დაკვირვების ობიექტად გამოვიყენეთ ამ ქსელის რამდენიმე კვანძი (ნახაზი 62):

- BUS 1-220 - წარმოადგენს 220 კვ ძაბვის სალტეს, რომელზეც მიერთებულია ექვსი 220 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზი. იგი 2 ავტოტრანსფორმატორის საშუალებით დაკავშირებულია BUS 1-110 კვ ძაბვის სალტესთან, რომელზეც მოდებულია დატვირთვა Load 1-ის სახით.
- BUS 2-220 - წარმოადგენს BUS 1-220-ის მეზობელ ქვესადგურს, რომელზედაც მოდებულია Load 2 დატვირთვა.
- BUS 3-220 – დაკავშირებულია ორი 220 კვ ძაბვის ეგხ-ი კვანძ BUS 1-220-ს, ხოლო ორი ავტოტრანსფორმატორით იგი დაკავშირებულია BUS 3-110 კვ ძაბვის სალტეს, რომელზედაც მოდებულია Load 3 ტვირთი.
- BUS 4-220 - წარმოადგენს მოშორებით მყოფ მეზობელ ქვესადგურს.

BUS 1-220-ზე მოვდეთ შუნტური კონდესატორი (ნახ 63), რომელიც წარმოადგენს 220 კვ ძაბვის სამფაზა კონდესატორს.



ნახაზი 63. შუნტური კონდესატორის პარამეტრები

დაკვირვებისთვის ავიღეთ 3 განსხვავებული რეჟიმი, ესეია: დილის მინიმუმის რეჟიმი, შუადღის და საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმები. ამ რეჟიმებში მოვახდინეთ შუნტური კონდესატორის სხვადასხვა დისკრეტულობით ჩართვა, რომლის დიაპაზონიც იყო 0-დან 100 მეგავარამდე და დავაკვირდით ძაბვის ნახტომებს ზემოდ აღნიშნულ კვანძებში. მიღებული შედეგები შევიტანეთ ცხრილებში და ავაგეთ შესაბამისი მრუდები.

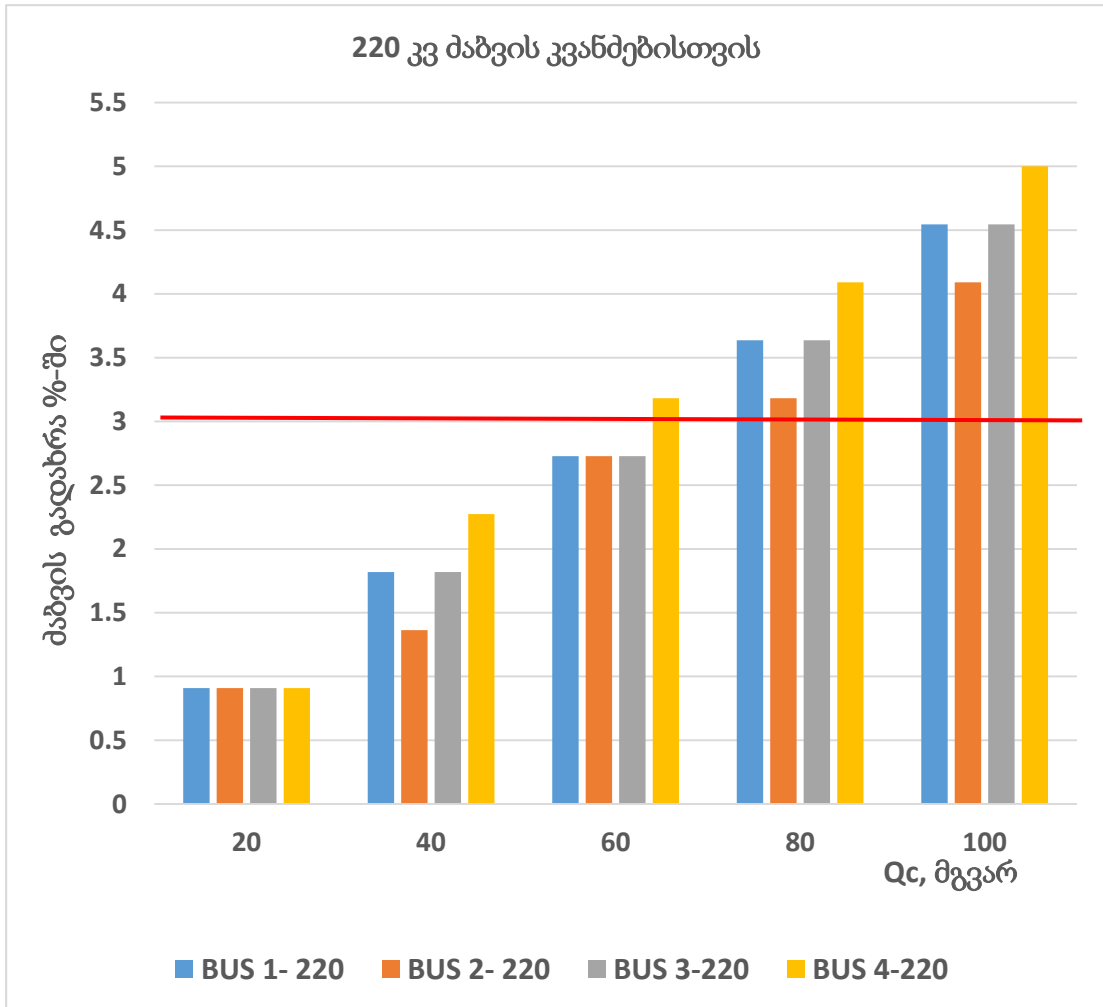
4.2. დილის მინიმუმის რეჟიმი

ცხრილი 4. ძაბვები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის მინიმუმის რეჟიმში

დატვირთვა	P, მგვტ	Q, მგვარ	დილის მინიმუმის რეჟიმი									
LOAD 1	30	15										
LOAD 2	70	35										
LOAD 3	60	30										
კვანძი	Qc=0 მგვარ		Qc=20 მგვარ		Qc=40 მგვარ		Qc=60 მგვარ		Qc=80 მგვარ		Qc=100 მგვარ	
	ძაბვას	%	ძაბვას	%	ძაბვას	%	ძაბვას	%	ძაბვას	%	ძაბვას	%
BUS 1- 220	213	0	215	0.91	217	1.82	219	2.73	221	3.64	223	4.55
BUS 2- 220	210	0	212	0.91	213	1.36	216	2.73	217	3.18	219	4.09
BUS 3-220	213	0	215	0.91	217	1.82	219	2.73	221	3.64	223	4.55
BUS 4-220	225	0	227	0.91	230	2.27	232	3.18	234	4.09	236	5.00
BUS 1-110	106	0	107	0.91	108	1.82	109	2.73	110	3.64	111	4.55
BUS 3-110	107	0	108	0.91	109	1.82	110	2.73	111	3.64	112	4.55

ცხრილ 4-ში მოცემულია მინიმალური რეჟიმს დროს დატვირთვები, ასევე დასაკვირვებელი კვანძების მიხედვით მათი საწყისი ძაბვები, რომელებიც შეესაბამება ძაბვის გადახრის 0%-იან მნიშვნელობას, ხოლო შუნტური კონდესატორის სხვადასხვა დისკრეტულობაზე კომუტაციისას ეს პროცენტები იზრდება.

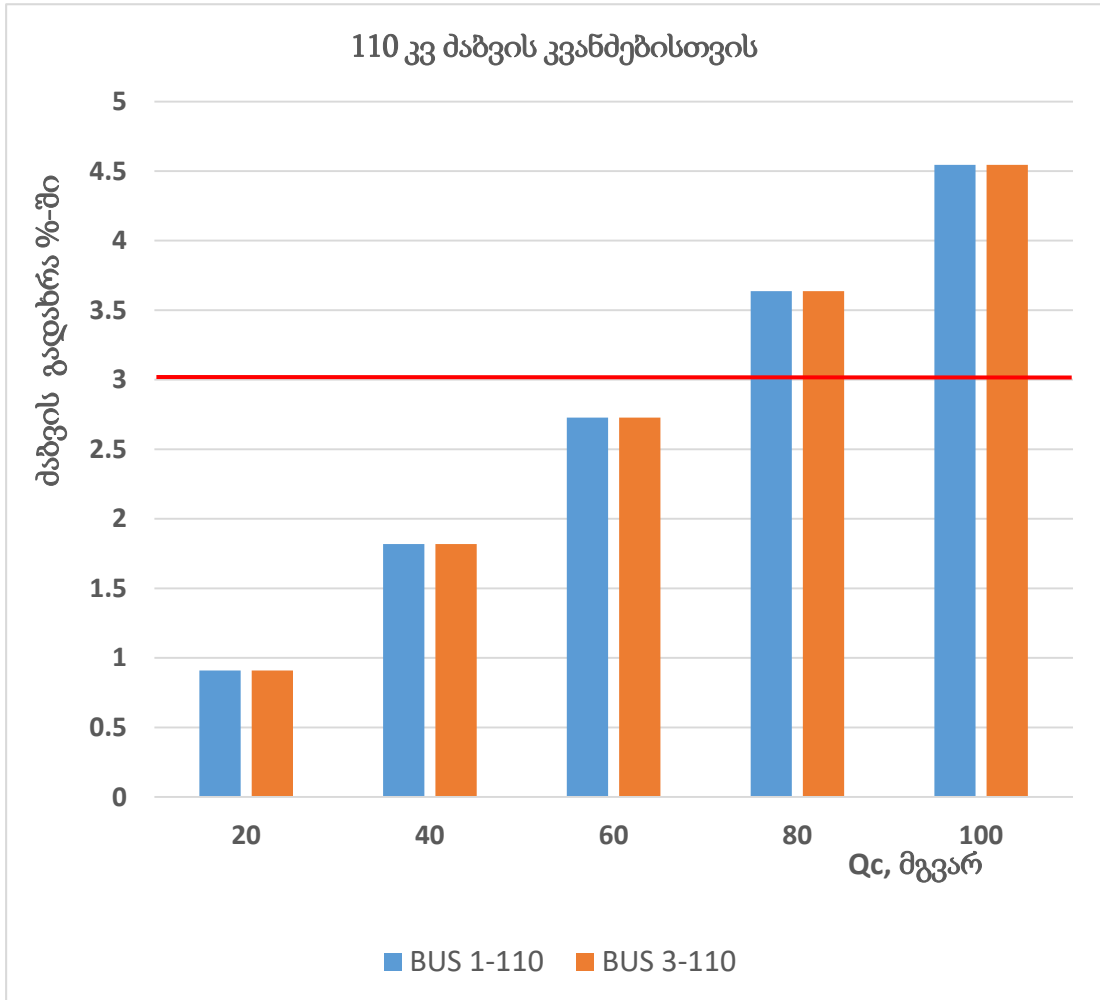
მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით ავსებთ მრუდი (ნახაზი 64), სადაც Y ღერძზე გადაზომილია ძაბვის გადახრა პროცენტებში, ხოლო X ღერძზე გადაზომილია შუნტური კონდესატორის სხვადასხვა დისკრეტულობა მეგაფარებში.



ნახაზი 64. ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში

როგორც ნახაზ 64-დან ჩანს დილის მინიმუმის რეჟიმში 220 კვ კვანძების ძაბვის გადახრა ასცდა ზღვრულ 3%-იან მნიშვნელობას კვანძ “BUS 4-220”-ზე 60 მგვარ რეაქტიული სიმძლავრის შუნტური კონდესატორის კომუტაციის დროს, ხოლო 60 მგვარ-ზე ზემოთ ყველა კვანძი გადაცდა აღნიშნულ ნიშნულს.

რაც შეეხება 110 კვ ძაბვის მხარეს, ნახაზ 65-დან ჩანს ნომინალური ძაბვის 3%-ით გადახრა დაფიქსირდა მხოლოდ 80-100 მეგავარი რეაქტიული სიმძავრის კომპუტაციისას.



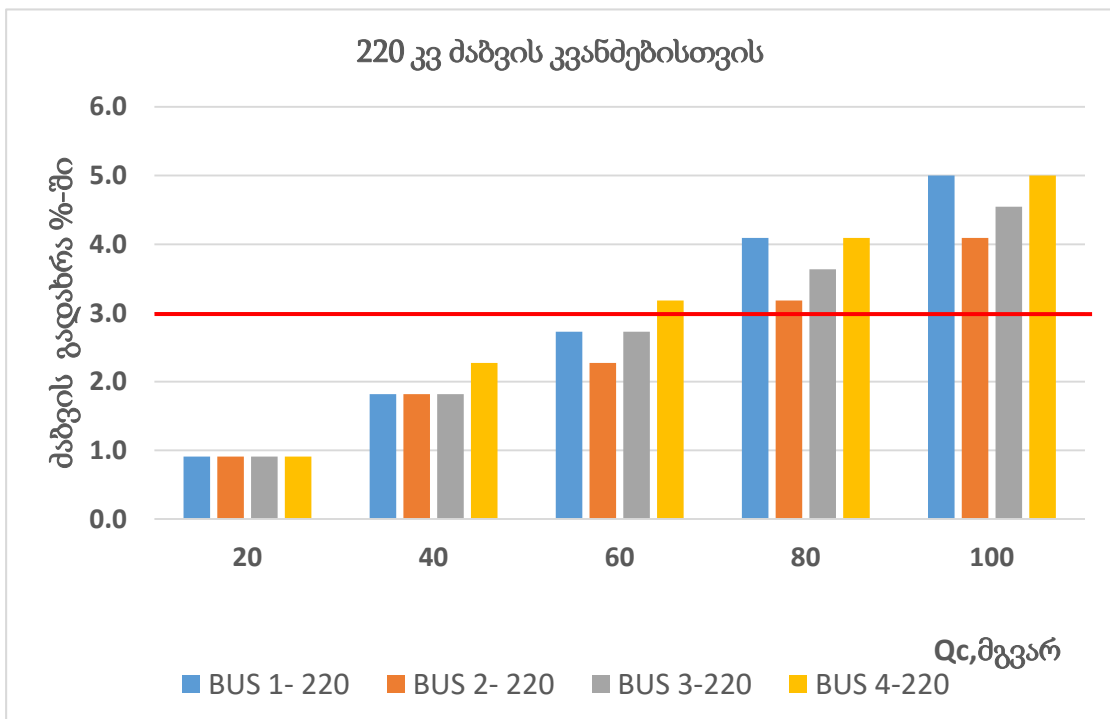
ნახაზი 65.ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

4.3. შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმი

ცხრილ 5-ში მოცემულია მაქსიმალური რეჟიმის პარამეტრები, სადაც დატვირთვა გაზრდილია და შესაბამისად გადადინება ხაზებზეც გაიზარდა, რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნილებამაც იმატა დატვირთვის კვანძებში. ცხრილ 5-ში შესულ მონაცემებზე დაყრდნობით ავაგეთ ძაბვის ნახტომის და გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის გრაფიკი 220 კვ ძაბვის კვანძებისთვის (ნახაზი 64) და 110 კვ ძაბვის კვანძებისთვის (ნახაზი 65).

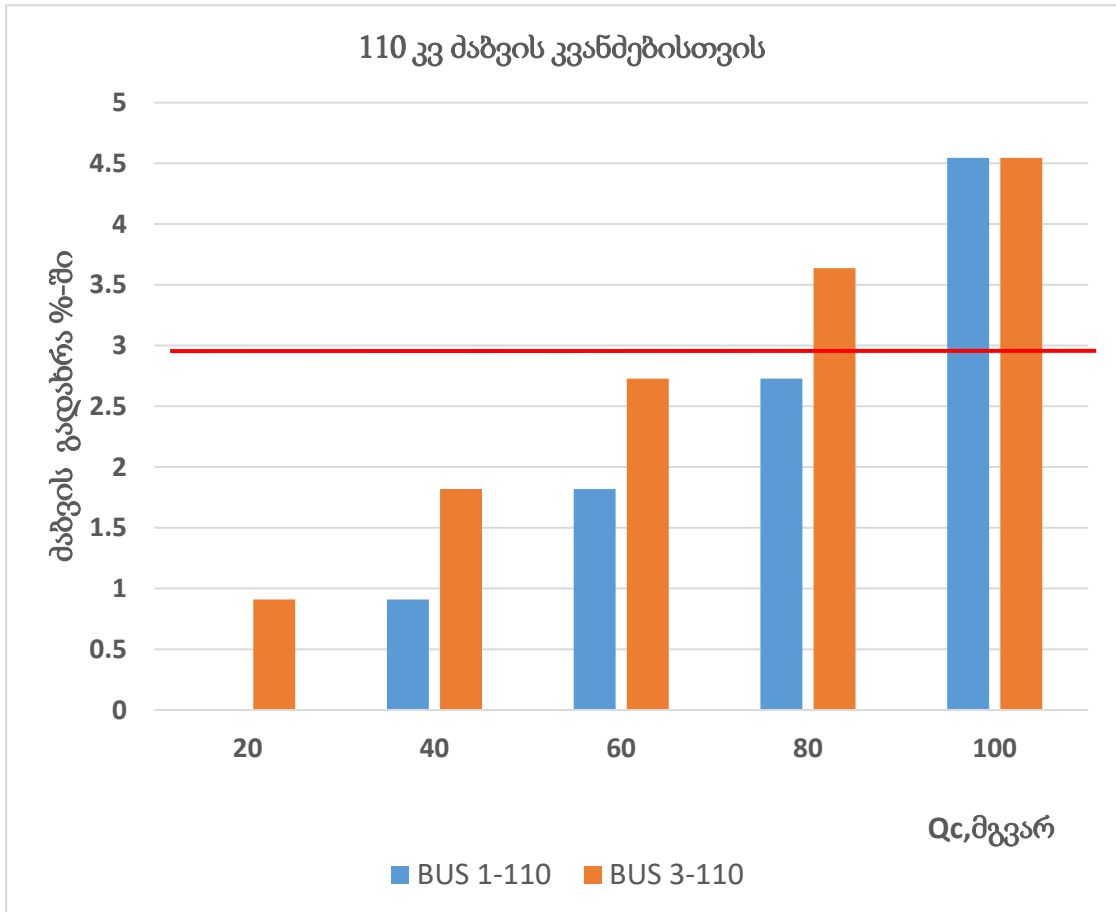
ცხრილი 5. ძაბვები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმში

დატვ.	P, მგვტ	Q, მგვარ	შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმი									
LOAD 1	50	25										
LOAD 2	90	45										
LOAD 3	80	40										
კვანძი	Qc=0 მგვარ		Qc=20 მგვარ		Qc=40 მგვარ		Qc=60 მგვარ		Qc=80 მგვარ		Qc=100 მგვარ	
	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%
BUS 1-220	208	0	210	0.91	212	1.82	214	2.73	217	4.09	219	5.00
BUS 2-220	205	0	207	0.91	209	1.82	210	2.27	212	3.18	214	4.09
BUS 3-220	208	0	210	0.91	212	1.82	214	2.73	216	3.64	218	4.55
BUS 4-220	219	0	221	0.91	224	2.27	226	3.18	228	4.09	230	5.00
BUS 1-110	104	0	104	0.00	105	0.91	106	1.82	107	2.73	109	4.55
BUS 3-110	104	0	105	0.91	106	1.82	107	2.73	108	3.64	109	4.55



ნახაზი 66. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადღის მაქსიმალურ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში

ნახაზიდან ჩანს, რომ აქაც ისევე როგორც დილის მინიმუმის რეჟიმში კვანძი “BUS 4-220” აცდა 3%-იან ზღვარს და ყველა დანარჩენ კვანძებშიც 80 და 100 მგვარ-ი რეაქტიული სიმძლავრის ინექციისას დაკვირვების კვანძში (BUS 1-220). ანალოგიური სიტუაცია გვაქვს 110 კვ ძაბვის სალტებზეც (ნახაზი 67)



ნახაზი 67. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადლის მაქსიმალურ რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

4.4. სალამოს მაქსიმუმის რეჟიმი

სალამოს მაქსიმალურ რეჟიმში ტვირთები კვანძებში მაქსიმალურადაა გაზრდი, რაც თავის მხრივ გულისხმობს, რომ რეაქტიული სიმძლავრის დინება გაიზარდა აქტიურთან ერთად. რეჟიმის გაშვება მოხდა ანალოგიურად ისევე, როგორც დანარჩენი დილის მინიმუმის და შუადლის მაქსიმუმის რეჟიმების, შედეგები შეტანილია ცხრილ 6-ში. შესაბამისად

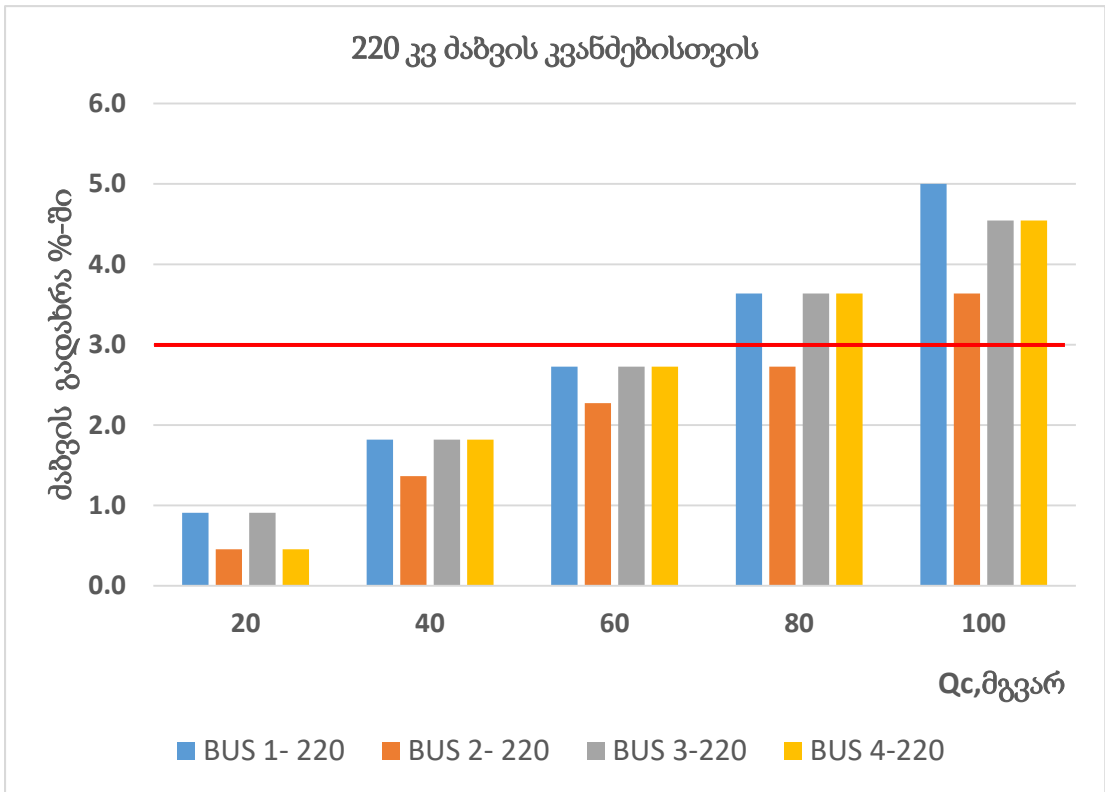
ავაგეთ 220-110 კვანძებისთვის ძაბვის გადახრის და რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის მრუდები (ნახაზი 68-69)

ცხრილი 6. ძაბვები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმში

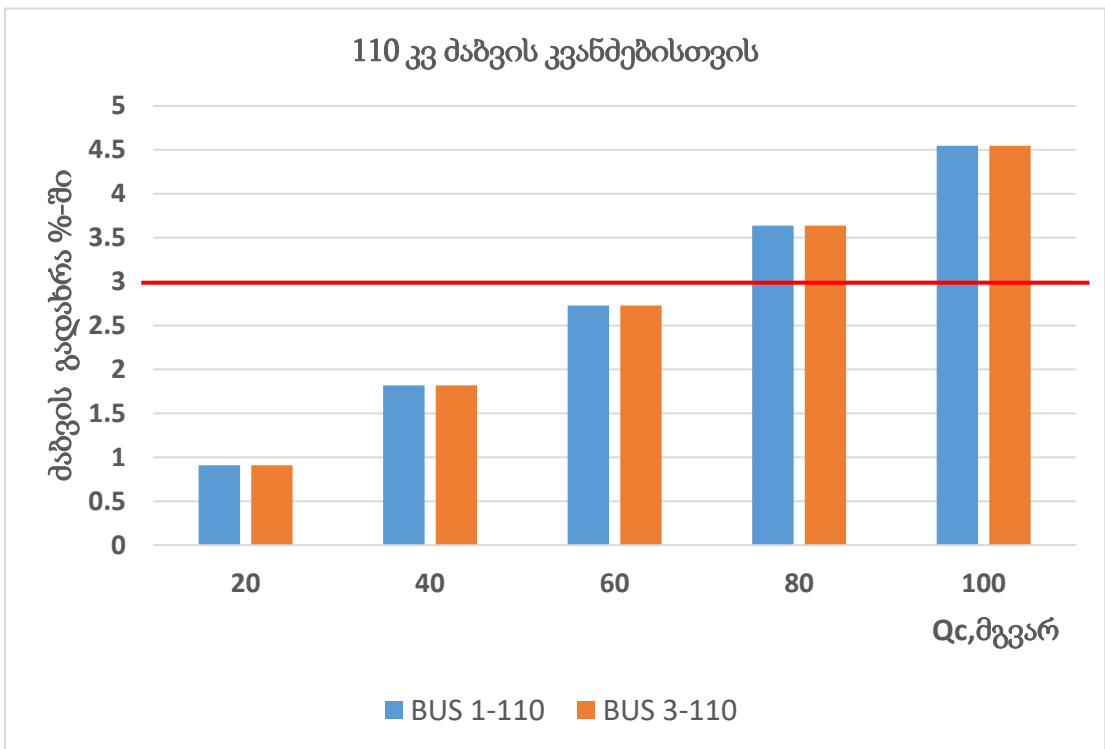
დატ.	P, მგვტ	Q, მგვარ	საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმი									
LOAD 1	70	35										
LOAD 2	110	55										
LOAD 3	100	50										
კვანძო	Qc=0 მგვარ		Qc=20 მგვარ		Qc=40 მგვარ		Qc=60 მგვარ		Qc=80 მგვარ		Qc=100 მგვარ	
	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%
BUS 1-220	203	0	205	0.91	207	1.82	209	2.73	211	3.64	214	5.00
BUS 2-220	200	0	201	0.45	203	1.36	205	2.27	206	2.73	208	3.64
BUS 3-220	203	0	205	0.91	207	1.82	209	2.73	211	3.64	213	4.55
BUS 4-220	213	0	214	0.45	217	1.82	219	2.73	221	3.64	223	4.55
BUS 1-110	100	0	101	0.91	102	1.82	103	2.73	104	3.64	105	4.55
BUS 3-110	101	0	102	0.91	103	1.82	104	2.73	105	3.64	106	4.55

ნახაზ 68-დან ჩანს, რომ წინა რეჟიმებიდან განსხვავებით აქ მხოლოდ 80-100 მგვარ-ი რეაქტიული სიმძლავრის ინექციის დროს გვაქს 3%-იანი ნიშნულის დარღვევა 220 კვ ძაბვის კვანძებში, ხოლო 110-ის მხარეს გვაქვს იგივე სურათი.

ჩატარებულმა მოდელირებამ და მისმა შედეგებმა გვიჩვენა, რომ თუ კონვერტორული ქვესადგურს გააჩნია ფიქსირებული რეაქტიული სიმძლავრის ფილტრი, ანუ ვერ ცვლის მის სიდიდეს და არაა მანევრული, ამ სიდიდის ერთიანად კომპუტაციამ შეიძლება გამოიწვიოს იმ სიდიდის ძაბვის ნახტომი, რომელიც ვერ დააკმაყოფილებს ქსელის წესებით განსაზღვრულ ნორმას. ჩვენ შემთხვევაში ეს სიდიდე 80 დან 100 მეგავარამდე იყო.



ნახაზი 68.ძაბვის გადახრის მრუდი სადამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში



ნახაზი 69.ძაბვის გადახრის მრუდი სადამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

აღნიშნულის თავიდან აცილების მიზნით უმჯობესია კონვერტორული ქვესადგურის მფლობელმა დააყენოს სხვადასხვა დისკრეტულობის მქონე ფილტრები, რადგან მოახდინოს მათი ბიჯისებური გამორთვა, რათა თავიდან აიცილოს ძაბვის მკვეთრი ნახტომი.

ზემოაღნიშნულის გათვალისწინება და სხვადასხვა სიდიდის ფილტრების დაყენება ასევე ხელს შეუწყობს გადამცემი სისტემის ოპერატორს ძაბვის რეგულირებაში, დანაკარგების შემცირებაში და ქსელის საიმედოობის გაზრდაში.

დასკვნა

1. ამომრთველის ფაზების ჩართვის დროის ცვლილებით იცვლება გადაძაბვის სიდიდეები ფაზების მიხედვით, მაგრამ საერთო სურათი უცვლელია და ჩართვის დროების ნებისმიერი კომბინაციის შემთხვევაში ხაზის ბოლოში გადაძაბვა მეტი გამოდის ვიდრე ხაზის თავში. ეს გამოწვეულია კომუტაციის შედეგად გავრცელებული ტალღის არეკვლით ხაზის ბოლოში;
2. ფაზებს შორის ასიმეტრია 1%-ს არ უნდა აღემატებოდეს, წინააღმდეგ შემთხვევაში ირღვევა ქსელის წესებით დადგენილი ნორმა;
3. კონვერტორული ქვესადგურის სიმძლავრის ზრდის პროპორციულად იზრდება მიერთების წერტილში ძაბვის ფორმის ჯამური დამახინჯება;
4. ჩვენ მიერ ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ დამოკიდებულება სიმძლავრესა და ჰარმონიკულ დამახინჯებას შორის არაწრფივია, რაც იმაში გამოიხატება, რომ სიმძლავრის ზრდასთან ერთად ადგილი აქვს დამახინჯების არაწრფივ ცვლილებას. ეს იმას ნიშნავს, რომ სხვადასხვა ჰარმონიკულ სიხშირეზე ქსელში ადგილი აქვს ჰარმონიკულ რეზონანსულ მოვლენებს;
5. აღნიშნული სცენარების განხილვა იძლევა მკაფიო წარმოდგენას თუ როგორ ცვლის ტოპოლოგიის ცვლილება ქსელის წინაღობების სპექტრულ სურათს;
6. როგორც შედეგებიდან ჩანს საკმაოდ ბევრი წერტილია სპექტრში, სადაც სისტემის იმპედანსი ძალიან მცირეა. ეს გარემოება აუცილებლად უნდა იქნას გათვალისწინებული ფილტრების შერჩევამდე;
7. ჩატარებული ანალიზიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თუ ქსელში მოხდება ისეთი ახალი ელემენტის დამატება, რომელსაც რეაქტიული ბუნება გააჩნია, აუცილებელია ქსელში არსებული ფილტრების ეფექტურობის ხელახალი შეფასებაც;
8. ჩატარებულმა მოდელირებამ და მისმა შედეგებმა გვიჩვენა, რომ თუ კონვერტორული ქვესადგურს გააჩნია ფიქსირებული რეაქტიული

სიმპლავრის ფილტრი, ანუ ვერ ცვლის მის სიდიდეს და არაა მანევრული, ამ სიდიდის ერთიანად კომპუტაციამ შეიძლება გამოიწვიოს იმ სიდიდის ძაბვის ნახტომი, რომელიც ვერ დააკმაყოფილებს ქსელის წესებით განსაზღვრულ ნორმას;

9. აღნიშნულის თავიდან აცილების მიზნით უმჯობესია კონვერტორული ქვესადგურის მფლობელმა დააყენოს სხვადასხვა დისკრეტუობის მქონე ფილტრები, რადგან მოახდინოს მათი ბიჯისებური გამორთვა, რათა თავიდან აიცილოს ძაბვის მკვეთრი ნახტომი.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. არზიანი გ., გორდიაშვილი ი. მაღალი ძაბვის ეგხ-ის კომუტაციის მოდელირება. „ენერჯია“, 2016, №4(80), გვ. 74-76.
2. არზიანი გ., გორდიაშვილი ი. ასიმეტრიული დატვირთვის გავლენა ქსელის ძაბვაზე. „ენერჯია“, 2018, №1(85), გვ. 26-29.
3. არზიანი გ., გორდიაშვილი ი. მიერთების წერტილის სიხშირული სკანირება. სტუ-ს სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 2019წ.
4. არზიანი გ. საქართველოს ენერგოსისტემის არასინუსოიდალური რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი თურქეთთან ასინქრონული კავშირის პირობებში. 2012 წ. 128 გვ.
5. საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის დადგენილება №10 „ქსელის წესები“. 2014 წ. 123 გვ.
6. არზიანი გ., გორდიაშვილი ი., ელიზარაშვილი თ. ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირება. „ინტელექტუალი“, 2019, №37.
7. Vijay K. Sood, HVDC and FACTS Controllers. "Springer", 2004, 297 p.
8. Prabha Kundur, Power System Stability and Control. "McGraw-Hill Education", 1st edition, 1994, 1200 p.
9. Paul M. Anderson, Power System Control and Stability. "Wiley-IEEE Press" 2 edition, 2003, 672 p.
10. Power Electronics Handbook, Fraidon Mazda, Newnes, An imprint of Elsevier Science, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 200 Wheeler Road, Burlington MA 0 1803, Third edition 1997; 1362 p.
11. Simulation of Wind-Power Plants combining ATP/ATPDesigner and Simplorer. Michael Igel, Stefan Winterheimer Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Germany 2007, 21 p.
12. Power quality problems and mitigation techniques. Bhim Singh, Ambrish Chandra, Kamal Al-Haddad. Wiley, 2015, 582 p.

13. Power Electronics Handbook. Muhammad H. Rashid. University of West Florida, Pensacola, Florida 2001, 892 p.
14. Modern Power System Analysis, D. P. Kothari, I. J. Nagrath, New Delhi 2009,387 p.
15. High-Voltage Direct-Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids, Dragan Jovcic, Khaled Ahmed, 2015, 456 p.
16. New in HVDC Converters. University of Manitoba, 2006, 137 p.
17. <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-converter-stations>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 04.05.2016.
18. <https://www.allaboutcircuits.com/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 23.06.2016.
19. <http://circuitglobe.com/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 10.02.2017.
20. <https://www.electrical4u.com>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 25.11.2018.
21. https://en.wikipedia.org/wiki/Total_harmonic_distortion, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 05.07.2016.