

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ირაკლი გორდიაშვილი

კონვერტორული ქვესადგურების მუშაობით გამოწვეული  
ელექტროენერჯის ხარისხის პრობლემები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

თბილისი

2019

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ასოც. პროფესორი გ. არზიანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი VIII, აუდიტორია  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

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 კომპუტაციის 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 წინაღობის 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 დამოძღვრებულია ქსელის სხვადასხვა კვანძები, რომელთაგანაც კონვერტორული ქვესადგურის მიერთება იწვევს ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების დარღვევას. ასევე კვლევის ობიექტად გამოყენებულია ქსელის ისეთი ელემენტები, რომელთა ოპერირებაც იწვევს ელ. ენერჯის ხარისხის გაუარესებას. აღნიშნული მოძღვრებები ჩატარებულია სხვადასხვა მათემატიკური მოძღვრების 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 მოძღვრების გზით პრაქტიკულად არ განხორციელებულა. რადგან აღნიშნული მოითხოვს უზარმაზარ დროს და რესურსს.

**შედეგების გამოყენების სფერო.** ნაშრომში ჩატარებული ანალიზი და მეთოდები გამაძცმემი და განაწილების სისტემის ოპერატორებს მისცემთ საშუალებას გამოიკვლიონ თავიანთი ქსელი ელ. ენერჯის 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 ენერჯის 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 ჩასადებად, დაინტერესებული მხარე სანამ გადაწყვეტს ასინქრონული ტიპის სადგურის მშენებლობას კონრეტულ 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 განხორცილება.

**ნაშრომის აპრობაცია.** ნაშრომის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილი იქნა სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტში I კოლოქვიუმზე 2018 წლის მარტში, II კოლოქვიუმზე 2018 წლის ივლისში და III კოლოქვიუმზე 2019 წლის თებერვალში; წინასწარ დაცვაზე 04.05.2019-ში და სტუ-ს სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - 2019 წელს.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო სტატია.

**ცნობები დისერტაციის მოცულობისა და სტრუქტურის შესახებ.** სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 107 გვერდს, მათ შორის 6 ცხრილს და 69 ნახაზს. იგი შეიცავს ლიტერატურის მიმოხილვას, შესავალს, ოთხ თავს, დასკვნასა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას.

## ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

### თავი 1. სქემის მოდელირება და სახასიათო სცენარების განხილვა

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.

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

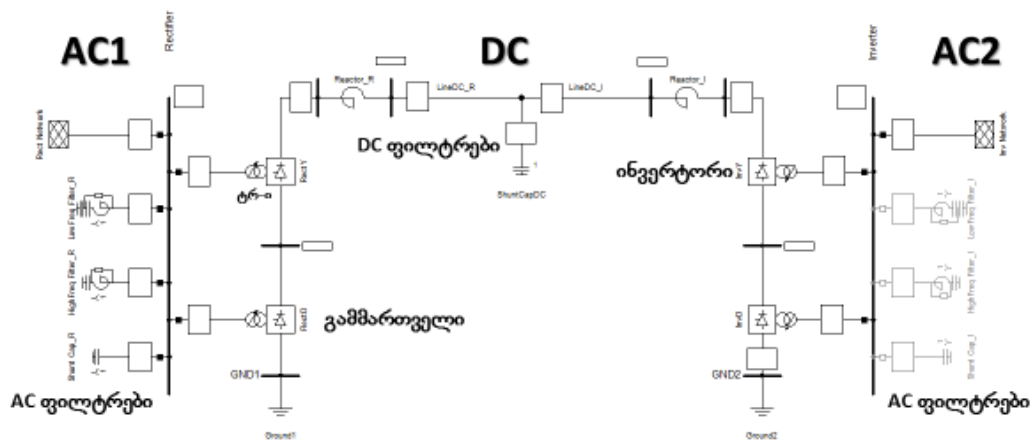
ჩვენი მიზანია გადავიღოთ ძაბვის მახასიათებლები სხვადასხვა სცენარების დროს და დავაკვირდეთ მათ, თუ როგორ გავლენას ახდენენ ქსელის ძაბვაზე.

სქემაზე (ნახ. 1) 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.

### HVDC-ის ტიპური მოდელი



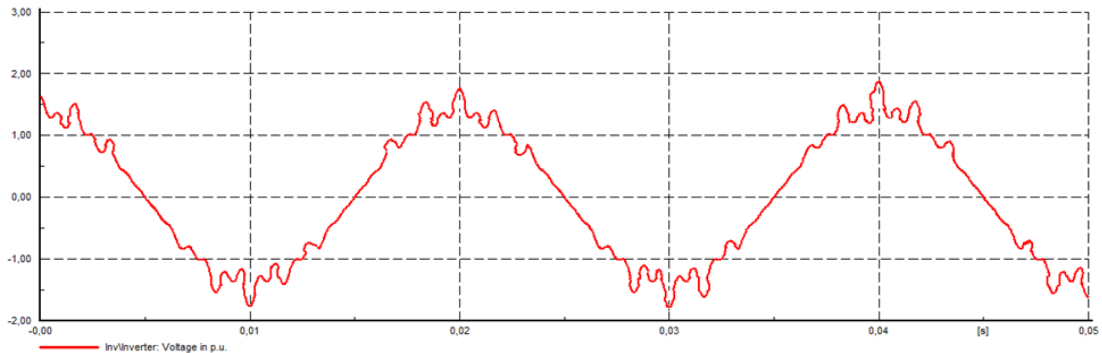
ნახაზი 1. PowerFactory-ის HVDC-ის მოდელი

მუდმივი დენის ჩანართზე გადადინება ვცვალებთ 50 მგვტ-იდან 1000 მგვტ-მდე ბიჯურად, ისე რომ არ ჩავრთეთ ცვლადი ძაბვის ფილტრები. შესაბამის სიმძლავრის სიდიდეზე გადავიღეთ ძაბვის მრუდები და ვნახეთ რომ სიმძლავრის ზრდასთან ერთად იზრდებოდა ძაბვის დამახინჯების ფორმაც. (ნახ.2)

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



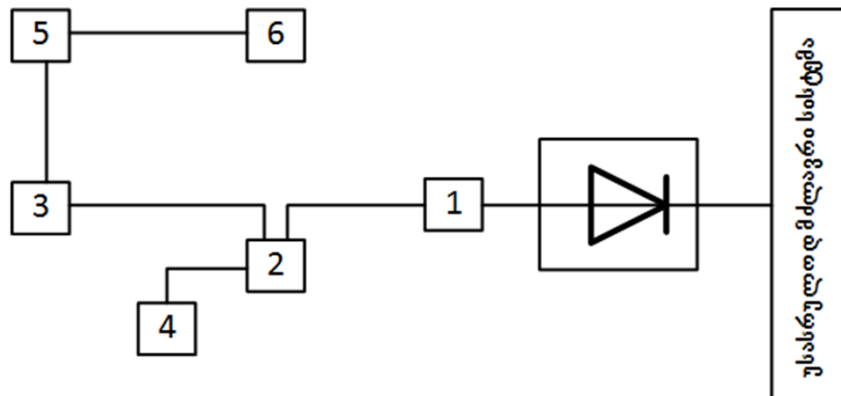
დენის მნიშვნელობების მიხედვით, შესაბამისად ქსელის გაძლიერების ან დასუსტების სცენარის სიმულაცია შესაძლებელია მიერთების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრის და დენის მნიშვნელობების ცვლილებით.



**ნახაზი 2. დამახინჯებული ძაბვის მრუდის ფორმა, ჩანართის 250 მგვტ სიმძლავრით მუშაობისას**

### თავი 2. კვანძების ძაბვების სპექტრული ანალიზი

მოდელირებისთვის გამოვიყენეთ საინჟინრო მოდელირების პროგრამა Ansoft Simplorer, სადაც შევქმენით კონკრეტული 6 კვანძიანი სქემა, რომლებიც უსასრულოდ მძლავრ სისტემას უკავშირდებიან HVDC კონვერტორული ქვესადგურის გავლით (ნახ. 3). აღნიშნული სისტემა არის 500 კვ ძაბვის და შესაბამისად სქემის ელემენტებში შეტანილია შესაბამისი პარამეტრები.



**ნახაზი 3. Ansoft Simplorer-ში მოდელირებული 6 კვანძიანი სქემა**

როგორც ნახ.3-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.

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,

$U_{\gamma}^2$  – Y 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.

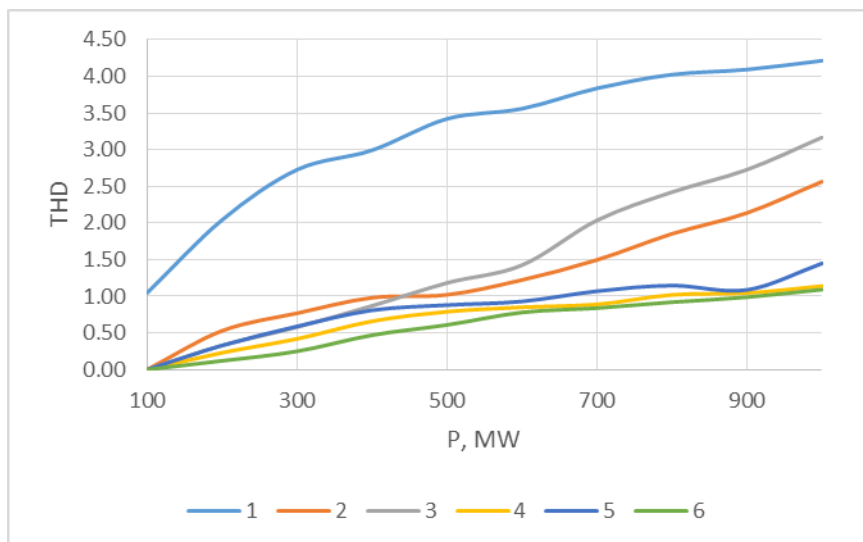
ზემოთ აღნიშნული ანალიზების შედეგები შევიტანეთ ცხრილი 1 და ცხრილი 2-ში.

**ცხრილი 1. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთულია ცვლადი ძაბვის ფილტერები**

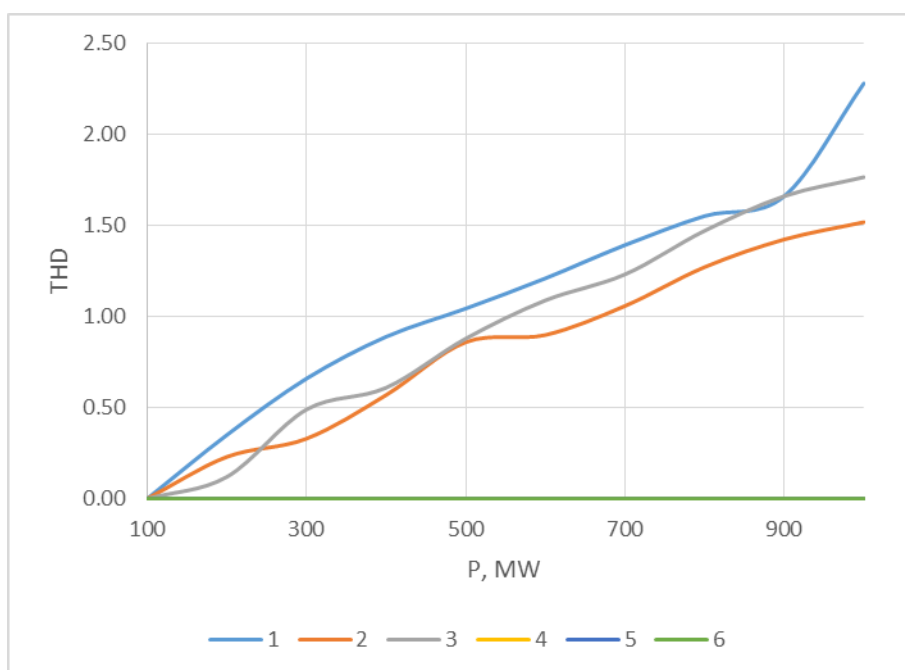
P, მგვტ	ჯამური დამახინჯება %-ებში კვანძების მიხედვით					
	1	2	3	4	5	6
100	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	2,04	0,53	0,33	0,23	0,33	0,12
300	2,73	0,77	0,58	0,42	0,59	0,25
400	2,99	0,98	0,87	0,66	0,81	0,47
500	3,42	1,02	1,18	0,79	0,88	0,61
600	3,56	1,22	1,43	0,85	0,93	0,78
700	3,84	1,50	2,04	0,89	1,07	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 2. THD კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართულია ცვლადი ძაბვის ფილტერები**

P, მგვტ	ჯამური დამახინჯება %-ებში კვანძების მიხედვით					
	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 4. სიმძლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც გამორთული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები



ნახაზი 5. სიმძლავრის და THD-ს დამოკიდებულება კვანძების მიხედვით, როდესაც ჩართული იყო ცვლადი ძაბვის ფილტრები

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.

### თავი 3. ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირება

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 T-ებრის სქემით იმპულსური და რეზონანსული პროცესების მოდელირებისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას მისი პარაზიტული პარამეტრებიც, როგორცაა მაგალითად პარაზიტული

ტევადობები გრაგნილებს შორის და გრაგნილებს და კორპუს შორის.

ნაკადგანაწილების მოდელირებისას როგორც წესი ძალოვანი ელექტრონიკის, მაგალითად კონვერტორული ქვესადგურის წარმოდგენა ხდება ასევე გამარტივებული გზით და ის ჩანაცვლება 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

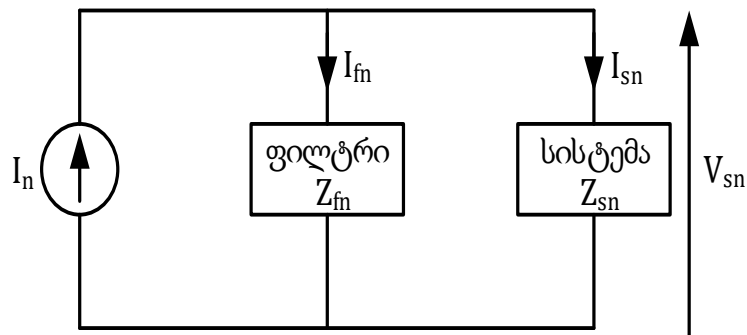
იმ რეაქციის გაძლიერებას ან შესუსტებას, რომელიც გააჩნდა ელემენტს სიხშირის შეცვლამდე. შესაბამისად სიხშირული სპექტრის განხილვისას ბუნებრივია, რომ მიუღებელი იქნება ფილტრების წარმოდგენა მხოლოდ ინდუქციურობით, ან მხოლოდ ტევადობით, როგორც ამას ვაკეთებდით სისტემის ნომინალურ სიხშირეზე.

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.

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. დაუშვათ, 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 6-ზე.



ნახაზი 6. სისტემის წინააღმდეგობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა

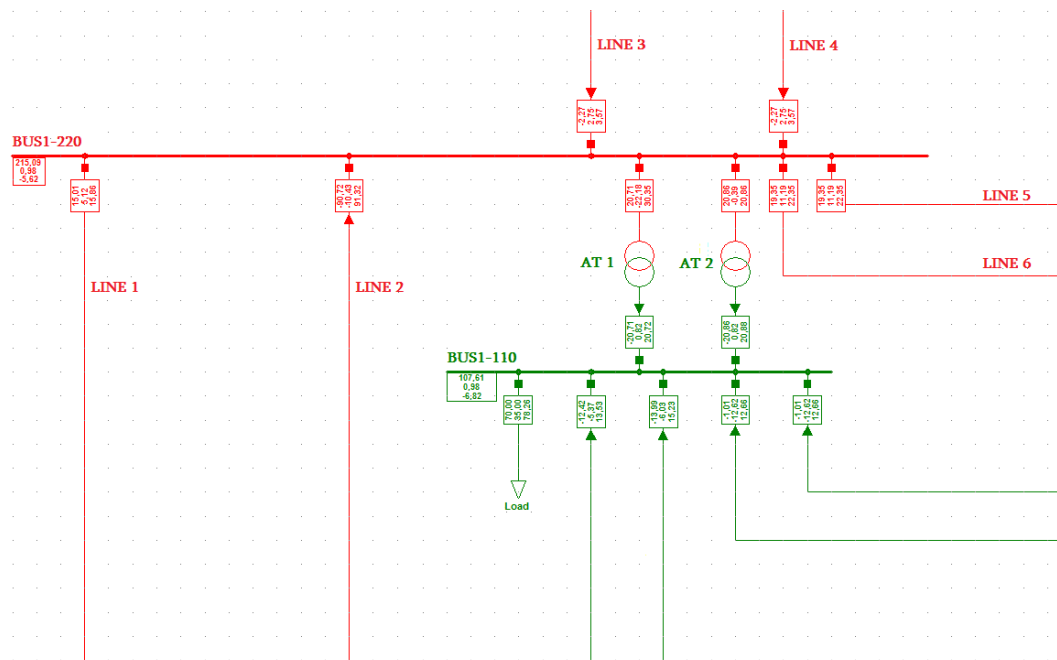


მაზვის და დენის დამახინჯებები თითოეული ჰარმონიკისთვის შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი გამოსახულებიდან:

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

ნახაზიდან და ფორმულებიდან ცალსახად ჩანს, რომ თუ კონკრეტულ ჰარმონიკულ სიხშირეზე სისტემის წინაღობა უფრო ნაკლები იქნება ვიდრე ფილტრის წინაღობა ამავე სიხშირეზე, მაშინ აღნიშნული ჰარმონიკა უფრო მარტივ გზას გამონახავს სისტემისკენ, არ გაივლის ფილტრში და ქსელში შესვლით გამოიწვევს ჰარმონიკული დამახინჯების გაზრდას. აქედან გამომდინარე, ფილტრის დიზაინის შერჩევისას აუცილებელია შეფასდეს მიერთების წერტილში ქსელის წინაღობები იმ სიხშირეებზე, რომელსაც გენერირებს ჰარმონიკული წყარო. მხოლოდ ამის შემდეგ აქვს აზრი ზოგადად ფილტრების შერჩევას საუბარს. აქვე უნდა ითქვას, რომ სხვა წერტილში მიერთებისას ქსელის ჰარმონიკული წინაღობების 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 წინაღობების 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 წინაღობის სტატუსის ცვლილებას. ამ ნაშრომის მიზანიც სწორედ ტოპოლოგიის გავლენის შესწავლაა კვანძის სპექტრულ სურათზე. 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. 9). 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.

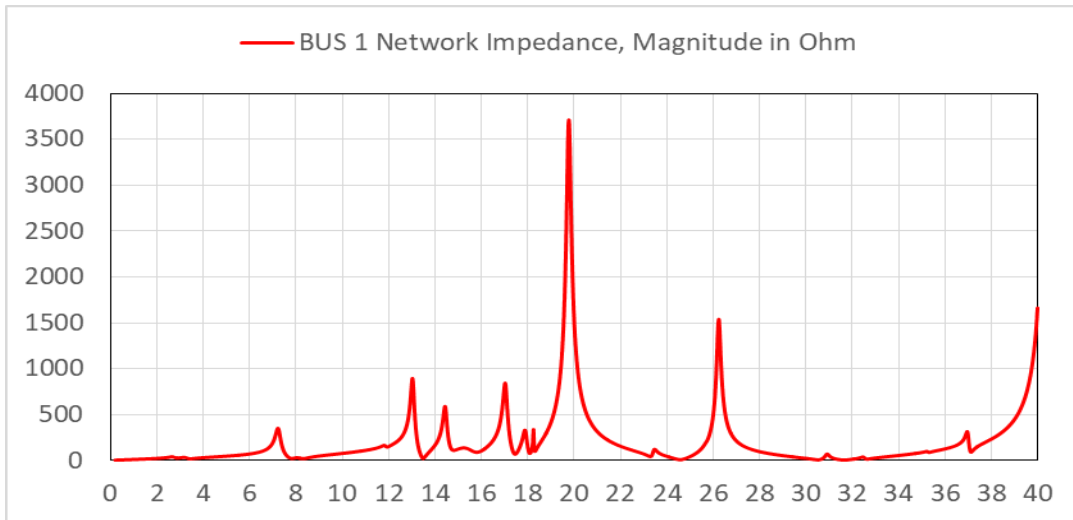


ნახაზი 7. მოდელირებული ქვესადგურის სქემა, სადაც ხდება დაკვირვება

როგორც ზემოთ ითქვა ამ კვლევის მიზანია მიერთების წერტილში დავადგინოთ ქსელის წინაღობების 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 და ქსელზე დაკვირვება. 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.

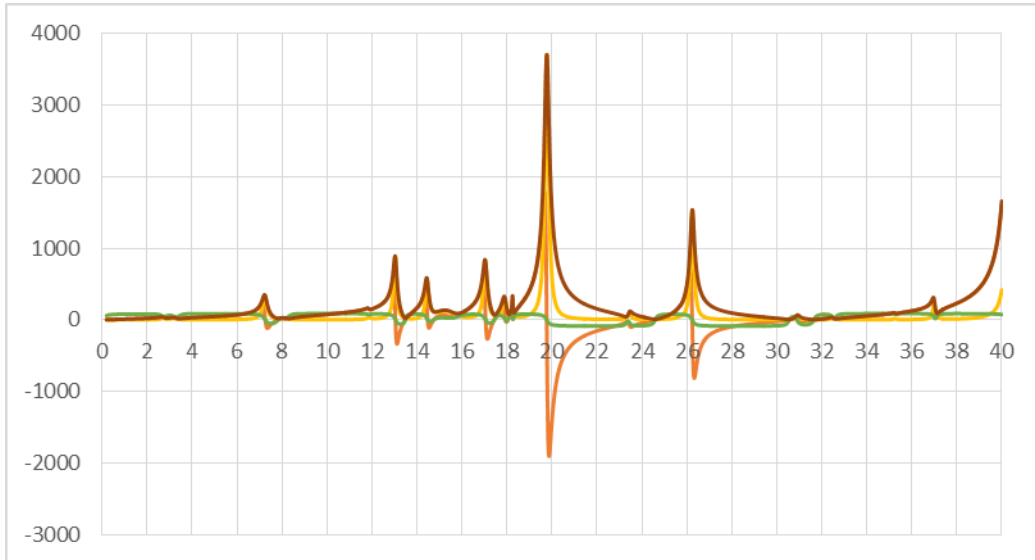
**1. BUS 1 –ზე მიერთებული ყველა ელემენტი ჩართულია**



**ნახაზი 8. ყველა ელემენტი ჩართულია**

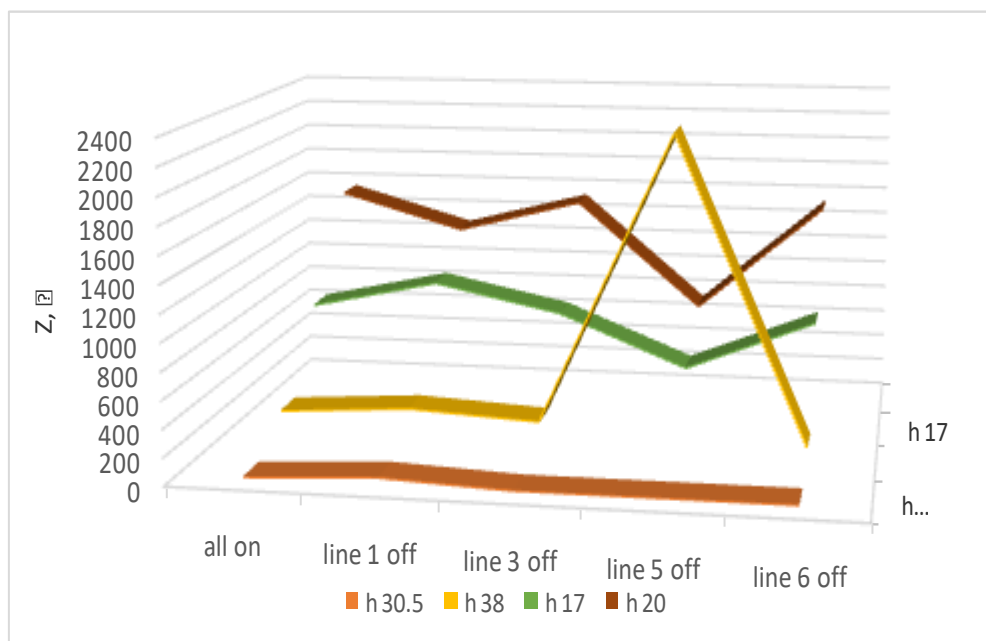
ნახ.8-ზე ნაჩვენებია BUS 1 კვანძში ქსელის სრული წინაღობა სცენარისთვის, როდესაც ყველა ელემენტი ჩართულია. დიაგრამიდან ჩანს რომ ქსელის წინაღობა საგრძნობლად მცირდება მე-3, მე-8, მე-13, 25-ე, 31-ე და 32-ე ჰარმონიკული სიხშირეების მახლობლობაში. ამის გამომწვევი მიზეზი არის რეზონანსული მოვლენები აღნიშნულ სიხშირეებზე.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

ნახაზ 9-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.



ნახაზი 9. ყველა ელემენტი ჩართულია

ნახაზ 10-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 10. 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, აცილებელია ქსელში არსებული ფილტრების ეფექტურობის ხელახალი შეფასებაც.

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

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

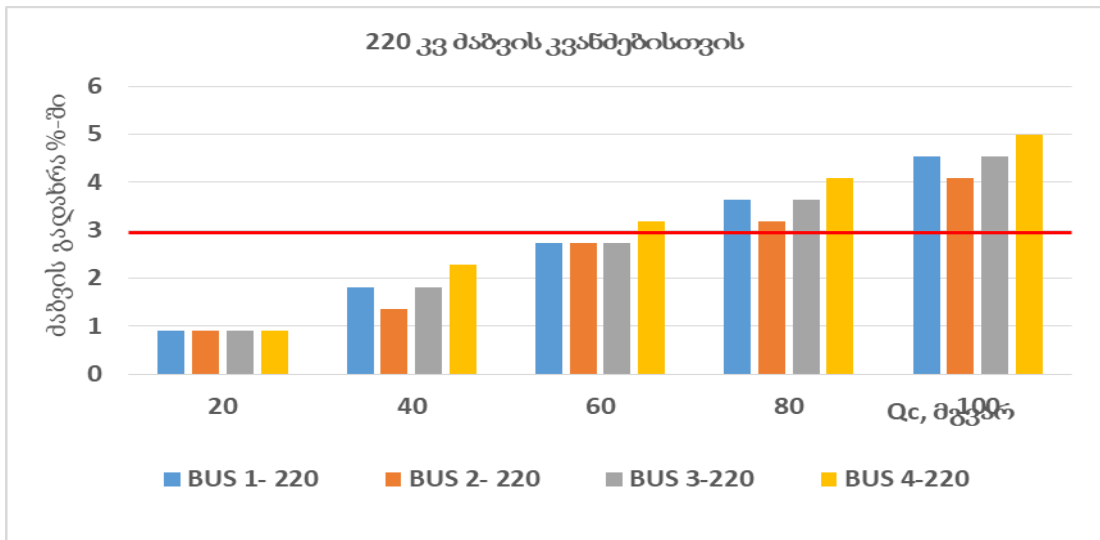
მოდელირებისთვის გამოვიყენეთ პროგრამა PowerFactory-ი რომელშიც გვაქვს დამოდელირებული ელექტროგადაცემის ქსელი. დაკვირვებისთვის ავიღეთ 3 განსხვავებული რეჟიმი, ესებია: დილის მინიმუმის რეჟიმი, შუადღის და საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმები. ამ რეჟიმებში მოვახდინეთ შუნტური კონდენსატორის სხვადასხვა დისკრეტულობით ჩართვა, რომლის დიაპაზონიც იყო 0-დან 100 მეგავარამდე და დავაკვირდით ძაბვის ნახტომებს ზემოდ აღნიშნულ კვანძებში. მიღებული შედეგები შევიტანეთ ცხრილებში და ავაგეთ შესაბამისი მრუდები.

**ცხრილი 3. 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	
	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%
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 3-ში მოცემულია მინიმალური რეჟიმს დროს დატვირთვები, ასევე დასაკვირვებელი კვანძების მიხედვით მათი საწყისი ძაბვები, რომელებიც შეესაბამება ძაბვის გადახრის 0%-იან მნიშვნელობას, ხოლო შუნტური

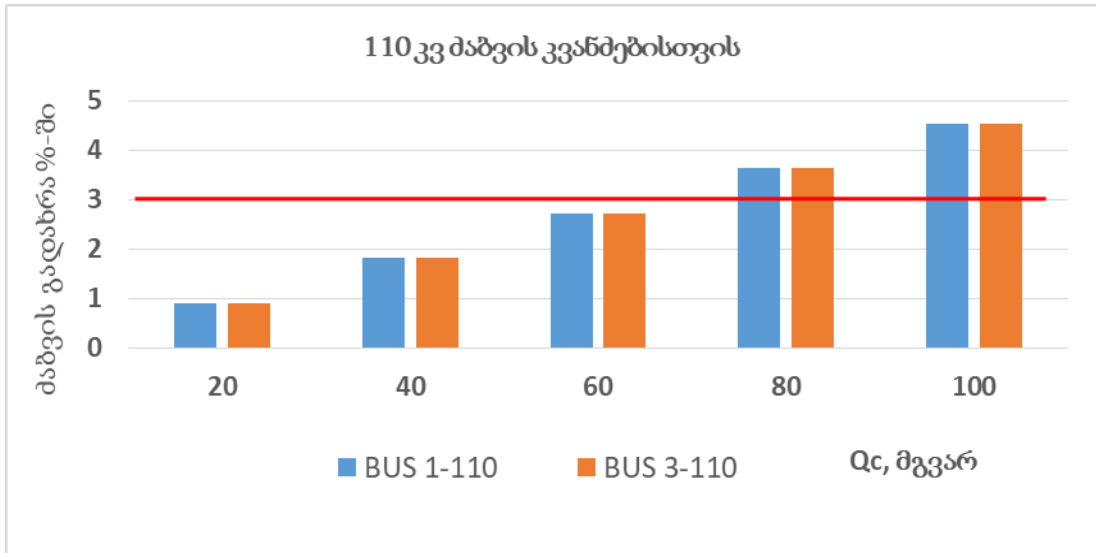
კონდესატორის სხვადასხვა დისკრეტულობაზე კომუტაციისას ეს პროცენტები იზრდება. მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით ავაგეთ მრუდი (ნახაზი 11), სადაც Y ღერძზე გადაზომილია ძაბვის გადახრა პროცენტებში, ხოლო X ღერძზე გადაზომილია შუნტური კონდესატორის სხვადასხვა დისკრეტულობა მეგავარებში.



**ნახაზი 11. ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში**

როგორც ნახ.11-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 12-დან ჩანს ნომინალური ძაბვის 3%-ით გადახრა დაფიქსირდა მხოლოდ 80-100 მეგავარი რეაქტიული სიმძლავრის კომუტაციისას.

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 11) და 110 კვ ძაბვის კვანძებისთვის (ნახაზი 12).



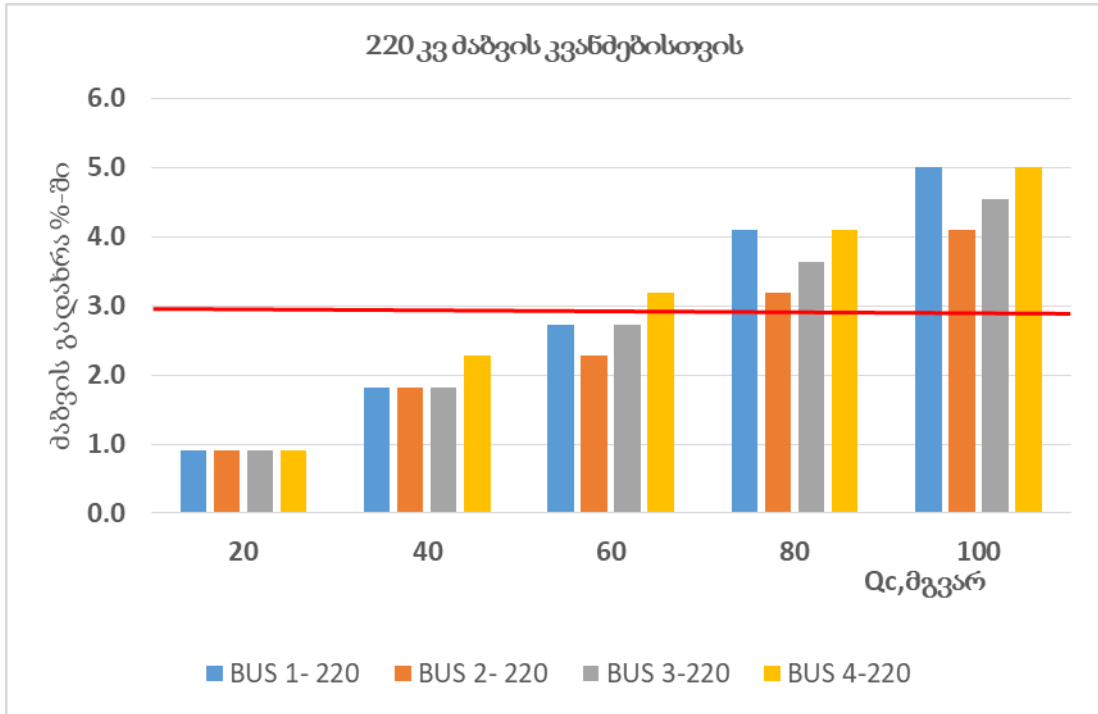
ნახაზი 12. ძაბვის გადახრის მრუდი დილის მინიმუმის რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

ცხრილი 4. 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

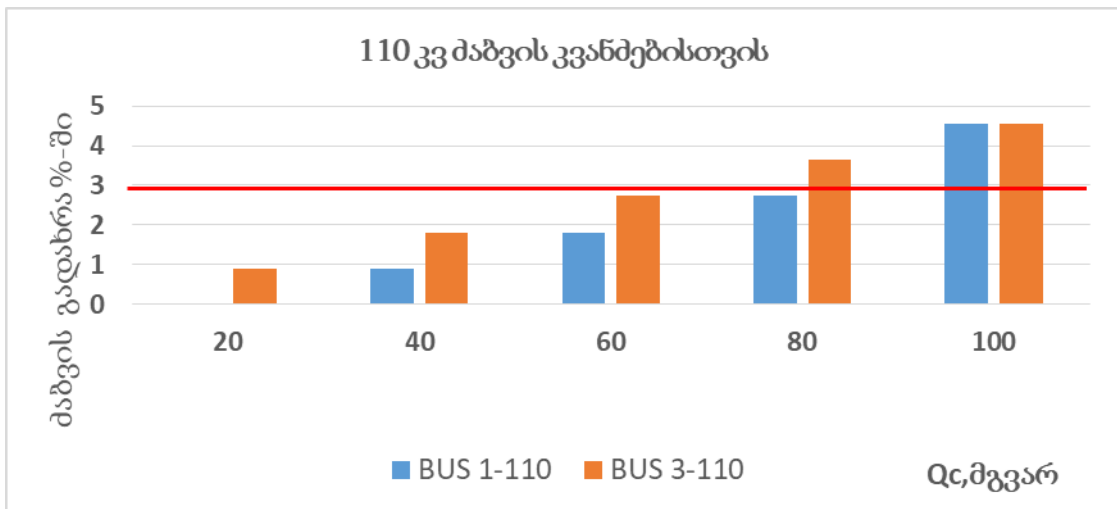
ნახაზიდან ჩანს, რომ აქაც ისევე როგორც დილის მინიმუმის რეჟიმში კვანძი “BUS 4-220” აცდა 3%-იან ზღვარს და ყველა დანარჩენ კვანძებშიც 80 და 100 მგვარ-ი რეაქტიული სიმძლავრის ინექციისას დაკვირვების კვანძში (BUS 1-220). ანალოგიური სიტუაცია გვაქვს 110 კვ ძაბვის სალტებზეც (ნახაზი 14).





ნახაზი 13. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადღის მაქსიმალურ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში

საღამოს მაქსიმალურ რეჟიმში ტვირთები კვანძებში მაქსიმალურადაა გაზრდილი, რაც თავის მხრივ გულისხმობს, რომ რეაქტიული სიმძლავრის დინება გაიზარდა აქტიურთან ერთად. რეჟიმის გაშვება მოხდა ანალოგიურად ისევე, როგორც დანარჩენი დილის მინიმუმის და შუადღის მაქსიმუმის რეჟიმების, შედეგები შეტანილია ცხრილ 5-ში.



ნახაზი 14. ძაბვის გადახრის მრუდი შუადღის მაქსიმალურ რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

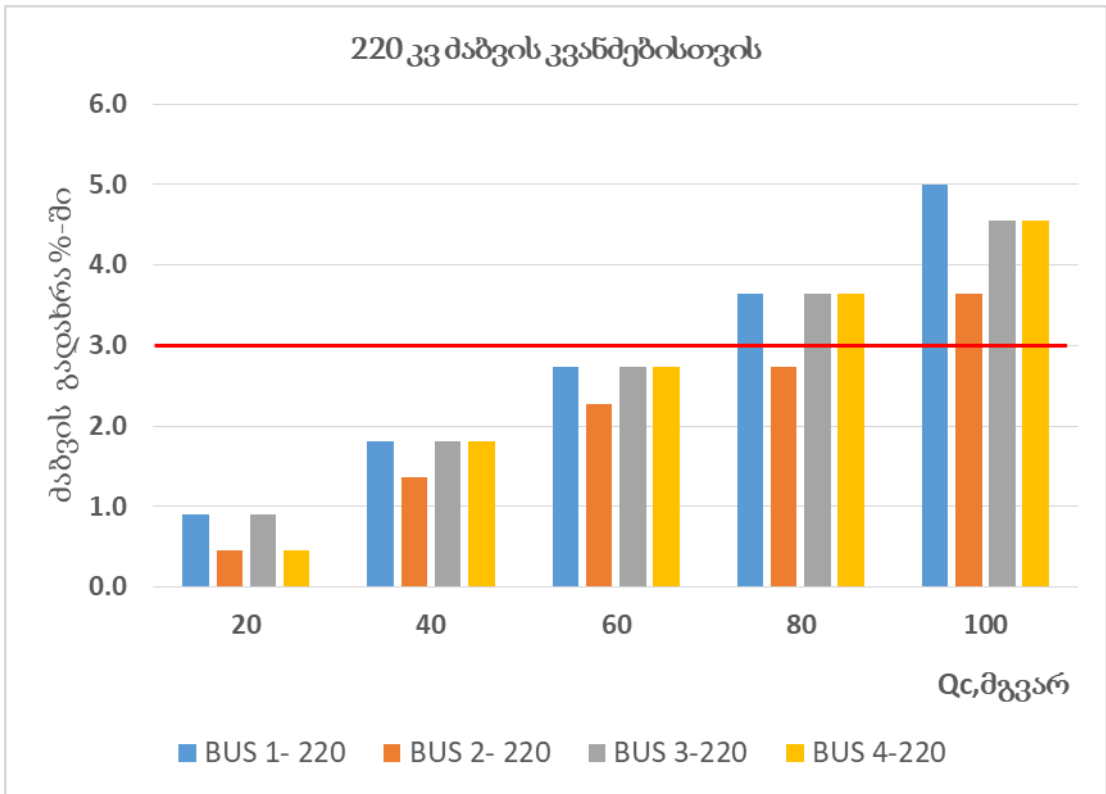
შესაბამისად ავაგეთ 220-110 კვანძებისთვის ძაბვის გადახრის და რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის მრუდები (ნახაზი 15-16)

**ცხრილი 5. ძაბვები და დატვირთვები კვანძების მიხედვით დილის საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმში**

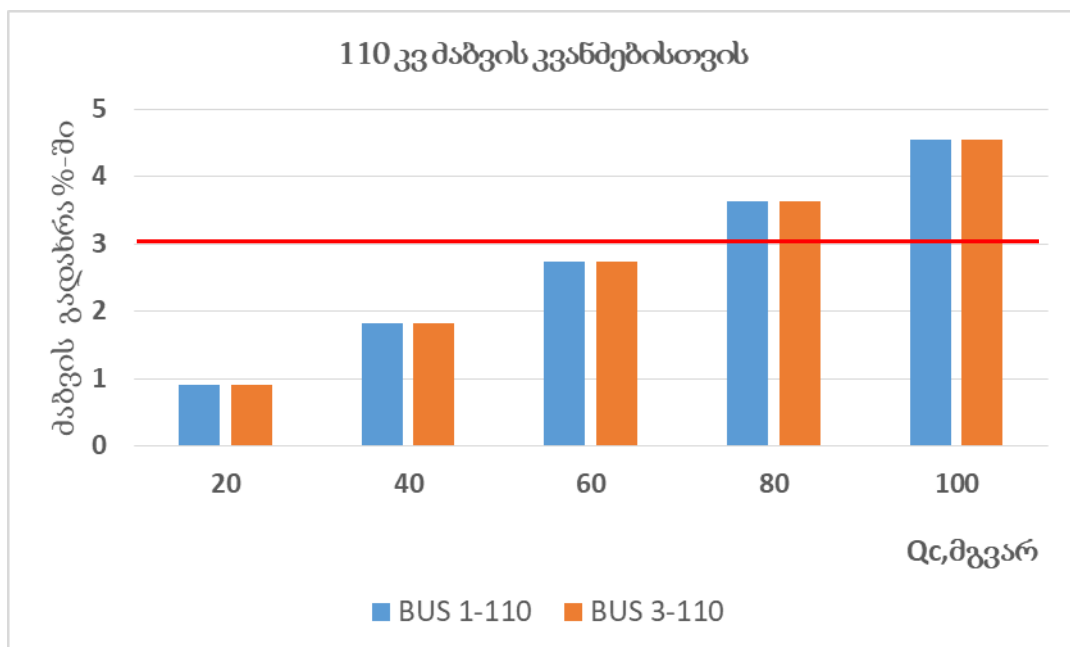
დატ.	P, მგვტ	Q მგვარ	საღამოს მაქსიმუმის რეჟიმი									
LOAD 1	70	35										
LOAD 2	110	55										
LOAD 3	100	50										
კვანძი	Qc=0 მგვარ		Qc=20 მგვარ		Qc=40 მგვარ		Qc=60 მგვარ		Qc=80 მგვარ		Qc=100 მგვარ	
	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%	ძაბვა	%
BUS 1-220	203	0	205	0.91	207	1.82	209	2.73	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 15-დან ჩანს, რომ წინა რეჟიმებიდან განსხვავებით აქ მხოლოდ 80-100 მგვარ-ი რეაქტიული სიმძლავრის ინექციის დროს გვაქვს 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 კომუტაციამ შეიძლება გამოიწვიოს იმ სიდიდის ძაბვის ნახტომი, რომელიც ვერ დააკმაყოფილებს ქსელის წესებით განსაზღვრულ ნორმას. ჩვენ შემთხვევაში ეს სიდიდე 80 დან 100 მეგავარამდე იყო.



ნახაზი 15. ძაბვის გადახრის მრუდი საღამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის კვანძებში



ნახაზი 16. ძაბვის გადახრის მრუდი საღამოს მაქსიმალურ რეჟიმში 110 კვ ძაბვის კვანძებში

## 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 სიმძლავრის ფილტრი, ანუ ვერ ცვლის მის სიდიდეს და არაა მანევრული, ამ სიდიდის ერთიანად კომუტაციამ 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.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

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., ელიზარაშვილი თ. ქსელის კვანძების სიხშირული სკანირება. „ინტელექტუალი“, 2019, №37.

## 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.