

გიორგი არზიანი

საქართველოს ენერგოსისტემის
არასინუსოიდალური რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი
თურქეთთან ასინქრონული კავშირის პირობებში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივნისი, 2012

საავტორო უფლება © 2012
გიორგი არზიანი 2012

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი არზიანის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “საქართველოს ენერგოსისტემის არასინუსოიდალური რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი თურქეთთან ასინქრონული კავშირის პირობებში” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: გურამ მახარაძე

რეცენზენტი: გურამ დგებუაძე

რეცენზენტი: ჯემალ ბეჟანიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012

ავტორი: გიორგი არზიანი

დასახელება: "საქართველოს ენერჯოსისტემის
არასინუსოიდალური რეჟიმების გამოკვლევა და
ანალიზი თურქეთთან ასინქრონული კავშირის
პირობებში"

ფაკულტეტი : ენერჯეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

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 დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

ნაშრომი ეძღვნება ლარბი კასრადის ნათელ სსოვნას

რეზიუმე

საქართველოს ელექტროსისტემის პერსპექტიული განვითარების გეგმის შესაბამისად უახლოეს მომავალში განხორციელდება თურქეთში ასეულობით მგვტ სიმძლავრის ექსპორტი. ამასთან, საქართველოსა და თურქეთის ელექტროსისტემები ერთმანეთს დაუკავშირდებიან ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართების საშუალებით. პირველ ეტაპზე მოხდება 700 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტი ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართიდან, ხოლო მოგვიანებით ექსპლუატაციაში შევა 350 მგვტ დადგმული სიმძლავრის მქონე ბათუმის მუდმივი დენის ჩანართი.

ასეთი კავშირი, როგორც საქართველოს, ისე თურქეთის ელექტროსისტემებში იწვევს დაბვის ფორმის დამახინჯებას, რამდენადაც კონვერტორული ბლოკები წარმოადგენენ არანაფიქსირებელ მდგომარეობებს. დაბვის დამახინჯება თავის მხრივ ორივე სისტემაში ქმნის რიგ პრობლემებს (ელენერჯის ხარისხის გაუარესება, გენერატორების და ტრანსფორმატორების დამატებითი გახურება, იზოლაციის ნაადრევი დაზიანება, გაზრდილი დანაკარგები და ა.შ.) და აუცილებელია შეფასდეს არასინუსოიდურობის ხარისხი და საჭიროების შემთხვევაში გატარდეს შესაბამისი ღონისძიებები.

ნაშრომში ჩატარებულია ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს ელექტროსისტემისთვის ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით 700 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტის პირობებში. ჰარმონიკული ანალიზისთვის შექმნილია საქართველოს ელექტროსისტემის მაღალი დაბვის ქსელისა და მუდმივი დენის ჩანართის მათემატიკური მოდელები. ძირითადი გაანგარიშებისათვის გამოყენებულია ელექტრომაგნიტური პროცესების საანგარიშო კომპიუტერული პროგრამა "Asnsoft Simplorer".

ნაშრომის პირველ თავში განხილულია HVDC ტექნოლოგია, კონვერტორების კლასიფიკაცია, მათი გამოყენების სფერო და დადებითი და უარყოფითი მხარეები. შედარებულია ახალციხის კლასიკური მუდმივი დენის ჩანართი და HVDC light სისტემა. ზოგადად არის ასევე განხილული HVDC სისტემით განპირობებული ეკოლოგიური ფაქტორები.

მეორე თავში განხილულია მუდმივი დენის ჩანართის შემადგენელი ძირითადი ძალური ელემენტები. აღწერილია 12-პულსიანი ვენტილური სქემა და მის მიერ გენერირებული ჰარმონიკული სპექტრი. მოყვანილია მუდმივი დენის ჩანართის ტირისტორული მოდული და მისი დამხმარე წრედების პრინციპიალური სქემა. აღწერილია კონვერტორული ქვესადგურის ტიპური სქემის მნიშვნელოვანი კვანძები.

ახალციხის ქვესადგურის კლასიკურ HVDC სისტემაში გამართვისა და ინვერტირების პროცესები შესრულებულია ქსელის დაბვით, ანუ ბუნებრივი კომუტაციის პირობებში, რაც იმას ნიშნავს, რომ ვენტილის ჩასაკეტად გამოყენებულია ქსელის დაბვა. ასეთი კომუტაციისას ცვლადი დაბვები, როგორც გამმართველის, ისე ინვერტორის მხარეს უზრუნველყოფილი უნდა იყოს ელექტრული ქსელის მიერ. სისტემის ნორმალური მუშაობისათვის აუცილებელია დასული იყოს სამი ფაზის სიმეტრია და სინუსოიდურობა.

ამავე თავში ახსნილია მოკლე შერთვის სიმძლავრის ინდექსის მნიშვნელობა ელექტროსისტემებისთვის. საქართველოს ელექტროსისტემა ასეთი კლასიფიკაციით მიეკუთვნება მძლავრი სისტემების ჯგუფს, რადგან საშუალოდ თითქმის ყველა პერსპექტიულ რეჟიმში ESCR კოეფიციენტი 3-ზე მეტია. განხილულია, ასევე, მუდმივი დენის ჩანართის ძირითადი მახასიათებლები და აღწერილია სპეციალური დანიშნულების რამდენიმე კონტროლი, რომელთაც განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვთ საქართველოს ელექტროსისტემისთვის კონვერტორული ქვესადგურით მუშაობის პირობებში.

მესამე თავში ჩატარებულია მუდმივი დენის ჩანართის მათემატიკური მოდელირება. ნაჩვენებია და დეტალურად არის აღწერილი მუდმივი დენის ჩანართის გამართვებული კომპიუტერული მოდელის სქემა. კონვერტორის მკვებავი ტრანსფორმატორები წარმოდგენილია “Asnsoft Simplorer”-ის სპეციალური, მძლავრი ტრანსფორმატორული მოდელებით.

საწყისი მოდელირების რეზულტატის სახით ნაჩვენებია გამართული მუდმივი ძაბვის, დატვირთვის დენის, ქსელიდან მოთხოვნილი დენის და მკვებავი სისტემის ძაბვების მრუდები. გამოთვლილია ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტები კონვერტორის მკვებავი ცვლადი ძაბვის სალტებზე და გამოკვლეულია არასინუსოიდურობის ხარისხი ჩანართით გადასაცემ სიმძლავრესთან დამოკიდებულებაში ქსელის პარამეტრების გათვალისწინების გარეშე.

მეოთხე თავში “Asnsoft Simplorer”-ში მოდელირებულია გადაცემის ქსელი და გამოკვლეულია მისი გავლენა ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების სიდიდეზე. მოყვანილია საქართველოს მაღალი ძაბვის ქსელის სხვადასხვა კვანძში ძაბვების ჰარმონიკული დამახინჯების სურათები მუდმივი დენის ჩანართის 700 მგვტ-ით დატვირთვისას. ნაჩვენებია ჰარმონიკული მდგენელების ცხრილი, რომელიც შეიცავს თითქმის ყველა არსებულ და პერსპექტიულ 500 კვ ძაბვის კვანძებს.

ამავე თავში ჩატარებულია ენერგოსისტემის ჰარმონიკული ანალიზი n-1 რეჟიმში. განხილულია შემთხვევა როდესაც ხდება ეგზ “ზესტაფონი – ახალციხის” გამორთვა. n-1 რეჟიმში მიღებული რეზულტატი განსხვავდება ნორმალური რეჟიმის შედეგებისგან და სიტუაცია გარკვეულწილად დამძიმებულია, რადგან ასეთ დროს ხდება მუდმივი დენის ჩანართის მკვებავი ელექტროგადაცემის ხაზების ეკვივალენტური წინააღობის გაზრდა, რაც თავის მხრივ იწვევს ჰარმონიკული ძაბვის ვარდნების გაზრდასაც. ეს უკანასკნელი კი აისახება ჰარმონიკული დამახინჯების დონის აწევაში.

გამოკვლეულია ძაბვის და დენის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება ჩანართით გადასაცემ სიმძლავრეზე ქსელის პარამეტრების გათვალისწინებით. ცალკეა ნაჩვენები ამ დამოკიდებულების მრუდები ენგურის და გარდაბანის 500 კვ ძაბვის კვანძებისთვის. ჩანართისაგან ელექტრულად დაშორებულ კვანძებში ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების ცვლილების კანონზომიერებაში რაიმე განსაკუთრებული განსხვავება არ შეიმჩნევა.

ამავე თავში ჩატარებულია არაკანონიკური ჰარმონიკების ერთერთი გამომწვევი მიზეზის მოდელირება და ანალიზი. მოდელირებისთვის გამოყენებულია ორი კომპიუტერული პროგრამა: “PSS/E” და “Ansoft

simplorer”. ნაჩვენებია ქსელის სიხშირის, ახალციხის 500 კვანძის დაბვის, კონვერტორის მუდმივი დაბვის, მუდმივი დენის და სხვა მრუდები. მკვებავი სისტემის ცვლადი დაბვის ჰარმონიკულ სურათში მკაფიოდ ჩანს, თუ როგორ იცვლება ჰარმონიკული სპექტრი კონვერტორის ნორმალურიდან ავარიულ რეჟიმში გადასვლისას.

ნაშრომის ბოლო, მეხუთე თავი მოიცავს საქართველოს ელექტროსისტემაში ჩანართის მიერ გენერირებული ჰარმონიკების ფილტრაციის ღონისძიებებს, კერძოდ კი ცვლადი დაბვის ჰარმონიკული ფილტრების შერჩევის საკითხებს. განხილულია ფილტრების შერჩევის ლოგიკა. აღწერილია წინააღმდეგობის წრის და პოლიგონის მეთოდები. ხაზგასმითაა აღნიშნული წინააღმდეგობის წრის მეთოდის ძირითადი ნაკლოვანება. პოლიგონის მეთოდით და კომპიუტერული მაქსიმიზაციის გამოყენებით შერჩეულია შედგენილი ცვლადი დაბვის ფილტრების რამდენიმე პარალელური შტო. მოცემულია აღნიშნული ფილტრების სქემები და სიხშირული მახასიათებლები. შერჩეული ფილტრები სრულად უზრუნველყოფენ მუდმივი დენის ჩანართს მისთვის აუცილებელი რეაქტიული სიმძლავრით.

საქართველოს ელექტროსისტემისთვის ჩატარებულია განმეორებითი ჰარმონიკული გაანგარიშებები ფილტრების გათვალისწინებით, როგორც ნორმალურ, ასევე $n-1$ რეჟიმებში. ორივე რეჟიმში ფილტრების ინსტალაციის შემდეგ ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონე პრაქტიკულად ყველა კვანძში დასაშვებ სიდიდეს არ აღემატება.

ნაშრომის დასასრულს გამოკვლეულია ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება მუდმივი დენის ჩანართის დატვირთვაზე ფილტრების გათვალისწინებით და გაკეთებულია შესაბამისი დასკვნები.

Abstract

In a nearest future Georgian and Turkish power systems will be connected to each other in parallel asynchronous operation through the b2b station. On a first step Georgia will export 700 MW power through Akhaltsikhe b2b station and a bit later 300 MW through Batumi b2b station.

Such connection will create high frequency harmonics in both of power systems, which causes sinusoidal voltage waveform distortion. The main reason of such distortion is a nonsinusoidal characteristic of a load of the converter blocks. Voltage distortion creates several problems in both of power systems (worsening of power quality, additional heating of generators and transformers, increased losses in power system elements, earlier crocking of insulation and etc.) and it's necessary to estimate the rate of nonsinusoidality and in case of inevitability to provide appropriate activities.

In the work is carried out harmonic analysis for Georgian power system in case when Georgia in asynchronous operation exports 700 MW power to Turkey via Akhaltsikhe b2b station. For harmonic analysis the mathematical models of high voltage grid and of b2b station are created. Modeling and most of Simulations are realized in the "Ansoft simplorer" program.

The work contains five chapters. It consists of introduction, experimental part, analytical part and conclusions.

In a chapter I, it is discussed HVDC technology, high voltage converters classification, their sphere of utilization and their main advantages and disadvantages. It is also considered in general environmental factors caused by HVDC system.

In a chapter II, it is considered main circuits and power constituents of back to back station. It is also described 12 pulse converter scheme and all canonical harmonics generated by it. It is shown thyristor module and it's auxiliary circuits. In general it is discussed important buses of a conventional converter station.

In Akhaltsikhe HVDC system the rectification and inversion processes are done by AC system's grid voltage (natural commutation), it means, that for switching of thyristor is used systems voltage. In case of such commutation for normal operation of HVDC converter, supplied voltages must be sinusoidal and symmetrical.

In that chapter it is also explained the meaning of ESCR ratio for power systems. Based on such like classification, Georgian power system belongs to strong power systems group, because the ESCR ratio almost in every perspective scenarios is more than 3. It's also considered the main characteristics of back to back station and described some of special controls, which are very important for Georgian power system when it operates with converter station.

In a chapter III, it is carried out mathematical modeling of back to back station. It is shown and in detailed described the simplified model of back to back station. The converter transformers are represented as the special powerful transformer's models of "Asnsoft Simplorer".

In first step modeling result it is shown the waveforms of rectified DC voltages, DC current, supply AC voltages and AC currents consumed by converter station. It is calculated THDs for voltage at converter supply bus bar and explored the degree of nonsinusoidality in dependence of exported power by back to back station.

In a chapter IV, it is modeled high voltage transmission grid of a Georgian power system and it is explored it's influence on THD's levels. It is shown the diagrams of distorted voltages for various bus bars of a high voltage grid when back to back station was exporting 700 MW power to Turkey. It is also shown the table of harmonic contents, which contains almost every existing and perspective high voltage bus bars.

In a same chapter have been carried out n-1 harmonic analysis. It is considered an event, when the outage of OHL line "Zestafoni-Akhaltzikhe" takes place. Obtained results differs from normal regime's results. The situation is a little bit heavier, because in such case the equivalent resistance and reactance of supplier OHL lines is increased that accordingly causes increasing of harmonical voltage drops on those lines. Resulting this, in n-1 regime the THD levels are higher than in normal regime.

Have been researched the dependence of voltage and current distortion ratios on exported power by converter station, considering the parameters of high voltage transmission grid. It is shown the waveforms on that dependence for 500 kv bus bars of "Gardabani" and "Enguri" substations. At other bus bars, those are electrically far away from back to back station important difference in character of alternation of THDs is not noticed.

In a same chapter has been carried out the modeling of one of the challenging reason of noncanonical harmonics. For modeling has been used two software: "PSS/E" and "Ansoft simplorer". It is shown the waveforms of system frequency, 500 kv bus bar voltage, DC voltage, DC current and etc. On the picture of voltage distortion sharply seems how the harmonic spectre changes when converter moves from normal to emergency mode.

Last, fifth chapter of work includes the arrangement of filtration . Here is discussed the filters selection issues. Has been considered the logic of filter selection. It is described the polygon and circle impedances method. By using polygon method and computer maximization appropriate AC filters are selected. It is shown the schemes and frequency characteristics of the selected filters. These filters fully provide b2b station with necessary reactive power.

Have been repeatedly carrying out harmonic analysis for Georgian power system with installed selected filters in normal and n-1 regimes. For both regimes after filters installation the THDs for every bus burs don't exceed desirable value.

At the end of the work have been researched the dependence between levels of THDs and exported power by back to back station considering AC filters and respective conclusions are done.

შინაარსი

	რეზიუმე -----	v
	Abstract -----	viii
	შინაარსი -----	xi
	ცხრილების ნუსხა -----	xiii
	ნახაზების ნუსხა -----	xiv
	დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები -----	xvii
	მაღლიერება -----	xix
	შესავალი -----	20
	ექსპერიმენტული ნაწილის შესახებ -----	23
თავი I	HVDC ტექნოლოგია -----	24
§ 1.1	ზოგადი ცნობები -----	24
§ 1.2	მუდმივი დენის ელექტროგადაცემა -----	25
§ 1.3	HVDC კონვერტორების გამოყენების სფერო -----	27
§ 1.4	HVDC კონვერტორების კლასიფიკაცია -----	28
§ 1.5	HVDC light სისტემა -----	29
§ 1.6	ეკოლოგიური ფაქტორები -----	32
თავი II	მუდმივი დენის ჩანართის მოქმედების პრინციპი და მის მიერ გენერირებული ჰარმონიკები -----	34
§ 2.1	მუდმივი დენის ჩანართის დადებითი მხარეები -----	34
§ 2.2	მუდმივი დენის ჩანართის კონვერტორის ვენტილები -----	34
§ 2.3	12-პულსიანი ვენტილური ჯგუფი და შესაბამისი ჰარმონიკები -----	36
§ 2.4	ტირისტორული მოდული -----	37
§ 2.5	ქვესადგურის კონფიგურაცია -----	38
§ 2.6	კონვერტორის მოქმედების პრინციპი -----	42
§ 2.6.1	კომუტაცია -----	42
§ 2.6.2	კონვერტორის ხიდის კუთხეები -----	44
§ 2.6.3	კონვერტორული ხიდის განტოლებები დამყარებულ რეჟიმში -----	46
§ 2.7	მოკლე შერთვის სიმძლავრის ინდექსი -----	49
§ 2.8	კომუტაციური ჩაშლა -----	50
§ 2.9	მართვა და დაცვა -----	52
§ 2.10	დენის მარაგი -----	54
§ 2.11	ძაბვაზე დამოკიდებული დენის დანაყენის ლიმიტი -----	55
§ 2.12	ცვლადი ძაბვის კონტროლი -----	56
§ 2.13	სპეციალური დანიშნულების კონტროლი -----	59
თავი III	ჩანართის მოდელირება და ჰარმონიკული ანალიზი -----	61
§ 3.1	12-პულსიანი გამართვის სქემის მათემატიკური მოდელირება -----	61
§ 3.2	არასინუსოიდურობის ხარისხის გამოკვლევა ჩანართით გადასაცემ სიმძლავრესთან დამოკიდებულებაში -----	68
თავი IV	გადაცემის ქსელის გავლენა დამახინჯების კოეფიციენტებზე --	73
§ 4.1	გადაცემის ქსელის მოდელირება "Ansoft Simplorer" – ში -----	73
§ 4.2	არასინუსოიდურობის ხარისხის დამოკიდებულება გადასაცემ სიმძლავრეზე სქემის პარამეტრების გათვალისწინებით -----	83

§4.3	n-1 ანალიზი -----	86
§4.4	კანონიკური და არაკანონიკური ჰარმონიკები -----	93
§4.5	ერთთაზა მშ და აგჩ ეგხ “ზესტაფონი ახალციხეზე” -----	96
თავი V	ჰარმონიკების ფილტრაცია -----	105
§5.1	ფილტრების შერჩევის ლოგიკა -----	105
§5.2	წინაღობების წრის მეთოდი -----	106
§5.3	პოლიგონის მეთოდი -----	108
§5.4	ახალციხის კონვერტორის ცვლადი ძაბვის ფილტრები -----	109
§5.4.1	TT 3/12/24 ფილტრი -----	109
§5.4.2	DT 12/36 ფილტრი -----	110
§5.4.3	C ბლოკი -----	111
§5.4.4	ფილტრის ბლოკების ჯამური სიხშირული მახასიათებელი ---	113
§5.5	ნორმალურ რეჟიმში ქსელის ძაბვების ჰარმონიკული სპექტრი ფილტრების გათვალისწინებით -----	114
§5.6	ქსელის ძაბვების ჰარმონიკული სპექტრი ფილტრების გათვალისწინებით n-1 რეჟიმში -----	118
§5.7	ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება მუდმივი დენის ჩანართის დატვირთვაზე ფილტრების გათვალისწინებით -----	122
	დასკვნა -----	124
	გამოყენებული ლიტერატურა -----	126

ცხრილების ნუსხა

ცხრ. 1	საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ქსელის კვანძების ჰარმონიკული სპექტრი -----	82
ცხრ. 2	ახალციხის ქვესადგურის 500 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი -----	92
ცხრ. 3	საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ქსელის კვანძების ჰარმონიკული სპექტრი N-1 რეჟიმში -----	94

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1	HVDC light კაბელების წყვილი -----	31
ნახ. 2	ვენტილებისა და ვენტილური ხიდების აღნიშვნები -----	35
ნახ. 3	ოთხმაგი ვენტილის სტრუქტურა -----	37
ნახ. 4	ჩანართის ტირისტორული მოდული -----	38
ნახ. 5	მუდმივი დენის ჩანართის ტიპური ქვესადგურის სქემა ---	40
ნახ. 6	კომუტაციური პროცესები მუდმივი დენის ჩანართში -----	45
ნახ. 7	მუდმივი დენის ჩანართის მახასიათებლები -----	53
ნახ. 8	HVDC - ის მართვის სისტემის ბლოკური დიაგრამა -----	57
ნახ. 9	12-პულსიანი გამმართველის სქემა -----	62
ნახ. 10	გამმართველის I ხიდის მკვებავი ემძ-ები -----	63
ნახ. 11	გამმართველის II ხიდის მკვებავი ემძ-ები -----	63
ნახ. 12	მუდმივი ძაბვები გამმართველის მომჭერებზე -----	64
ნახ. 13	დატვირთვის დენი -----	65
ნახ. 14	დენები ტრანსფორმატორის Δ -ად შეერთებულ გრაგნილში -----	66
ნახ. 15	დენები ტრანსფორმატორის Y-ად შეერთებულ გრაგნილში -----	66
ნახ. 16	ჩანართის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენები -----	67
ნახ. 17	100 მგვტ-ით დატვირთული კონვერტორის მიერ მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი დენის მრუდი -----	69
ნახ. 18	100 მგვტ-ით დატვირთული კონვერტორის მიერ მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი დენის ჰარმონიკული სპექტრი -----	70
ნახ. 19	ფაზური ძაბვა 500 კვ-იან სალტებზე -----	71
ნახ. 20	ფაზური ძაბვის სპექტრი -----	71
ნახ. 21	დამახ. კოეფიციენტების დამოკიდებულება სიმძლავრეზე -----	72
ნახ. 22	საქართველოს ელექტრო გადამცემი ქსელის მოდელირებული ნაწილი “ანსოფტ სიმპლორერში” -----	74
ნახ. 23	ძაბვა ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე -----	75
ნახ. 24	ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი -----	75
ნახ. 25	ძაბვა ქ/ს ენგური 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე -----	76
ნახ. 26	ქ/ს ენგური 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი ---	77
ნახ. 27	ძაბვა ქ/ს ზესტაფონი 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე -----	77
ნახ. 28	ქ/ს ზესტაფონი 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი -----	78
ნახ. 29	ძაბვა ქ/ს გარდაბანი 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე -----	78
ნახ. 30	ქ/ს გარდაბანი 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი -----	79
ნახ. 31	ძაბვა ქ/ს ქსანი 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე -----	80
ნახ. 32	ქ/ს ქსანი 500 - ის 220 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი ---	80
ნახ. 33	ძაბვა ენგურის გ1-ის სალტებზე -----	81
ნახ. 34	ენგურის გ1-ის სალტის ძაბვის სპექტრი -----	81
ნახ. 35	ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების გადასაცემ სიმძლავრე-ზე დამოკიდებულება ქსელის პარამეტრების გათვალისწინებით -----	84

ნახ. 36	ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება ენგურის 500 კვ კვანძისთვის -----	85
ნახ. 37	ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება გარდაბანის 500 კვ კვანძისთვის -----	85
ნახ. 38	ძაბვა ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტეზე -----	87
ნახ. 39	ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი -----	87
ნახ. 40	ძაბვა ქ/ს ენგური 500-ის 500 კვ – ის სალტეზე -----	88
ნახ. 41	ქ/ს ენგური 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი ---	88
ნახ. 42	ძაბვა ქ/ს ზესტაფონი 500-ის 500 კვ – ის სალტეზე -----	89
ნახ. 43	ქ/ს ზესტაფონი 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი	89
ნახ. 44	ძაბვა ქ/ს გარდაბანი 500-ის 500 კვ – ის სალტეზე -----	90
ნახ. 45	ქ/ს გარდაბანი 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი	90
ნახ. 46	ქ/ს ქსანი 500-ის 220 კვ – ის სალტის ძაბვა -----	91
ნახ. 47	ქ/ს ქსანი 500-ის 220 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი ----	91
ნახ. 48	12 პულსიანი კონვერტორის დენები -----	95
ნახ. 49	გადადინება ეგზ “ზესტაფონი – ახალციხეზე” -----	98
ნახ. 50	ძაბვა ახალციხის 500 კვ სალტეზე -----	98
ნახ. 51	საქართველოს ელექტროსისტემის სიხშირე -----	99
ნახ. 52	კონვერტორის მუდმივი ძაბვა -----	100
ნახ. 53	კონვერტორის მუდმივი დენი -----	100
ნახ. 54	ახალციხის კონვერტორის მუდმივი ძაბვის სპექტრი ნორმალურ რეჟიმში -----	101
ნახ. 55	ახალციხის კონვერტორის მუდმივი ძაბვის სპექტრი ავარიულ რეჟიმში -----	102
ნახ. 56	ახალციხის 500 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი მოკლე შერთვამდე -----	103
ნახ. 57	ახალციხის 500 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი მოკლე შერთვის მომენტში -----	103
ნახ. 58	სისტემის წინააღობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა -----	105
ნახ. 59	მკვებავი სისტემის წინააღობები სიხშირის მიხედვით -----	106
ნახ. 60	სისტემის წინააღობების წრე -----	107
ნახ. 61	წინააღობების პოლიგონი -----	108
ნახ. 62	TT 3/12/24 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი -----	110
ნახ. 63	DT 12/36 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი -----	111
ნახ. 64	ცვლადი ძაბვის ჰარმონიკული ფილტრები ახალციხე 500 – ის სალტეზე (მოდელი ანსოფტ სიმპლორერისთვის) ---	112
ნახ. 65	2A+2B+C ფილტრების ჯამური სიხშირული მახასიათებელი	113
ნახ. 66	ძაბვა ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტეზე -----	114
ნახ. 67	ქ/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი	115
ნახ. 68	ძაბვა ქ/ს ქსანი 500-ის 220 კვ სალტეზე -----	116
ნახ. 69	ქ/ს ქსანი 500-ის 220 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი -----	116
ნახ. 70	ძაბვა ენგურჰესის საგენერატორო სალტეზე -----	117

ნახ. 71	ენგურჰესის საგენერატორო სალტის ძაბვის ჰარმონიკული სპექტრი -----	117
ნახ. 72	ძაბვა ე/ს ახალციხე 500-ის 500 კვ – ის სალტებზე (n-1, ფილტრებით) -----	118
ნახ. 73	ე/ს ახალციხის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი(n-1, ფილტრებით) -----	119
ნახ. 74	ძაბვა ე/ს ქსანი 500-ის 220 კვ სალტებზე -----	119
ნახ. 75	ე/ს ქსანი 500-ის 220 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი (n-1, ფილტრებით) -----	120
ნახ. 76	ძაბვა ენგურჰესის საგენერატორო სალტებზე (n-1, ფილტრებით) -----	121
ნახ. 77	ენგურის საგენერატორო სალტის ძაბვის სპექტრი (n-1, ფილტრებით)	121
ნახ. 78	დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება დატვირთვაზე -----	123

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

- ავჩ** - ავტომატური განმეორებითი ჩართვა
- გშ** - გადაძაბვის შემზღუდველი
- ეგბ** - ელექტროგადაცემის ხაზი
- მშ** - მოკლე შერთვა
- A** - Ampere (ამპერი)
- AC** - Alternating Current (ცვლადი დენი)
- AS** - Ansoft Simplorer (ანსოფტ სიმპლორერი)
- B2B** - Back to Back station (მუდმივი დენის ჩანართი)
- CCC** - Capacitor Commutated Converter (ტევადობით კომუტირებადი კონვერტორი)
- D** - Diode (დიოდი)
- DC** - Direct Current (მუდმივი დენი)
- ESCR** - Effective Short Circuit Ratio (ეფექტური მოკლე შერთვის დონე)
- FACTS** - Flexible alternating current transmission systems (მოქნილი ცვლადი ძაბვის გადაცემის სისტემები)
- GTO** - Gate turn-off thyristor (ოროპერაციული ტირისტორი)
- h** - harmonic (ჰარმონიკა)
- HVDC** - High Voltage Direct Current (მაღალი ძაბვის მუდმივი დენი)
- HVE** - High Voltage Engineering (მაღალი ძაბვის ინჟინერია)
- IEC** - International Electrotechnical Commission (საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისია)
- IEEE** - Institute of Electrical and Electronic Engineers (ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრონიკის საინჟინრო ინსტიტუტი)
- IGBT** - Insulated Gate Bipolar Transistor (ბიპოლარული ტრანზისტორი იზოლირებული ბაზით)
- IHD** - Individual Harmonic Distortion (ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება)
- K_I** - დენის დამახინჯების კოეფიციენტი

- K_U** - ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტი
- kV** - kilovolt (კილოვოლტი)
- kHz** - kilohertz (კილოჰერცი)
- mag** - magnitude (ამპლიტუდა)
- MW** - Megawatt (მეგავატი)
- PSS/E** – Power System Simulation for Engineering (ელექტრული სისტემების საინჟინრო მოდელირების პროგრამა)
- PWM** - Pulse-Width Modulation (განივ-იმპულსური მოდულაცია)
- S** - Second (წამი)
- SVC** - Static Var Compensator (რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური კომპენსატორი)
- T** - Transformer (ტრანსფორმატორი)
- THD** – Total Harmonic Distortion (ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება)
- VDCOL**– Voltage Dependent Current Order Limiter (ძაბვაზე დამოკიდებული დენის დანაყენის შემზღუდველი)
- VSC** - Voltage Source Converter (ძაბვის წყაროს კონვერტორი)

მადლიერება

მადლობას ვუხდით ბატონ გურამ დგებუაძეს და ბატონ მიხეილ რუხვაძეს კვლევის პროცესში გაწეული კონსულტაციებისა და თანამშრომლობისათვის.

შესავალი

კვლევის აქტუალობა. სამრეწველო ელექტროდანადგარები გათვლილია 50 ჰერცი სიხშირის სინუსოიდურ ცვლად დენზე. დენის არასინუსოიდურობისას ადგილი აქვს მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის შემთხვევებს. ცვლადი დენის სინუსოიდურობის დარღვევის ხარისხის შეფასება ხორციელდება ე.წ. დამახინჯების კოეფიციენტით, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა სტანდარტით შემოსაზღვრულია (ზემოდან) და საქართველოს ელექტროსისტემის ქსელის კოდის მიხედვით არ უნდა აღემატებოდეს 3%-ს.

მაღალი რიგის ჰარმონიკები უარყოფით გავლენას ახდენს ელექტროსისტემის ცალკეული ელექტროდანადგარების მუშაობაზე და, შესაბამისად, აუცილებელია მათი გამოთვლა და, საჭიროების შემთხვევაში სინუსოიდურობის დამახინჯების კოეფიციენტის შესამცირებლად, შესაბამისი ღონისძიებების გატარება.

უახლოეს პერიოდში დაგეგმილია “ახალციხის 500/400/220” და “ბათუმის 220/110” ქვესადგურებში მუდმივი დენის ჩანართების მოწყობა და მათი გავლით 1000 მგვტ და მეტი სიმძლავრის ექსპორტი საქართველოს ელექტროსისტემიდან თურქეთის ელექტროსისტემაში. მუდმივი დენის ჩანართი წარმოადგენს მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროს, რასთანაც დაკავშირებულია ქსელის სინუსოიდური ძაბვების დამახინჯება.

საქართველოს ელექტროსისტემის, მთლიანად, და მისი ცალკეული ელექტროდანადგარების ნორმალური მუშაობის თვალსაზრისით და, ამასთან, მომხმარებელთან მიწოდებული ენერჯის სათანადო ხარისხის უზრუნველყოფის მიზნით ძალიან აქტუალურია, თურქეთში ექსპორტირებულ სიმძლავრესთან დამოკიდებულებაში, გამოკვლეული იქნეს ენერჯის გამცემ სისტემაში (საქართველოს ელექტროსისტემაში) სინუსოიდურობის დამახინჯების კოეფიციენტები და დადგენილი იქნეს ამ კოეფიციენტის დასაშვებ მნიშვნელობამდე დაყვანის შესაბამისი სპეციალური მოწყობილობების სათანადო საანგარიშო პარამეტრები ელექტროსისტემის ყველა სახასიათო რეჟიმებისთვის.

არსებული მეთოდების ნაკლოვანება. ჰარმონიკული ანალიზის არსებული მეთოდებიდან ყველაზე ხშირად გამოიყენებოდა ჰარმონიკული ზედდების მეთოდი, რომელიც დღევანდელი გადასახედიდან გარკვეულწილად მოძველებულია. ზედდების მეთოდი მოითხოვს ქსელის ყველა ელემენტის ჩანაცვლების სქემის შედგენას ყოველი რიგის ჰარმონიკის სიხშირისთვის, რაც საკმაოდ ართულებს კვლევის პროცესს და როდესაც საქმე ეხება მრავალკვანძიანი ელექტრული სისტემების ჰარმონიკულ ანალიზს, მისი გამოყენება პრაქტიკულად მოუხერხებელია.

სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებული ჰარმონიკული ანალიზის კომპიუტერული მოდელირების მეთოდი მოითხოვს ყოველი კონკრეტული ელექტროსისტემისთვის შეიქმნას ინდივიდუალური მოდელი, რომელიც მაქსიმალურად უპასუხებს ამ მოდელისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

ნაშრომის მიზანი. ნაშრომის მიზანია გამოკვლევული და შეფასებული იქნეს არასინუსოიდურობის ხარისხი საქართველოს ელექტროსისტემის ქსელის სხვადასხვა კვანძებისთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროს ჩართვასთან დაკავშირებით. დადგინდეს დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტები სხვადასხვა რეჟიმებში. შესწავლილ იქნას ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების მუდმივი დენის ჩანართით ექსპორტირებულ სიმძლავრეზე დამოკიდებულების ხასიათი და გატარდეს სპეციალური ღონისძიებები არასინუსოიდურობის ხარისხის შესათანხმებლად საქართველოს ქსელის კოდით განსაზღვრულ ნორმებთან.

მეცნიერული სიახლე. ახალციხისა და ბათუმის მუდმივი დენის ჩანართები, რომლებიც უახლოეს მომავალში გაეშვება და ასინქრონულად დააკავშირებს საქართველოსა და თურქეთის ელექტროსისტემებს, წარმოადგენს პირველ ჩანართს მთელ კავკასიაში და მის მომიჯნავე ენერგოსისტემებში. შესაბამისად მის მიერ გენერირებული ჰარმონიკების შესწავლა-გამოკვლევა პირველი მცდელობაა საქართველოს ელექტროსისტემისთვის. ამასთან ჰარმონიკული ანალიზის მოძველებული ზედდების მეთოდის ნაცვლად სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებულია კომპიუტერული მოდელირების მეთოდი, რისთვისაც შევქმენით საქართველოს ელექტროსისტემის გადაცემის ქსელისა და მუდმივი დენის

ჩანართების მათემატიკური მოდელები და ჰარმონიკული ანალიზი ჩავატარეთ ელექტრომაგნიტური პროცესების საანგარიშო პროგრამა “Ansoft Simplorer”-ით.

პრაქტიკული მნიშვნელობა. საქართველოს ელექტროსისტემის გადაცემის ქსელისა და მუდმივი დენის ჩანართის, ამ ნაშრომში შექმნილი, სპეციალური კომპიუტერული მოდელები საშუალებას გვაძლევს საქართველოსა და თურქეთის ელექტროსისტემების პარალელური ასინქრონული მუშაობისას ნებისმიერ რეჟიმში ჩატარდეს ჰარმონიკული ანალიზი. აგრეთვე, შესაძლებელია დადგინდეს ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტები ელექტროსისტემის ნებისმიერი შემადგენლობის, კონფიგურაციისა და ექსპორტირებული სიმძლავრის ნებისმიერი სიდიდის დროს, რასაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს საქართველოს ელექტროსისტემისთვის ქსელის კოდის მოთხოვნებიდან გამომდინარე.

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

- 2010 წელი, ენერჯეტიკის სექცია - III ადგილი;
- 2011 წელი, ენერჯეტიკის სექცია - I ადგილი.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია სტატიები საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 128 გვერდისაგან. იგი შეიცავს შესავალს, ხუთ თავს, დასკვნასა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას.

ექსპერიმენტული ნაწილის შესახებ

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

თავი I

HVDC ტექნოლოგია

1.1 ზოგადი ცნობები

თავდაპირველად ელექტროენერჯის გადასაცემად გამოიყენებოდა მუდმივი დენი. შემდგომში ტრანსფორმატორების გამოყენების შესაძლებლობამ უფრო მიმზიდველი გახდა ცვლადი ძაბვით ელექტროენერჯის გადაცემა. ცვლადი ძაბვის გამოყენებამ მიიღო მასიური სახე. თუმცა ამ დროის განმავლობაში არ შეწყვეტილა მუდმივი ძაბვით გადაცემის განვითარება. იზრდებოდა ელექტროენერჯის მოხმარება და ინტერესი მუდმივი ძაბვის მიმართ უფრო და უფრო ღრმავდებოდა და აშკარად იკვეთებოდა მისი უპირატესობა ცვლადი ძაბვით გადაცემასთან შედარებით.

შვედეთში, კომპანია ASEA (Allmana Svenska Electriska Aktiebolaget) – ში ჩატარებული ინტენსიური კვლევების საფუძველზე 1929 წლიდან დაიწყო მრავალელექტროდიანი ბადით მართვადი ვერცხლისწყლის ვენტილების წარმოება. ასეთი ტიპის ვენტილები მზადდებოდა მაღალ ძაბვაზე და საკმაოდ დიდ სიმძლავრეზე. 1930 წელს შვედეთში და შეერთებულ შტატებში, თითქმის ერთდროულად, გაუშვეს პირველი ექსპერიმენტალური სადგურები, ელექტროენერჯის კონვერსიის და სიხშირის ცვლილების პროცესებში, ვერცხლისწყლიანი ვენტილების საიმედოობისა და ეფექტურობის გამოკვლევის მიზნით.

მუდმივი დენით გადაცემა მას შემდეგ გახდა პრაქტიკული რაც გაჩნდა მოთხოვნა ელექტროენერჯის შორ მანძილებზე გადაცემისა. ასევე გარდაუვალი იყო მისი გამოყენება კაბელური გადაცემის შემთხვევებში. მეორე მსოფლიო ომის შემდეგ ელექტროენერჯიაზე მოთხოვნის მკვეთრმა ზრდამ დამატებითი სტიმული გამოიწვია და ინტენსიური კვლევები კვლავ დაიწყო ძირითადად შვედეთსა და რუსეთში. 1950 წელს ექსპლუატაციაში იქნა შეყვანილი პირველი ექსპერიმენტალური 200 კვ მუდმივი ძაბვის ხაზი “მოსკოვი - კაშირა”, სიგრძით 116 კმ. ხოლო პირველი კომერციული პროექტი გაეშვა 1954 წელს, 98 კმ სიგრძის წყალქვეშა კაბელით დენის

მინით დაბრუნების კონტურით. კაბელი აკავშირებდა კუნძულ გოთლენდს შვედეთის მატერიკთან. ეს იყო ფაქტიურად მსოფლიოში პირველი HVDC (High Voltage Direct Current - მაღალი ძაბვის მუდმივი დენი) სისტემა, რომელიც დამზადებული იყო ვერცხლისწყლის კონვერტორების ბაზაზე. პროექტის ავტორი და გამშვები იყო კომპანია ABB (Asea Brown Boveri). ამას შემდგომში მოყვა მსოფლიოს სხვადასხვა წერტილებში მსგავსი ტიპის მრავალი მცირე და დიდი სიმძლავრის HVDC კავშირების შექმნა. 20 წლის შემდეგ, 70-იანი წლებიდან ნახევარგამტარულმა ტირისტორებმა ჩაანაცვლა ვერცხლისწყლის კონვერტორები, რაც წინ გადადგმული ნაბიჯი იყო.

პირველი ასეთი პროექტის განხორციელება მოხდა კანადაში 1969 წელს, როდესაც ექსპლუატაციაში გაუშვეს ელ-რივერის HVDC სისტემა.

დღეისათვის მუდმივი დენის ელექტროგადაცემა მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაშია გამოყენებული და მისი პერსპექტიულობა და პრაქტიკულობა სულ უფრო და უფრო იზრდება, რაშიც დიდ როლს თამაშობს ძალური ელექტრონიკის უწყვეტი განვითარება.

2010 წლის მონაცემებით დღეისათვის მსოფლიოში 90-ზე მეტი HVDC სისტემაა გაშვებული, ჯამური სიმძლავრით 67000 მგვტ, მათგან ყველაზე მძლავრი სისტემის დადგმული სიმძლავრე 3150 მგვტ-ია [11].

კავკასიაში საქართველო წარმოადგენს პირველ ქვეყანას, სადაც უახლოეს მომავალში მოხდება HVDC სისტემის ერთ-ერთი ტიპის (მუდმივი დენის ჩანართი) პროექტის განხორციელება [18].

1.2 მუდმივი დენის ელექტროგადაცემა

მუდმივი დენის გადაცემის უპირატესობა ცვლადი დენის გადაცემასთან შედარებით ძირითად შემთხვევებში განპირობებულია ეკონომიკური კუთხით. მუდმივი დენის არჩევა სიმძლავრის გადაცემის ამოცანის გადაწყვეტისას ნაკარნახებია ჩამოთვლილთაგან ერთ-ერთი მიზეზით:

1. გადასაცემი სიგრძის ერთ ერთეულზე ერთი და იგივე სიმძლავრის გადაცემისას მუდმივი დენის საყრდენები გაცილებით იაფია, ვიდრე ცვლადი დენისა. თუმცა მუდმივი დენის კონვერტორული ქვესადგურები უფრო ძვირია, ვიდრე ცვლადი ძაბვის ქვესადგურები. ასე რომ არსებობს გადაცემის სასაზღვრო სიგრძე (700-800 კმ), რომლის ზემოთაც ჯამური დანახარჯები მუდმივი დენით გადაცემისთვის მნიშვნელოვნად ნაკლებია. მუდმივი დენით საჰაერო გადაცემისას ასევე ნაკლებია ვიზუალური ზეგავლენა გარემოზე, რამდენადაც გვაქვს სადენების ნაკლები რაოდენობა და უფრო მცირე ზომის საყრდენები. ასევე, მუდმივ დენს აქვს სხვა ეკოლოგიური უპირატესობები მაგნიტური და ელექტრული ველების თვალსაზრისითაც, რაც ასევე მუდმივი დენით ელექტროგადაცემის დადებით მხარეს წარმოადგენს.

2. თუ ელექტროგადაცემა ხდება მიწისქვეშა ან წყალქვეშა კაბელით მაშინ ზემოთ ნახსენები სასაზღვრო სიგრძე გაცილებით ნაკლებია საჰაერო გადაცემასთან შედარებით (50-60 კმ). დღეს უკვე ექსპლუატაციაშია მუდმივი დენის კაბელები, რომელთა სიგრძე ასულობით კილომეტრს აღწევს.

3. ხშირად ელექტრული სისტემის სხვადასხვა არეები ან სხვადასხვა ელექტრული სისტემები არ არიან სინქრონულ კავშირში, მაშინაც კი, როდესაც მათ შორის ძალიან მცირე მანძილია ან ემეზობლებიან ერთმანეთს. მაგალითად, იაპონიაში ელექტრული სისტემის ერთი ნაწილი მუშაობს 60 ჰერცზე, ხოლო მეორე ნაწილი 50 ჰერცზე. სისტემის ამ ნაწილებს შორის ელენერჯის მიმოცვლის მიზნით ცვლადი ძაბვით კავშირის განხორციელება ფიზიკურად შეუძლებელია. თუ ამ ნაწილებს შორის დავაყენებთ მუდმივი დენის კონვერტორულ ქვესადგურებს, მაშინ უკვე შესაძლებელი ხდება მათ შორის სასურველი სიდიდის სიმძლავრის მიმოცვლის განხორციელება, მიუხედავად მათი ასინქრონული მუშაობისა [11].

მსგავსი კავშირის ნათელი მაგალითია მუდმივი დენის ჩანართის პროექტი, რომელსაც წინამდებარე ნაშრომი უშუალოდ ეხება. მართალია საქართველოს და თურქეთის ელექტროსისტემების სიხშირე არ განსხვავდება ერთმანეთისგან, მაგრამ ამ ორ ქვეყანას შორის ჩატარებული

მოლაპარაკებების საფუძველზე გადაწყდა მათი კავშირი განხორციელდეს ასინქრონულად, რაც სისტემების დამოუკიდებელი მართვის საშუალებას იძლევა. აღნიშნულის მიღწევა კონვერტორული კავშირის გარეშე შეუძლებელია.

1.3 HVDC კონვერტორების გამოყენების სფერო

HVDC კონვერტორები პირველად გამოიყენეს ორი ასინქრონულად მომუშავე ელექტრული სისტემის შესაერთებლად. თუმცა გარდა ამისა შესაძლოა შევხვდეთ მათი გამოყენების სხვა მრავალ შემთხვევას, რომელთაგან აღსანიშნავია:

1. **ორი ელექტრული სისტემის ასინქრონული პარალელური მუშაობა.** ზოგიერთი კონტინენტალური ელექტრული სისტემები შეიცავენ რამდენიმე ასინქრონულ ზონას, რომელთა დაკავშირებაც ტრადიციული მეთოდით შეუძლებელია. ასეთ შემთხვევაში HVDC-ის გამოყენება ერთადერთი გამოსავალია.

2. **ელექტროენერჯის გადაცემა შორეული ენერჯის წყაროებიდან.** როდესაც ენერჯის წყაროები ძალიან დაშორებულია მოხმარების კვანძებს, ასეთ შემთხვევაში HVDC-ის გამოყენება ეკონომიკურად გამართლებულ გზას წარმოადგენს.

3. **დეფიციტურ ზონებში ელექტროენერჯის იმპორტი.** ისეთ არეებში, სადაც ახალი გენერაციის დამატება შეუძლებელია და, ამასთან, მჭიდროდ დასახლების გამო შეუძლებელია საჭირო ხაზებით შესვლა, ელექტროენერჯის იმპორტის გამართლებულ გზას წარმოადგენს მუდმივი ძაბვის მინისქვეშა კაბელების გამოყენება.

4. **უკვე არსებული ცვლადი ძაბვის გადაცემის ხაზის გამტარუნარიანობის გაზრდა მისი გადაკეთებით მუდმივი ძაბვის ხაზად.** ეს ხდება მაშინ, როდესაც ტრასის გასწვრივ მეორე ჯაჭვის აგებაში შეზღუდვები ვართ, მუდმივი ძაბვის ხაზით ტრასის სიგანის შეუცვლელად შევძლებთ ავამაღლოთ ხაზის გამტარუნარიანობა.

5. **სიმძლავრის ნაკადის კონტროლი.** ცვლადი ძაბვის ქსელებში სიმძლავრის ნაკადის კონტროლი გართულებულია. ამის გამო ხშირ შემთხვევაში საჭირო ხდება ცვლადი ძაბვის ქსელში მუდმივი ძაბვის გადაცემის ჩაშენება, რათა გაადვილდეს ეს კონტროლი [15].

1.4 HVDC კონვერტორების კლასიფიკაცია

HVDC კონვერტორების ხიდები (ბოგები) და ხაზები ან კაბელები შეიძლება დაიყოს სხვადასხვა კონფიგურაციად მათი ეფექტური გამოყენებისათვის. კონვერტორული ხიდები შეიძლება იყოს მონოპოლარული და ბიპოლარული. HVDC-ის გამოყენების ზოგიერთი ყველაზე გავრცელებული გზა ჩამოთვლილია ქვემოთ:

1. **მუდმივი დენის ჩანართი,** გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც ორი დასაკავშირებელი სისტემა ერთმანეთის მეზობლადაა და გადამცემი ხაზის ან კაბელის საჭიროება არ არსებობს (საქართველო - თურქეთის მაგალითი). ასეთ დროს კონვერტორს შეიძლება ჰქონდეს როგორც მონოპოლარული, ასევე ბიპოლარული კონფიგურაცია.
2. **სიმძლავრის გადაცემა ორ ქვესადგურს შორის,** როდესაც ეკონომიურ გზას წარმოადგენს გეოგრაფიულად დაშორებულ ორ წერტილს შორის სიმძლავრის გადაცემა მუდმივის ძაბვის ხაზით ან კაბელით, როგორც წესი ორტერმინალიანი სქემით. ასეთ სქემას იყენებს დღემდე აშენებული HVDC სისტემებს შორის უმეტესობა.
3. **მულტიტერმინალიანი HVDC სისტემა.** თუ სამი ან მეტი HVDC ქვესადგური გეოგრაფიულად გამოყოფილია ერთმანეთთან დაკავშირებული ხაზებით ან კაბელებით, მაშინ ასეთ სისტემას უწოდებენ მულტი ან მრავალტერმინალიანს. თუ ყველა ქვესადგური ჩართულია ერთ ძაბვაზე, მაშინ სისტემას უწოდებენ პარალელურ მულტიტერმინალიანს. თუ კონვერტორს დამატებული აქვს მიმდევრობით ერთი (ან ორივე) პოლუსი მაშინ სისტემას უწოდებენ მიმდევრობით მულტიტერმინალიანს. პარალელური და მიმდევრობითი სისტემების კომბინაცია გვაძლევს

ჰიბრიდულ მულტიტერმინალიან სისტემას. საბოლოო ჯამში მულტიტერმინალიანი სისტემები ეკონომიკურად ნაკლებად გამართლებულია დამატებითი ქვესადგურებზე განეული ხარჯების გამო [16].

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილისა, არსებობს ასევე სხვა სპეციფიკური დანიშნულების კონფიგურაციები, რომლებიც კონკრეტული მიზნებითაა ნაკარნახები.

1.5 HVDC light სისტემა

HVDC light სისტემა წარმოადგენს HVDC ოჯახის ერთ-ერთ ახალ წევრს და არის წარმატებული და ხშირად გამართლებული გზა ელექტროენერჯის გადასაცემად წყალქვეშა ან მიწისქვეშა კაბელებით, საჰაერო ხაზებით ან მუდმივი დენის ჩანართით განსაზღვრულ გადასაცემ სიმძლავრემდე. HVDC light სისტემა წარმოადგენს ძაბვის წყაროს კონვერტორებზე (VSC – voltage source converter) დაფუძნებულ HVDC ტექნოლოგიას კომბინირებულს მუდმივი ძაბვის კაბელებთან, საჰაერო ხაზებთან ან მუდმივი დენის ჩანართთან და მისი დადგმული სიმძლავრე იცვლება რამდენიმე ათეული მგვტ – დან ასეულობით მგვტ - მდე. HVDC light კონვერტორები დაფუძნებულია IGBT ტრანზისტორებზე და მუშაობენ მაღალსიხშირული განივიმპულსური მოდულაციით, რაც მკვეთრად ამცირებს ფილტრების ზომებს და აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოუკიდებელი და სწრაფი კონტროლის საშუალებას იძლევა.

HVDC light სისტემის კაბელებს (ნახ.1) აქვთ დაპრესილი პოლიმერული იზოლაცია. მათი მექანიკური სიმტკიცე და მოქნილობა ამარტივებს მათ ინსტალაციას როგორც მიწისქვეშა ისე წყალქვეშა გადაცემის დროს.

HVDC light ტექნოლოგიას აქვს შესაძლებლობა ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის სწრაფი კონტროლისა, ძაბვისა და სიხშირის სტაბილურობის შენარჩუნებით. ეს მოქნილობა საშუალებას იძლევა, რომ ჩავაშენოთ ეს სისტემა ცვლადი ძაბვის ქსელში მაშინაც კი, როდესაც მოკლედ შერთვის სიმძლავრე

მიერთებულ ცვლადი ძაბვის ქსელში არის ძალიან მცირე (ნულთან ახლოს). HVDC light სისტემა იგება მოდულური პრინციპით. თითქმის ყველა მოწყობილობა ძალოვანი ტრანსფორმატორების გარდა მოთავსებულია დახურულ შენობაში. ასეთი ტიპის ქვესადგურში არ არის საჭირო მომსახურე პერსონალის არსებობა, რამდენადაც მისი მართვა ხდება დისტანციურად ან ავტომატურად. ტექნიკური მომსახურება განისაზღვრება ძირითადად მხოლოდ ამომრთველებით, გამთიშველებით, გაცეების სისტემებით და ა.შ.

კაბელები მუშაობენ ბიპოლარულ რეჟიმში, ერთი კაბელი დადებითი პოლარობისაა ხოლო მეორე უარყოფითი [3]. მათ აქვთ პოლიმერული იზოლაცია, რომელიც ძალიან გამძლე და საიმედოა. მექანიკური მედეგობა და მოქნილობა განუმეორებელს ხდის ასეთ კაბელებს შემდეგ პირობებში დასაინსტალირებლად:

წყალქვეშა კაბელები შეიძლება დამონტაჟდეს ღრმა წყლებში და უსწორმასწორო ფსკერზეც კი.

მინისქვეშა კაბელები მონტაჟდება გაცილებით იაფად სახნავი ტექნიკის გამოყენების ხარჯზე.

აგრეთვე აღნიშვნის ღირსია ამ სისტემის ეკოლოგიური უპირატესობები: მაგნიტური ველი ჩახშობილია (წყვილ კაბელში გადის სანაბნაღმდეგო მიმართულების დენები და ველები აკომპენსირებენ ერთმანეთს), ზეთის დაღვრის რისკის არარსებობა, რასაც ადგილი აქვს ზეთქაღალდიანი კაბელების შემთხვევაში, ნაკლებად ხანძარსაშიში, არანაირი ვიზუალური ზემოქმედება, რამდენადაც კაბელები მინაშია ჩაფლული, მინის დენის არარსებობა.

ენერგოსისტემის მდგრადი მუშაობა დამოკიდებულია აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის სტაბილურ და საიმედო კონტროლზე. ამ კონტროლის დაკარგვამ შეიძლება გამოიწვიოს სისტემური ავარია. ძაბვის წყაროს კონვერტორის ბაზაზე აგებულ გადაცემის სისტემას აქვს უპირატესობა თითქმის მყისიერად შეიცვალოს მუშა წერტილი შესაძლებლობის ფარგლებში და მოახდინოს აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოუკიდებელი კონტროლი. ეს გვაძლევს საშუალებას მოვახდინოთ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური

განაწილება ძლიერი დატვირთვის რეჟიმშიც. VSC სისტემას ასევე შეუძლია გაუნოს ელექტრულ ქსელს სხვა სახის მხარდაჭერაც.



ნახ. 1 HVDC light კაბელების წყვილი

მაგალითისთვის კომპიუტერული სიმულაციის შედეგად აღმოჩნდა, რომ პარალელური ხაზების შემთხვევაში (ცვლადი ძაბვის ხაზი და მუდმივი ძაბვის ხაზი), სადაც ძაბვის წყაროს კონვერტორული გადაცემის სისტემა პარალელურადაა ცვლადი ძაბვის ხაზთან, VSC სისტემა უზრუნველყოფს რყევების 2-3 ჯერ უკეთესად ჩახშობას, ვიდრე მაკომპენსირებელი მოწყობილობები (კონდენსატორთა ბატარეები, სინქრონული კომპენსატორები) [4]. აგრეთვე უპირატესია ეს სისტემა თუ საქმე გვაქვს ქსელის გაფართოებასთან, რამდენადაც მას შეუძლია ძაბვის და სიხშირის სტაბილიზაცია (ძაბვის სტაბილიზაცია მისგან მოშორებულ კვანძშიც კი).

ზემოთ ჩამოთვლილი უპირატესობებით ასეთი სისტემა მართლაც იმსახურებს მონონებას სხვადასხვა ტიპის ელექტროგადაცემების შემთხვევაში, იქნება ეს წყალქვეშა, სახმელეთო თუ მუდმივი ღენის ჩანართის ტიპის გადაცემა, მაგრამ აუცილებელია აქვე აღინიშნოს ამ სისტემის გამოუცდელობა, რამდენადაც იგი სულ რამდენიმე წლის წინ შეიქმნა. მნიშვნელოვანი სისტემათაშორისი კავშირებისას ჯერ კიდევ სარისკოა ასეთი ტიპის კონვერტორების გამოყენება, რადგან მცირე

საექსპლუატაციო ისტორიის გამო მათი ნაკლოვანებები ბოლომდე შესწავლილი არ არის [24].

წინამდებარე ნაშრომში ვიხილავთ კლასიკური ტიპის გამოცდილ HVDC სისტემას და ქვემოთ გამოყენებულ ორივე კომპიუტერულ პროგრამაში სწორედ ასეთი სისტემა გვაქვს მოდელირებული, რადგან ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართი წარმოადგენს კლასიკური ტიპის მუდმივი დენის ჩანართს.

1.6 ეკოლოგიური ფაქტორები

HVDC სისტემების გავლენა გარემოზე ელექტრული კუთხით შეიძლება აღინეროს ველის და იონიზაციის ეფექტით, როგორც გვირგვინის მოვლენა. ელექტრული ველი წარმოიქმნება, როგორც გამტარის მუხტებით ასევე HVDC სისტემის გადამცემი ხაზისთვის გამტარზე გარშემორტყმული ჰაერის იონებით და აეროზოლებით. მუდმივი მაგნიტური ველი კი წარმოიქმნება გამტარში გამავალი მუდმივი დენით. გადამცემი ხაზის მიერ გენერირებული იონები აფორმირებენ ღრუბლებს, რომლებიც ქარის შედეგად მოძრაობას იწყებენ და შესაძლოა შეეხონ ადამიანს, ცხოველს ან ტრასის სიახლოვეს მდებარე ქვესადგურს ან სადგურს.

გვირგვინის მოვლენამ შეიძლება გამოიწვიოს რადიო ხელშეშლა, ხმაური და ოზონის გენერაცია.

მუდმივი დაბვის ხაზებს ამ მხრივ ცვლადი დაბვის ხაზებთან მკვეთრი უპირატესობები აქვთ:

1. მოცემული სიმძლავრის დროს როდესაც საჭირო ხდება ზემალაღი დაბვის გამოყენება, მუდმივი დაბვის გადამცემი ხაზის საყრდენები უფრო მცირე ზომისაა, ვიდრე ცვლადის. ეს გარემოება თავისთავად განაპირობებს მას, რომ მუდმივი დაბვის გადაცემის ტრასის სიგანეც ნაკლებია.
2. მუდმივი დენის ხაზის მაგნიტური ველის დაბაბულობა ტრასის სიახლოვეს სიდიდით დედამიწის მაგნიტური ველის თანაზომადია.

3. მონოპოლარული რეჟიმის დროს, თუ დენის დაბრუნების გზად მიწაა გამოყენებული, ამან შეიძლება გამოიწვიოს კომპასების არასწორი მოქმედება. ამიტომ როგორც წესი გამოიყენებენ მეტალურ დაბრუნებას კაბელის სახით, რომელიც შეძლებისდაგვარად ახლოსაა ძირითად გამტართან მაგნიტური ველის ეფექტური ჩახშობის მიზნით.

თავი II

მუდმივი დენის ჩანართის მოქმედების პრინციპი და მის მიერ გენერირებული ჰარმონიკები

2.1 მუდმივი დენის ჩანართის დადებითი მხარეები

ტიპიური მუდმივი დენის ჩანართი შეიცავს ორ კონვერტორს რომლებიც ერთმანეთთან ახლოს, ანუ ერთ ქვესადგურშია მოთავსებული და ერთმანეთს უკავშირდებიან მუდმივი ძაბვის სალტეებით.

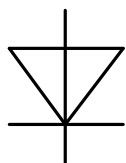
საქართველოსა და თურქეთის ელექტრული სისტემები წარმოადგენენ დამოუკიდებელ ერთეულებს და მათ შორის კავშირი გაცილებით მარტივად განხორციელდება მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით ტრადიციულ კავშირთან შედარებით (კავშირი ცვლადი ძაბვის ხაზით). ასეთი კავშირი იძლევა რიგ უპირატესობებს:

- ცხელ რეზერვში მონაწილეობის მიღება;
- კრიტიკული მდგომარეობის ან გაუთვალისწინებელი შემთხვევის დროს სიმძლავრის მიმოცვლა სისტემებს შორის;
- არსებული გენერაციის უკეთესი ეფექტური გამოყენება ორივე სისტემაში;
- გადადინების სწრაფი რეგულირების საშუალება ერთ ერთი სისტემის სიხშირით ან სიხშირის წარმოებულთ;
- და სხვა.

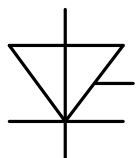
2.2 მუდმივი დენის ჩანართის კონვერტორის ვენტილები

HVDC კონვერტორის ძირითადი დეტალი არის ვენტილი ან ვენტილური მხარი. ვენტილური მხარი არაკონტროლირებადია თუ იგი აგებულია მიმდევრობით ჩართული დიოდებით და კონტროლირებადია თუ აგებულია მიმდევრობით ჩართული ტირისტორებით. ნახ.2 - ზე ნაჩვენებია საერთაშორისო ელექტროტექნიკური სტანდარტის (International

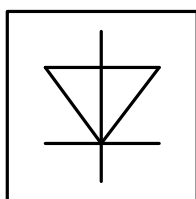
Electrotechnical Commission - IEC) მიხედვით ვენტილებისა და ვენტილური ხიდების აღნიშვნები.



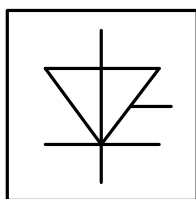
არააქართვადი ღებჩიონი ახ ღებჩილოური მხარი



მართვადი ღებჩიონი ან ღებჩილოური მხარი



არააქართვადი ხიონი ახ ღებჩილოური ჳჟოთი



მართვადი ხიონი ან ღებჩილოური ჳჟოთი

ნახ. 2 ვენტილებისა და ვენტილური ხიდების აღნიშვნები

სტანდარტული ვენტილური ხიდის ერთ ვენტილში შეიძლება იგულისხმებოდეს მიმდევრობით ჩართული რამდენიმე ტირისტორი ან დიოდი. როდესაც ელექტრული სიმძლავრის ნაკადი მიემართება ცვლადი დაბვის ქსელიდან ვენტილური ჯგუფისკენ (ვენტილური ხიდი), მაშინ იგი მუშაობს გამართვის რეჟიმში ხოლო როდესაც პირიქით მაშინ ინვერსიის რეჟიმში. თითოეულ ვენტილში რამდენიმე ელექტრონული გასაღების ჩართვა ნაკარნახებია მაღალი უკუ დაბვით, რომელზეც ერთი ერთეული გასაღების დამზადება ჯერ-ჯერობით შეუძლებელია. ვერცხლისწყლიანი ვენტილების ეპოქაში 6 პულსიანი სქემა წარმოადგენდა ტრადიციულს, მაგრამ დღეს იგი მძლავრი კავშირებისას პრაქტიკულად არ გამოიყენება. თანამედროვე ენერგეტიკულ სისტემების კონვერტორებში ყველაზე

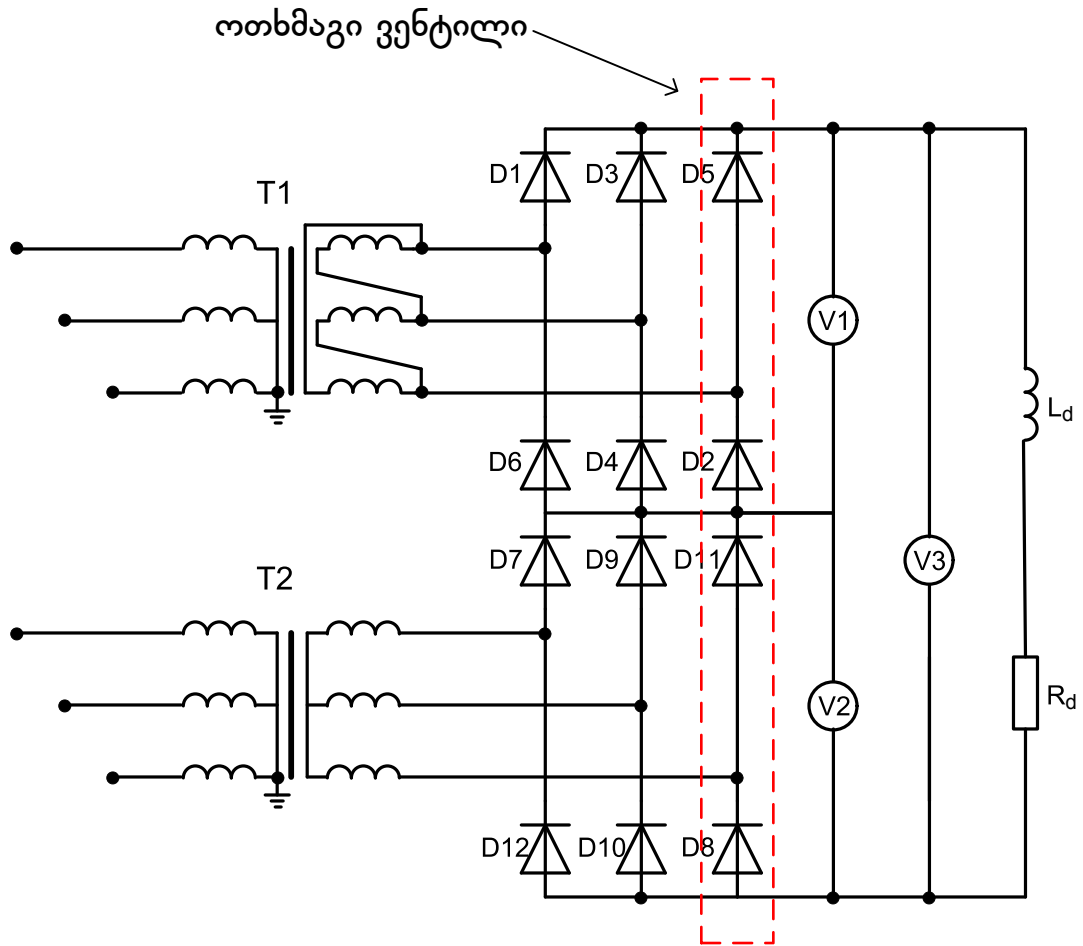
გავცრცვლებულია 12 პულსიანი სქემა. სწორედ ასეთი ტიპისაა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართიც [7].

აქვე აუცილებელია აღინიშნოს რომ როდესაც კონვერტორული კავშირი განსაკუთრებით მძლავრია და ათასობით მგვტ-ს შეადგენს, 12-პულსიანი სქემა გამოუსადეგარი ხდება და მიმართავენ 24-პულსიანი სქემის გამოყენებას. ამას აკეთებენ ჰარმონიკული თვალთახედვით, რადგან რაც მეტია სქემაში პულსების რაოდენობა ერთი და იგივე დატვირთვისას დაბევებისა და დენების დამახინჯების კოეფიციენტები, როგორც მუდმივი, ასევე ცვლადი დაბვის მხარეს მცირეა.

2.3 12-პულსიანი ვენტილური ჯგუფი და შესაბამისი ჰარმონიკები

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ თითქმის ყველა HVDC კონვერტორი, რომელშიც გამოყენებულია ტირისტორები, აწყობილია 12-პულსიანი ხიდის (ბოგის) სახით. ასეთი ტიპის კონვერტორებს აქვთ ორი სამფაზა მკვებავი ორგრაგნილა ტრანსფორმატორი, რომელთაგან ერთ-ერთის მეორეული გრაგნილი შეერთებულია ვარსკვლავად ხოლო მეორისა სამკუთხედად. შესაბამისად ცვლადი დაბვები, რომლებიც უშუალოდ კვებავენ ორ სამფაზა 6-პულსიან ხიდს, დაძრულნი იქნებიან 30 გრადუსით. ორი ასეთი ხიდის მიმდევრობითი ჩართვა ქმნის 12-პულსიან სქემას. ასეთი სქემა უპირატესია, რადგან იწვევს ცვლადი დაბვის წრედში მე-5 და მე-7 რიგის დენის ჰარმონიკების და მუდმივი დაბვის წრედში მე-6 რიგის დაბვის ჰარმონიკის ჩახშობას. ეს საბოლოო ჯამში აისახება ჰარმონიკული ფილტრების მნიშვნელოვან ეკონომიაში. ჰარმონიკების ჩახშობის საკითხები და ჰარმონიკული ანალიზი განიხილება III თავში.

ნახ.3-ზე ნაჩვენებია წითელი კონტური ვენტილთა ჯგუფის გარშემო, რომელსაც აქვს სვეტის ფორმა და შეიცავს ვერტიკალურად ჩამწკრივებულ ოთხ ვენტილს. ასეთ სვეტებს “ოთხმაგ ვენტილს” უწოდებენ და აწყობენ ერთ ვენტილურ სტრუქტურად ოთხი ვენტილის მიმდევრობითი ჩალაგებით.



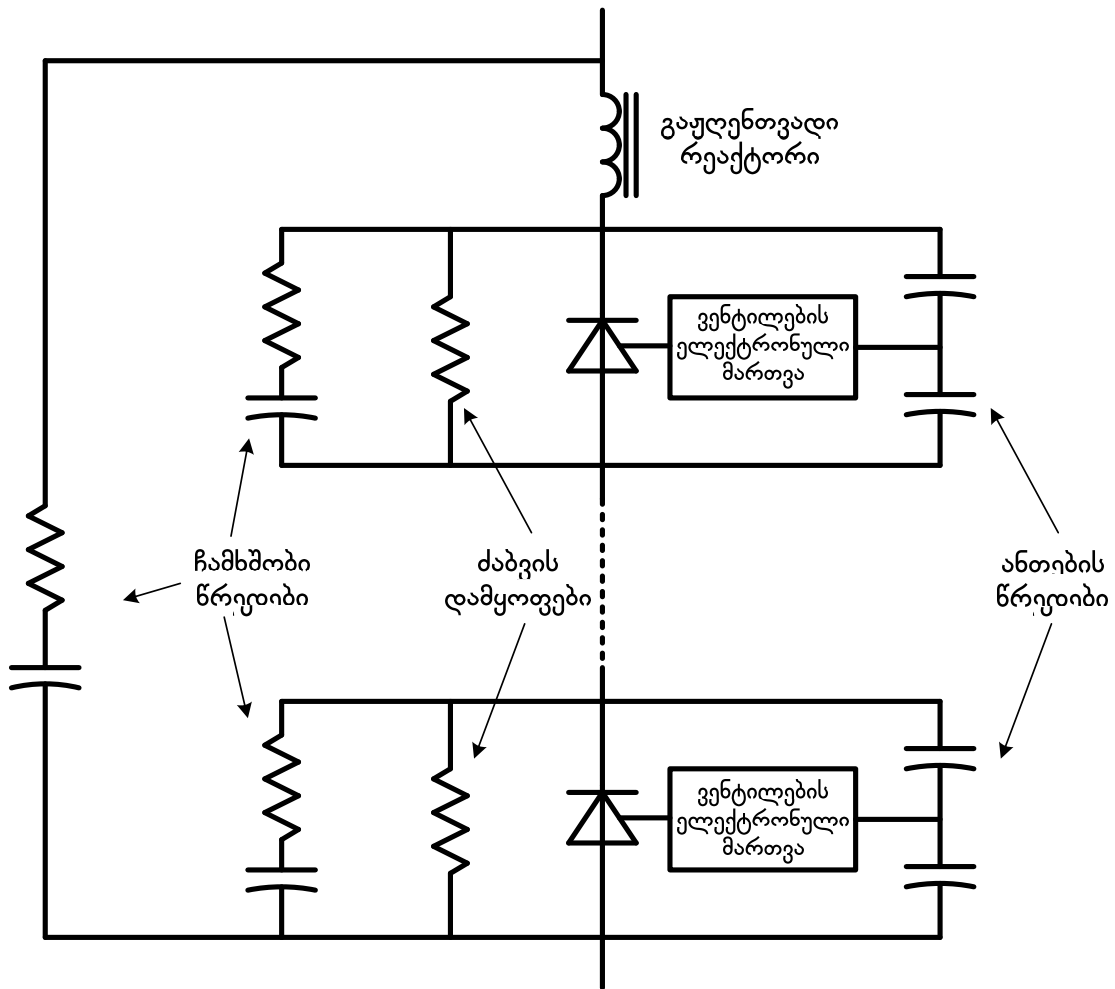
ნახ. 3 ოთხმაგი ვენტილის სტრუქტურა

თანამედროვე ტირისტორების დასაშვები უკუ ძაბვა რამდენიმე კილოვოლტის ფარგლებშია, ამიტომ 400 კვ ძაბვის ოთხმაგი ვენტილი შესაძლოა შეიცავდეს ათეულობით მიმდევრობით ჩართულ ტირისტორს, მიმდევრობითი ჯგუფების, ან ტირისტორული მოდულების სახით. ოთხმაგი ვენტილი მაღალ ძაბვაზე ფიზიკურად საკმაოდ მაღალი გამოდის და ხშირად მისი სიმაღლე იზღუდება შენობის სიმაღლით, ან სეისმური კუთხით სეისმურად აქტიურ რეგიონებში [17].

2.4 ტირისტორული მოდული

ქვესაღგურ “ახალციხეში” გამოყენებული ჩანართის ტირისტორული მოდული წარმოადგენს მიმდევრობით ჩართულ ტირისტორებს და აგრეთვე

შეიცავს გამაგრებულ რადიატორებს, მაღალი ძაბვის იმპულსების ჩამხშობ წრედებს და მართვის წრედებს. მისი დიზაინი როგორც წესი გათვლილია რემონტზე, რათა დაზიანების შემთხვევაში მარტივი იყოს მისი შეცვლა და აღდგენა. ასეთი ტიპის მოდული ნახ.4-ზეა ნაჩვენები დამხმარე წრედებთან ერთად.



ნახ. 4 ჩანართის ტირისტორული მოდული

2.5 ქვესადგურის კონფიგურაცია

მუდმივი დენის ჩანართის ქვესადგურის ძირითად მონაცობილობას ტირისტორული კონვერტორები წარმოადგენენ, რომლებიც როგორც წესი ვენტილურ დარბაზში არიან მოთავსებული. ტიპური ქვესადგურის სქემა

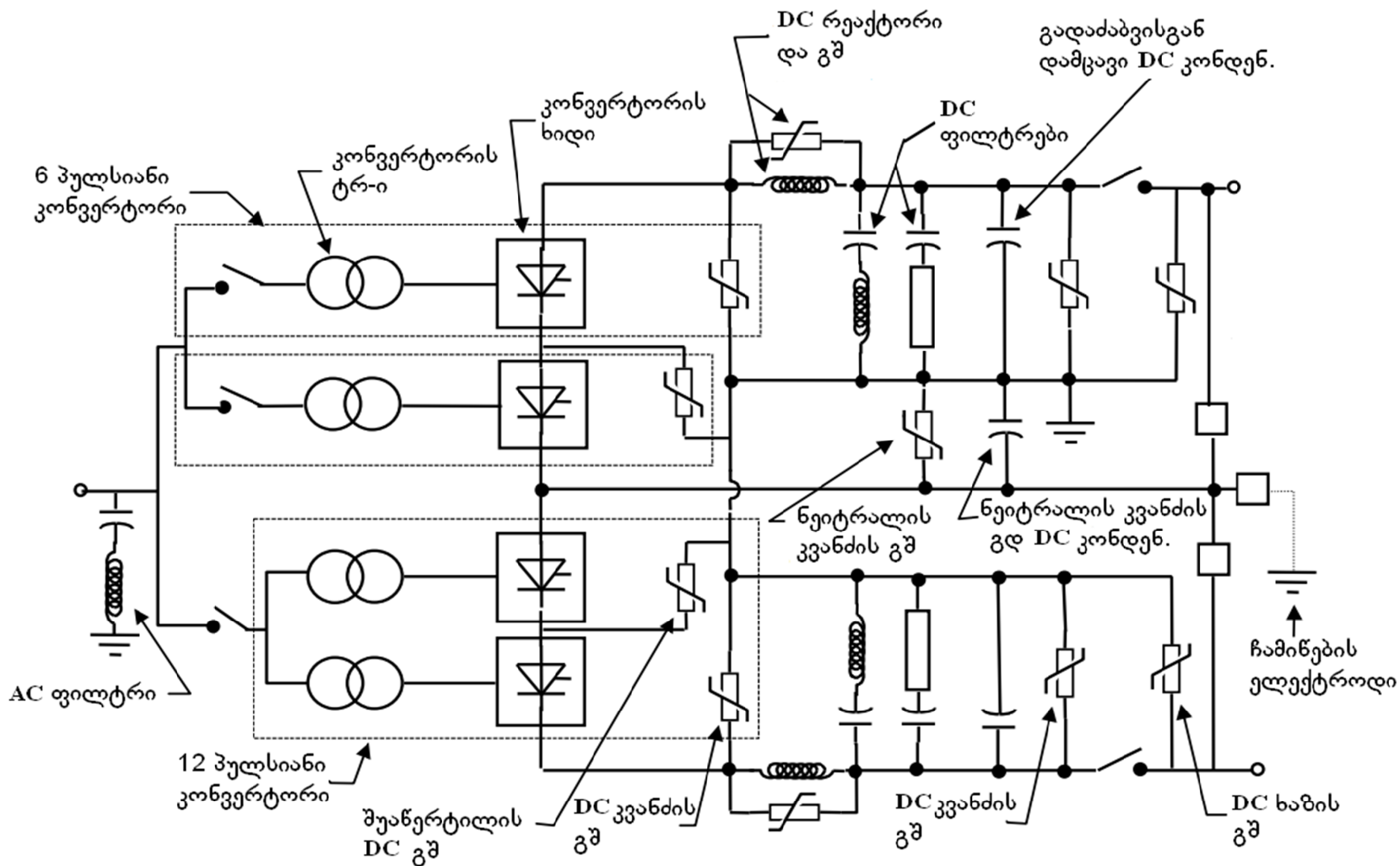
მე-5 ნახაზზე ნაჩვენებია. ამ ნახაზზე განხილულია ბიპოლარული კონფიგურაცია.

ასეთ ქვესადგურში ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ელემენტი კონვერტორის მკვებავი ტრანსფორმატორია. მისი დანიშნულებაა მოახდინოს ქსელის ძაბვის ტრანსფორმაცია ხიდის მკვებავ ცვლადი ძაბვის სიდიდემდე. იგი მზადდება ცალფაზა ან სამფაზა შესრულების (მძლავრი კავშირებისას ძირითადად გამოიყენება ერთფაზა შესრულება, რაც ამალღებს საიმედოობას და აადვილებს ტრანსპორტირებას) და გააჩნია დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულატორი. მეორეული ძაბვა და ფილტრების კვანძის ძაბვა კონტროლდება ამ რეგულატორის საშუალებით. იგი განთავსებულია ტრ-ის მეორეულ გრაგნილზე, მაღალი ძაბვის მხარეს და მესამეული გრაგნილის არსებობის პირობებში ეს გარანტიას იძლევა, რომ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი მკვებავ გრაგნილსა და მესამეულ გრაგნილს შორის იქნეს დაფიქსირებული. დენები ტრანსფორმატორის გრაგნილებში შეიცავენ თითქმის ყველა რიგის ჰარმონიკებს. აქედან გამომდინარე, ისინი სამრეწველო სიხშირის გარდა გათვლილია მაღალი რიგის ჰარმონიკებზე, რათა არ მოხდეს მათი ჭარბი გახურება.

კონვერტორის ტრანსფორმატორის მესამეული გრაგნილის არსებობა საშუალებას იძლევა კონვერტორის კვება განხორციელდეს დამოუკიდებელი ენერგეტიკული ობიექტიდან.

ტრანსფორმატორების მუდმივი ძაბვის გრაგნილები მიერთებულია კონვერტორულ ხიდებთან. ისინი განლაგებულია ღია გამანაწილებელ მოწყობილობაში და, თუ კონვერტორული ხიდები ვენტილურ დარბაზშია მოთავსებული, მაშინ ეს შეერთება ხდება დარბაზის კედლის გავლით. ამის მიღწევა შესაძლებელია ორი გზით:

1. იზოლირებული სალტეებით, სადაც გამტარი იზოლირებულია სასალტეო არხის კედლებისგან ზეთით ან ელევანით და
2. კედლის შემყვანი იზოლატორით. თუ მუდმივი ძაბვა 400 კვ-ს სცილდება მაშინ კედლის შემყვანი იზოლატორებს მოეთხოვებათ სპეციალური დიზაინი, რათა თავიდან იქნას აცილებული გარე ან შიდა იზოლაციის გარღვევა.



ნახ.5 მუდმივი დენის ჩანართის ტიპური ქვესადგურის სქემა

კონვერტორის რეაქტორი ასევე ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კომპონენტია ქვესადგურის სქემაში. მისი ძირითადი ფუნქციაა მუდმივი დენის გაგლეუება და მცირე დატვირთვის პირობებში მუდმივი დენის უწყვეტობის შენარჩუნება, რათა არ მოხდეს კომუტაციური ჩაშლა. მათი ჩართვა როგორც წესი ხდება ყველა პოლუსში.

ჰარმონიკული ფილტრები საჭიროა, როგორც ცვლადი ძაბვის, ასევე მუდმივი ძაბვის მხარესაც, მაგრამ უნდა აღინიშნოს რომ ცვლადი ძაბვის ფილტრები გაცილებით საპასუხისმგებლო ელემენტებია, რამდენადაც ქსელში შეჭრილი ჰარმონიკების მინიმუმაცია სწორედ მათი მოვალეობაა.

6-პულსიანი კონვერტორებისთვის ცვლადი ძაბვის მხარეს წარმოიქმნება მახასიათებელი ჰარმონიკები $6n \pm 1$, ხოლო 12-პულსიანისთვის $12n \pm 1$, სადაც $n=1, 2, 3$ და ა.შ. 12-პულსიანი სქემისთვის ცვლადი ძაბვის ფილტრები როგორც წესი გაიწყობა მე-11, მე-13, 23-ე, 25-ე რიგის ჰარმონიკებზე. მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკული ფილტრები საჭიროა მაშინ, თუ 12-პულსიან სქემას უწევს 6-პულსიან რეჟიმში მუშაობა. ჰარმონიკული ფილტრები ცვლადი ძაბვის სალტეებზე შეიძლება მიერთებული იყოს ან ამომრთველებით ან პირდაპირ გამთიშველებით, ისინი გარდა ფილტრაციისა ასრულებენ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ფუნქციასაც, რამდენადაც ფუნდამენტალურ სიხშირეზე გენერირებენ გარკვეულ რეაქტიულ სიმძლავრეს. პარალელური რეზონანსი როგორც წესი წარმოიქმნება ხოლმე ფილტრების კონდენსატორებსა და ცვლადი ძაბვის სისტემის ინდუქციურ წინაღობას შორის. განსაკუთრებულ შემთხვევებში, როდესაც ასეთი რეზონანსი გვაქვს საჭირო ხდება დამატებით დაბალი რიგის ჰარმონიკული ფილტრების დაყენება მე-2 ან მე-3 რიგის ჰარმონიკაზე, მაშინაც კი როდესაც სისტემა მუშაობს 12-პულსიან რეჟიმში. ასეთი გადაწყვეტა რეზონანსული კონტურის წარმოქმნის თავიდან აცილების ერთ-ერთი ეფექტური გზაა.

6-პულსიანი კონვერტორისთვის მუდმივი ძაბვის მხარეს წარმოიქმნება მახასიათებელი ჰარმონიკები $6n$ რიგის, ხოლო 12-პულსიანისთვის $12n$ რიგის.

მუდმივი ძაბვის ტევადური ფილტრების ძირითადი დანიშნულებაა ძაბვის გაგლუვება მუდმივი ძაბვის სალტეზე. აღნიშნული ფილტრები ახდენენ მუდმივი ძაბვის სალტეზე წარმოქმნილი ჰარმონიკების ჩახშობას. ასეთ ფილტრებს განსაკუთრებული ყურადღება ექცევათ მაშინ, როდესაც მუდმივი დენის ჩანართის ნაცვლად სისტემები ერთმანეთს უკავშირდებიან მუდმივი დენის ხაზით, რადგან ხაზზე წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები იწვევენ რადიოხელშეშლებს.

გადაძაბვის შემზღუდველები (გშ) განსაზღვრულია ყოველი ვენტილის, ყოველი ვენტილური ხიდის და, ასევე, მუდმივი და ცვლადი ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობების გადაძაბვისაგან დასაცავად. მათი დანიშნულებაა ჩამოთვლილი ელემენტების დაცვა ნებისმიერი სახის გადაძაბვის წარმოქმნისას. ისინი აგრეთვე გამოიყენება ფილტრების გადაძაბვისაგან დასაცავად. თანამედროვე HVDC ქვესადგურებში გამოიყენება ლითონის ოქსიდის შემზღუდველები, რომელთა შერჩევაც ხდება იზოლაციის კოორდინაციის პროცესში.

2.6 კონვერტორის მოქმედების პრინციპი

6-პულსიანი კონვერტორული ხიდი წარმოადგენს HVDC კონვერტორის საბაზისო ერთეულს, რომელშიც სიმძლავრე მიედინება ცვლადი ძაბვის მხრიდან მუდმივი ძაბვის მხარეს როდესაც ის მუშაობს გამართვის რეჟიმში და, პირიქით, როდესაც ის მუშაობს ინვერტირების რეჟიმში. ტირისტორული მოდულები მუშაობენ როგორც ელექტრონული გასაღებები. ისინი იხსნებიან მართვის იმპულსის მოსვლისას და იკეტებიან მაშინ, როდესაც დენი მათში უტოლდება ნულს. ამიტომ ასეთ კონვერტორებს უწოდებენ ქსელით კომუტირებადს, რადგან კომუტაციას განსაზღვრავს ქსელის ძაბვა.

2.6.1 კომუტაცია

“ახალციხის” ქვესადგურის კლასიკურ HVDC სისტემაში გამართვისა და

ინვერტირების პროცესები სრულდება ქსელის დაბვით, ანუ ბუნებრივი კომუტაციის პირობებში, რაც იმას ნიშნავს რომ ვენტილის ჩასაკეტად გამოყენებულია ქსელის დაბვა. ასეთი კომუტაციისას ცვლადი დაბვები, როგორც გამმართველის, ისე ინვერტორის მხარეს უზრუნველყოფილი უნდა იყოს ელექტრული ქსელის მიერ. სისტემის ნორმალური მუშაობისათვის აუცილებელია დაცული იყოს სამი ფაზის სიმეტრია და სინუსოიდურობა.

ვენტილების კომუტაცია არის პროცესი, როდესაც დენი გადადის კოვერტორის ერთი რომელიმე ვენტილიდან მეორეზე და ამ პროცესის განმავლობაში ორივე ეს ვენტილი ღიაა.

გამართვის პროცესში თითოეული ვენტილი იწყებს დენის გატარებას, მაშინ, როდესაც ის იღებს მართვის იმპულსს და ამავდროულად პირდაპირი დაბვის მყისა მნიშვნელობა ხდება მეტი, ვიდრე ვენტილისა, რომელიც მანამდე ატარებდა დენს. დენის შეცვლა მყისიერად არ ხდება, რადგან კომუტაციის პროცესი მიმდინარეობს ტრანსფორმატორის გრანგის ანუ გარკვეული ინდუქტივობის გავლით. ტრანსფორმატორის ფანტვის ინდუქციური წინაღობა წარმოადგენს საკომუტაციო ინდუქციურ წინაღობას. ეს წინაღობები გამმართველისთვის და ინვერტორისთვის ნაჩვენებია ნახ.6 – ზე და აღნიშნულია ეკვივალენტური X_C - თი. უნდა აღინიშნოს, რომ შემდეგ თავში განხილული მოდელირებისას ჩვენ არ ვიყენებთ ინდუქციური წინაღობის ეკვივალენტირებას, რადგან მკვებავი ტრანსფორმატორების მოდელები შეყვანილი გვაქვს დამოუკიდებელ ერთეულებად.

ვენტილების დენების ჯამი მუდმივი დაბვის მხარეს გვაძლევს მუდმივ დენს, რომელიც გაედინება მუდმივი დაბვის რეაქტორების გავლით და ეს დენი საკმაოდ გაგლუვებულია რეაქტორისა და ტრანსფორმატორის ინდუქტივობების გავლენით [14].

ინვერტორულ ვენტილებს ჩართვა და დენის გატარება შეუძლიათ მხოლოდ მაშინ, როდესაც დადებითი მუდმივი დაბვა მუდმივი დაბვის წრედის მხრიდან მეტია, ვიდრე ქსელის საკომუტაციო დაბვიდან მიღებული უკუ დაბვა ინვერტორზე.

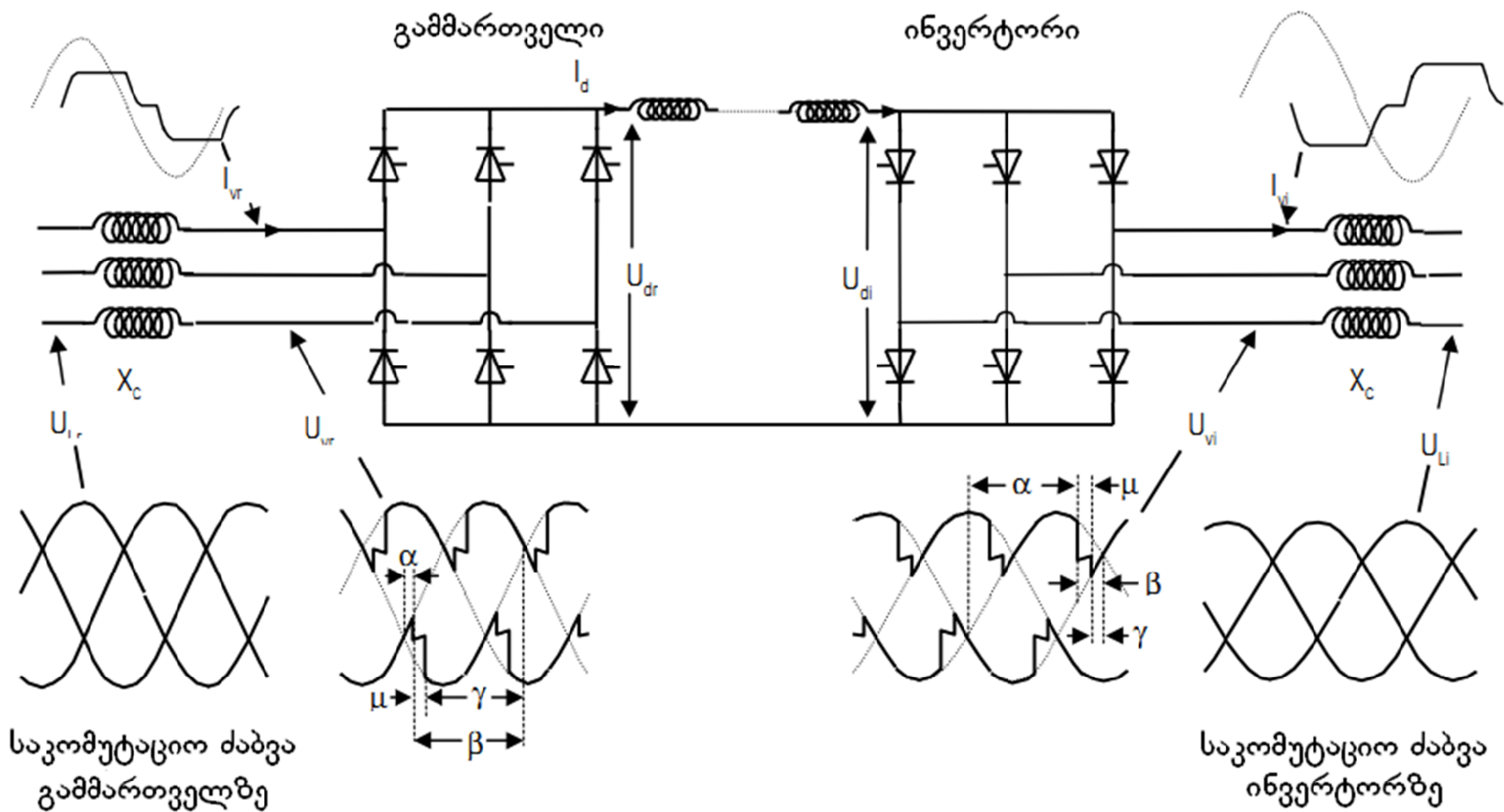
კომუტაციური პროცესების გამო გამმართველი ქსელიდან მოითხოვს არასინუსოიდურ დენს და ასეთივე დამახინჯებულ დენს აწვდის ინვერტორი მიმღებ ქსელს. ეს დენები გარდა ფუნდამენტალური 50 ჰერციანი შემდგენისა შეიცავენ მაღალი რიგის ჰარმონიკებსაც და, სწორედ, მათი გამონწვეულია სინუსოიდური ძაბვის დამახინჯება ორივე სისტემის ცვლადი ძაბვის სალტეებზე. ცვლადი ძაბვის ფილტრები, რომლებიც მონტაჟდება ტრანსფორმატორების პირველადი გრაგნილების მხარეს, ამ ჰარმონიკებისთვის ქმნიან დაბალ წინააღობიან არხებს და ამ გზით გარკვეულწილად ამცირებენ დამახინჯების დონეს [14,17].

ქსელით კომუტირებად HVDC სისტემებში სიმძლავრის ნაკადის რევერსირება შეუძლებელია განხორციელდეს მუდმივი დენის მიმართულების შეცვლით. ვენტილებს დენის გატარება შეუძლიათ მხოლოდ ერთი მიმართულებით. ამიტომ რევერსის განხორციელება ასეთ სისტემებში შესაძლოა მოხდეს მხოლოდ მუდმივი ძაბვის პოლარობის შეცვლით. კონვერტორული ხიდების ორმხრივი მუშაობა, როგორც გამართვის ის ინვერტირების რეჟიმში მიიღწევა ტირისტორების მართვის კონტროლით.

2.6.2 კონვერტორის ხიდის კუთხეები

ნახ.6-ზე ნაჩვენებია რამდენიმე ელექტრული კუთხე, რომლებიც განსაზღვრავენ კონვერტორული ხიდების მუშაობას. ეს კუთხეები იზომება ვენტილების მკვებავ სამფაზა ძაბვებზე. ისინი ეკუთვნიან გამმართველსაც და ინვერტორსაც.

დაყოვნების კუთხე α . ეს არის დრო სინუსოიდის ნულზე გადასვლის მომენტიდან ვენტილში პირდაპირი დენის გავლის დაწყებამდე, გამოსახული ელექტრულ კუთხეებში. ეს კუთხე კონტროლდება მართვის ელექტროდზე მიწოდებული იმპულსების საშუალებით. თუ ეს კუთხე ნაკლებია 90° - ზე, მაშინ კონვერტორული ხიდი არის გამმართველი, ხოლო თუ მეტია 90° - ზე, მაშინ იგი წარმოადგენს ინვერტორს.



ნახ.6 კომუტაციური პროცესები მუდმივი დენის ჩანართში

წინსწრების კუთხე β . დრო პირდაპირი დენის გავლის მომენტიდან საკომუტაციო ძაბვის სინუსოიდის ნულთან გადაკვეთის მომენტამდე. წინსწრების კუთხე β გრადუსებში დაკავშირებულია დაყოვნების კუთხე α – სთან შემდეგი ფორმულით :

$$\beta = 180 - \alpha \quad (1)$$

გადაფარვის კუთხე μ . კონვერტორის ორ ვენტილურ მხარს შორის კომუტაციის ხანგრძლივობა გამოსახული ელექტრულ გრადუსებში.

ქრობის კუთხე γ . დრო პირდაპირი დენის გავლის დასრულებიდან საკომუტაციო ძაბვის ნულთან გადასვლის მომენტამდე, გამოსახული ელექტრულ გრადუსებში. γ დამოკიდებულია წინსწრების კუთხე β – ზე და გადაფარვის კუთხე μ - ზე და განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (2)$$

2.6.3 კონვერტორული ხიდის განტოლებები დამყარებულ რეჟიმში

ამ ქვეთავში განვიხილავთ ჩანართის დამყარებული რეჟიმის იმ განტოლებებსა და ფორმულებს, რომელთა საშუალებითაც მოვახდინეთ მუდმივი დენის ჩანართის კომპიუტერული მოდელირება PSS/E–ში და AS–ში.

ნ-პულსიანი კონვერტორული ხიდის საკომუტაციო რეაქტანსის გამოსახვა უფრო მოსახერხებელია ფარდობით ერთეულებში კონვერტორული ტრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრესთან :

$$S_N = \sqrt{2} U_{VN} I_{dN} \quad (3)$$

სადაც, I_{dN} ნომინალური მუდმივი დენია. U_{VN} კი - ნომინალური ხაზური ძაბვა ტრანსფორმატორის მეორეულ გრადნილზე. ჩვეულებრივ კონვერტორული ხიდის ნომინალური სიმძლავრე გამოითვლება ნომინალური მუდმივი დენითა I_{dN} და ნომინალური მუდმივი ძაბვით U_{dN} . ვენტილების და კონვერტორული ხიდის დიზაინი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული საკომუტაციო რეაქტიულ წინააღობაზე და, შესაბამისად, ეს სიდიდე წინასწარ არის ცნობილი. თანამედროვე HVDC კონვერტორულ

ხიდეებში ის ჩვეულებრივ მოთავსებულია $0.1 < X_C < 0.15$ ზღვრებში, სადაც 1 ფარდობითი ერთეული არის $(U_{dN})^2 / S_N$ ომებში.

სიმძლავრის კოეფიციენტის განმსაზღვრელ მიახლოებით ფორმულას აქვს სახე:

გამმართველისთვის:

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha) - 0.5 X_C (I_d / I_{dN}) \quad (4)$$

სადაც I_d არის დატვირთვა მუდმივი დენის მხარეს, I_{dN} ნომინალური დენი, θ კი სიმძლავრის კოეფიციენტის კუთხე. უნდა აღინიშნოს, რომ დაყოვნების კუთხე α წინასწარ არის ცნობილი ან განსაზღვრული. მაგალითად, ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმში გამმართველისთვის ეს კუთხე შეიძლება იცვლებოდეს ზღვრებში $10^\circ < \alpha < 18^\circ$ და ყველაზე დაბალი სიმძლავრის კოეფიციენტი იქნება 18° -ის დროს.

ინვერტორისთვის:

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma) - 0.5 X_C (I_d / I_{dN}) \quad (5)$$

ჩვეულებრივ ინვერტორისთვის ნომინალური ქრობის კუთხე $\gamma = 18^\circ$. კონვერტორში, დანაკარგების გაუთვალისწინებლად, სიმძლავრის ნაკადი ხიდეში იქნება:

$$P_d = I_d U_d \quad (6)$$

სადაც I_d და U_d მუდმივი დენი და მუდმივი ძაბვაა შესაბამისად. კონვერტორის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე გამმართველის ან ინვერტორის მხარეს გამოითვლება ფორმულით:

$$Q_L = P_d \operatorname{tg}(\theta) \quad (7)$$

შესაძლოა, რომ კონვერტორის მკვებავი ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ხაზური ძაბვა ცნობილი არ იყოს, მაგრამ მისი გამოთვლა შესაძლებელია თუ ნომინალური სიმძლავრის კოეფიციენტი ხიდისათვის ცნობილია. მაშინ ნომინალური ხაზური ძაბვა ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილზე ტოლია:

$$U_{VN} = U_{dN} / [1.35 \operatorname{Cos}(\theta)] \quad (8)$$

ამის შემდეგ უკვე შესაძლებელი ხდება ტრანსფორმატორის სიმძლავრის გამოთვლა.

ხშირად აუცილებელია აგრეთვე განისაზღვროს გადაფარვის კუთხე μ . გამმართველისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ ქვემოთ მოყვანილი ფორმულა, როდესაც დაყოვნების კუთხე α , საკომუტაციო რეაქტანსი ფარდობით ერთეულებში X_C და დატვირთვის დენი I_d ცნობილი სიდიდეებია:

$$\cos(\alpha+\mu) = \cos(\alpha) - X_C I_d / I_{dN} \quad (9)$$

ანალოგიურად ინვერტორისთვის, ქრობის კუთხე γ ნორმალური რეჟიმისთვის როგორც წესი ცნობილია, ასე რომ:

$$\cos(\gamma+\mu) = \cos(\gamma) - X_C I_d / I_{dN} \quad (10)$$

დაყოვნების კუთხე ინვერტორისთვის თავისთავად შესაძლოა არ იყოს ცნობილი, მაგრამ რამდენადაც ქრობის კუთხე და გადაფარვის კუთხე განსაზღვრულია გვეყენება:

$$\alpha = 180^\circ - (\gamma + \mu) \quad (11)$$

თუ ცნობილია კონვერტორის ტრანსფორმატორის პირველადი გრავნილის ნომინალური ხაზური ძაბვა U_{LN} შესაძლებელია განვსაზღვროთ ნომინალური ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, რამდენადაც მეორეული გრავნილის ნომინალური ძაბვა U_{VN} უკვე განსაზღვრული გვაქვს:

$$TR_N = U_{VN} / U_{LN} \quad (12)$$

კონვერტორის მუშაობის განმავლობაში კონვერტორული ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულატორი არეგულირებს გამომყვანებით მეორეულ ძაბვას ისე, რომ გამმართველის დაყოვნების კუთხე იყოს ნორმალურ ზღვრებში. ანალოგიურად ინვერტორზე, ანცაფების გადართვა ხდება ისე, რომ ქრობის კუთხე შენარჩუნდეს სასურველ ზღვრებში. თუ ცნობილია მუდმივი ძაბვის და მუდმივი დენის სასურველი სიდიდეები, ნომინალური ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, ტრანსფორმატორის მკვებავი ქსელის მუშა ძაბვა და ქრობის კუთხე (ინვერტორისთვის) ან დაყოვნების კუთხე (გამმართველისთვის), მაშინ კონვერტორის ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ფარდობით ერთეულებში იანგარიშება შემდეგი გამოსახულების საფუძველზე:

$$TR = \frac{U_d + U_{dN} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{X_C}{(2\cos(\varphi) - X_C)}}{1.35 TR_N U_L \cos(\varphi)} \quad (13)$$

სადაც X_C არის კონვერტორის ხიდის საკომუტაციო რეაქტანსი ფარდობით ერთეულებში და $\varphi = \alpha$ გამმართველისთვის და $\varphi = \gamma$ ინვერტორისთვის. I_{dN} ნომინალური მუდმივი დენია კი U_{dN} ნომინალური მუდმივი ძაბვა.

ზემოთ მოყვანილი ფორმულები წარმოადგენენ ნ-პულსიანი კონვერტორის ბაზაზე დაფუძნებული სისტემის ნორმალური რეჟიმის განტოლებებს. რაც შეეხება გარდამავალ პროცესებს, მათი ამსახველი განტოლებები გაცილებით რთულია და ჰარმონიკული ანალიზისთვის მათი განხილვა აუცილებლობას არ წარმოადგენს.

2.7 მოკლე შერთვის სიმძლავრის ინდექსი

ელექტრული ქსელის სიძლიერე HVDC სისტემის კვანძში შეიძლება განისაზღვროს მოკლე შერთვის ინდექსით (კოეფიციენტით), რომელიც აკავშირებს ერთმანეთთან მოკლე შერთვის დონესა (მგვა) და მუდმივი დენის სიმძლავრეს (მგვტ), როდესაც ცვლადი ძაბვა ნომინალურის ტოლია.

ცვლადი ძაბვის სალტეზე მიერთებული კონდენსატორები და ფილტრები ამცირებენ მოკლე შერთვის დონეს. ეფექტური მოკლე შერთვის კოეფიციენტი (effective short circuit ratio - ESCR) ამყარებს კავშირს ფილტრების და კონდენსატორების რეაქტიული სიმძლავრით შემცირებულ მოკლედ შერთვის დონესა და მუდმივი დენის სიმძლავრეს შორის ნომინალური ცვლადი ძაბვის დროს.

ცვლადი ძაბვის სისტემები სიძლიერის მიხედვით შეიძლება დაიყოს შემდეგ კატეგორიებად:

1. მძლავრი სისტემები მაღალი კოეფიციენტით : $ESCR > 3.0$
2. სისტემები დაბალი კოეფიციენტით : $3.0 > ESCR > 2.0$
3. სუსტი სისტემები ძალიან დაბალი კოეფიციენტით : $ESCR < 2.0$

საქართველოს ელექტროსისტემა ასეთი კლასიფიკაციით მიეკუთვნება მძლავრი სისტემების ჯგუფს, რადგან საშუალოდ თითქმის ყველა პერსპექტიულ რეჟიმში აღნიშნული კოეფიციენტი 3-ზე მეტია.

მაღალი ეფექტური მოკლე შერთვის კოეფიციენტის მქონე სისტემებში HVDC სისტემის მიერ აქტიური ან რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება იწვევს ქსელის ცვლადი ძაბვის მხოლოდ უმნიშვნელო ცვლილებას. აქედან გამომდინარე გარდამავალი პროცესში ამ კვანძში ძაბვის დამატებითი კონტროლისთვის არ არის აუცილებელი დამატებითი ღონისძიების გატარება. რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი ცვლადი ძაბვის სისტემასა და HVDC სისტემას შორის შეიძლება მიღწეულ იქნეს კომუტირებადი რეაქტიული ელემენტებით.

დაბალი და ძალიან დაბალი ESCR კოეფიციენტის მქონე სისტემებში HVDC სისტემაში მომხდარმა სიმძლავრის ცვლილებამ შეიძლება გამოიწვიოს ძაბვის რყევები ცვლადი ძაბვის ქსელში, რის აღმოსაფხვრელადაც აუცილებელია სპეციალური კონტროლის საკითხების დამუშავება. გარდამავალ პროცესში, როგორც წესი აუცილებელი ხდება რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლისთვის, HVDC კვანძში ან მის ახლოს ელექტრონულად მართვადი რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი ელემენტების ან სინქრონული კომპენსატორების დაყენება. ადრეულ წლებში იყენებდნენ მხოლოდ სინქრონულ კომპენსატორებს, შემდგომში კი შეიქმნა უფრო დახვეწილი და სწრაფი ელექტრონულად მართვადი SVC (static var compensator) ტიპის კომპენსატორები. მსგავსი პრობლემები მუდმივი დენის ჩანართის პირობებში მუშაობისას, როგორც ანგარიშებმა აჩვენა, საქართველოს ელექტროსისტემაში მოსალოდნელი არ არის.

2.8 კომუტაციური ჩაშლა

როდესაც კონვერტორული ხიდი მუშაობს ინვერტორულ რეჟიმში, ანუ წარმოადგენს ენერჯის მიმღებ ბოლოს, ვენტილი გამოირთვება მაშინ,

როდესაც პირდაპირი დენი ხდება ნულის ტოლი და მოდებული ძაბვა ხდება უარყოფითი.

კომუტაციური ჩაშლა ინვერტორულ რეჟიმში მომუშავე კონვერტორში შეიძლება გამოიწვიოს ჩამოთვლილ მიზეზთაგან რომელიმე:

1. როდესაც ინვერტორში შესული მუდმივი დენი იზრდება ამპლიტუდით იგი იწვევს გადაფარვის μ კუთხის გაზრდასაც, ქრობის γ კუთხე მცირდება და შესაძლოა მიაღწიოს ნერტილს სადაც ვენტილი ველარ მოახდენს ბლოკირებას.
2. როდესაც კონვერტორის მკვებავი ცვლადი ძაბვა ერთ ან მეტ ფაზაზე მცირდება, ან მახინჯდება ფორმით, შეიძლება მოხდეს ქრობის კუთხის შემცირება სიდიდემდე რომლის დროსაც კომუტაცია ვენტილებს შორის მოხდება წარუმატებლად.
3. კომუტაციური ჩაშლა ასევე შეიძლება გამოიწვიოს საკომუტაციო ძაბვის ფაზური კუთხის ძვრამ, რაც ხშირად ხდება ერთფაზა მოკლე შერთვის დროს რასაც თან ახლავს აგრეთვე ფაზის ძაბვის ამპლიტუდის შემცირება. ეს ორი ფაქტორი: ფაზის ძვრა და ამპლიტუდის შემცირება ყველაზე მეტად დომინირებს ჩაშლების ისტორიაში.
4. კომუტაციური ჩაშლის ალბათობა აგრეთვე დამოკიდებულია ავარიის წინა რეჟიმში ქრობის γ კუთხის სიდიდეზე, როგორც ჩვეულებრივ ინვერტორისთვის ის 18° – ის ფარგლებშია, მისი გაზრდა $25 - 30^\circ$ - მდე ან უფრო მეტად შეამცირებს ჩაშლის რისკს, რამდენადაც გაიზრდება ინვერტორზე რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნა.
5. ასევეა დამოკიდებული ავარიის წინ ვენტილური დენის სიდიდეზე. რაც უფრო დიდი იქნება ეს დენი, მით უფრო ადვილად მოხდება კომუტაციური ჩაშლა კონვერტორში.

საბოლოო ჯამში შეიძლება ითქვას, რომ თუ სისტემაში ძალიან იშვიათად ხდება ავარიები ცვლადი ძაბვის მხარეს ან ეს ავარიები დიდ ზეგავლენას ვერ ახდენს ძაბვებზე, მაშინ კომუტაციური ჩაშლის ალბათობა HVDC სისტემაში ძალიან მცირეა.

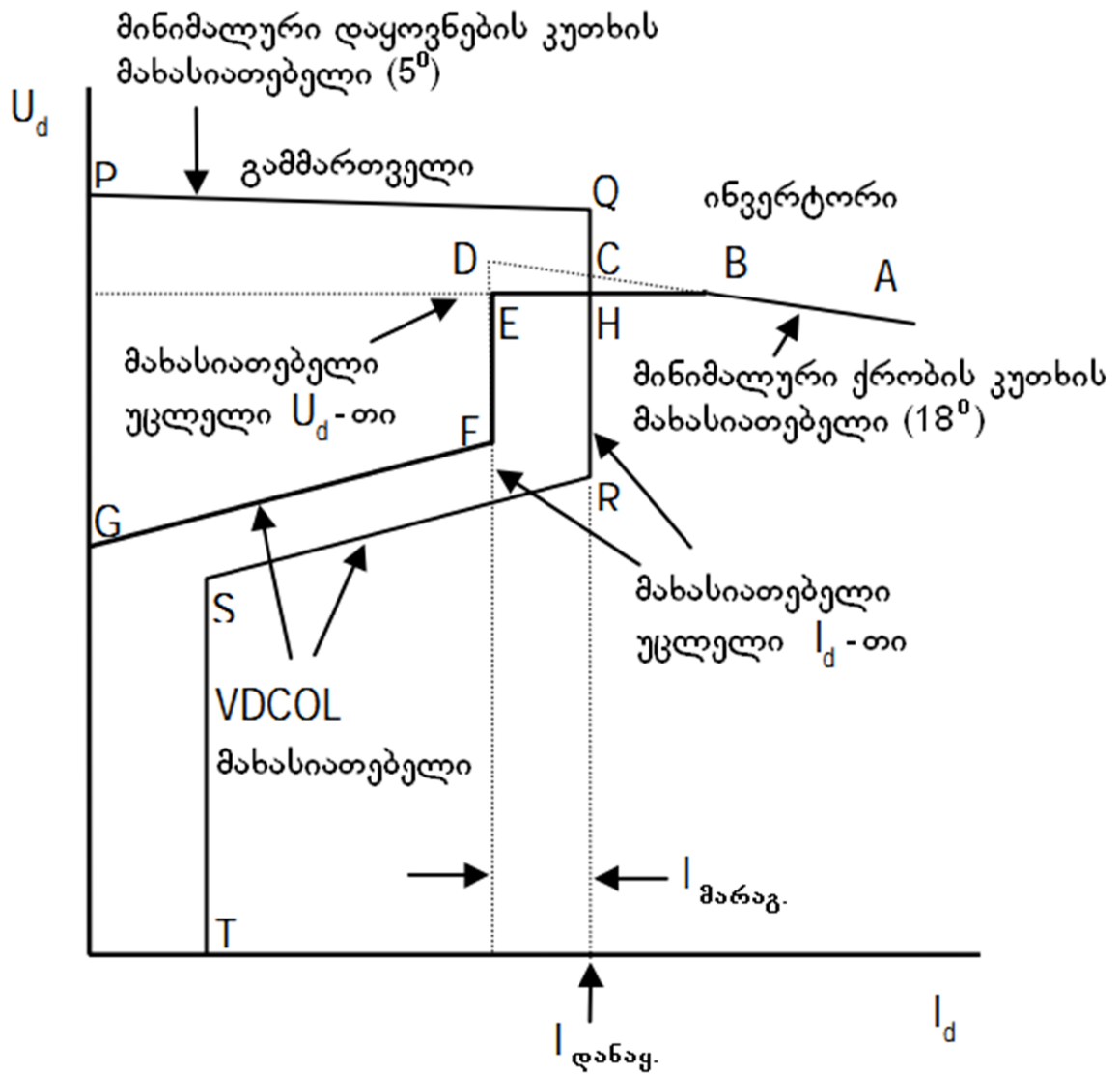
2.9 მართვა და დაცვა

HVDC სისტემას, როგორც წესი უწევს საკამოდ დიდი სიმძლავრეების გადაცემა, რისი მიღწევაც დახვეწილი კონტროლის სისტემის გარეშე შეუძლებელია.

მუდმივი ძაბვა და მუდმივი დენი დიდი სიზუსტითაა გაკონტროლებული, რათა გადაცემული სიმძლავრეც სასურველი გადასაცემი სიმძლავრის ძალიან ახლო ფარგლებში იყოს. აუცილებელია გადაცემის პროცესში უწყვეტად და ზუსტად ხდებოდეს კონვერტორული ხილის რეჟიმის პარამეტრების კონტროლი: მუდმივი ძაბვა, მუდმივი დენი დაყოვნების კუთხე გამმართველისთვის და ქრობის კუთხე ინვერტორისთვის.

ორტერმინალიანი მუდმივი დენის გადაცემის სისტემა უფრო ხშირად გვხვდება პრაქტიკაში და მათ აქვთ საკამოდ დახვეწილი კონტროლის ლოგიკა ნორმალური მუშაობის შესანარჩუნებლად. დამყარებულ რეჟიმში ინვერტორს ევალება მუდმივი ძაბვის კონტროლი. ერთის მხრივ ქრობის კუთხის მუდმივი სიდიდის დაჭერით მუდმივი დენის ზრდას მოყვება U_d მუდმივი ძაბვის ვარდნა, როგორც ეს ნაჩვენებია მინიმალური მუდმივი ქრობის კუთხის A – B – C - D მახასიათებელზე (ნახ.7). რაც უფრო სუსტია ელექტრული სისტემა ინვერტორის მხარეს, მით უფრო მკვეთრია ეს ძაბვის ვარდნა. მეორეს მხრივ ინვერტორს შეუძლია იმუშაოს მუდმივი ძაბვის მუდმივი სიდიდის შენარჩუნების B - H - E მახასიათებელზე. ეს ნიშნავს, რომ ქრობის კუთხე უნდა გაიზარდოს თავის მინიმალურ დანაყენზე მეტად.

თუ ინვერტორი მუშაობს მინიმალური ქრობის კუთხის მახასიათებელზე, ან მუდმივი ძაბვის კონსტანტა მახასიათებელზე, მაშინ გამმართველმა უნდა აკონტროლოს მუდმივი დენი I_d . ამის გაკეთება შესაძლებელია მანამდე, სანამ დაყოვნების კუთხე მიაღწევს თავის ქვედა ზღვარს (ჩვეულებრივ 5°). გამმართველის დამყარებული რეჟიმის უცვლელი დენის მახასიათებელი ნახაზზე ნაჩვენებია Q – C – H – R სექციით. წერტილი სადაც ინვერტორის და გამმართველის მახასიათებლები კვეთენ ერთმანეთს (C ან H) არის HVDC სისტემის მუშა წერტილი.



ნახ.7 მუდმივი დენის ჩანართის მახასიათებლები

მუშა წერტილის მდგომარეობა მიიღწევა კონვერტორების ტრანსფორმატორების დატვირთვის ქვეშ დაბვის რეგულატორების ანცაფების გადართვების საშუალებით. ინვერტორმა უნდა უზრუნველყოს U_d მუდმივი დაბვის სასურველი მუშა დონე კონვერტორის ტრანსფორმატორის ანცაფების რეგულირებით, თუ იგი მუშაობს მინიმალური ქრობის კუთხის მახასიათებელზე. ხოლო თუ მუშაობს უცვლელ U_d მახასიათებელზე, მაშინ დაბვის რეგულატორმა უნდა მიაღწიოს მუდმივი დაბვის საკონტროლო დონეს ისე, რომ ქრობის კუთხე იყოს ტოლი ან ოდნავ მეტი თავის მინიმუმზე (18° განხილულ შემთხვევაში).

გამმართველის ტრანსფორმატორის ძაბვის რეგულატორმა უნდა არეგულიროს ანცაფები ისე რომ დაყოვნების კუთხეს ჰქონდეს მუშა დიაპაზონი დაახლოებით $10^0 - 15^0$ - მდე, რათა დაიჭიროს მუდმივი დენის $I_{\text{დანაყ}}$ დანაყენის უცვლელი მნიშვნელობა. თუ ინვერტორი მუშაობს უცვლელ U_d მახასიათებელზე მუშა წერტილ $H - ში$ და $I_{\text{დანაყ}}$ გაიზრდება ისე, რომ მუშა წერტილი გადაინაცვლებს $H - ში$, ინვერტორი გადავა უცვლელი ქრობის კუთხის კონტროლის რეჟიმში და იმუშავებს $A - B$ მახასიათებელზე. მუდმივი ძაბვა იქნება სასურველ სიდიდეზე მცირე და ამიტომ ინვერტორის ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულატორი მხარეს აწევს მუდმივ ძაბვას მანამდე სანამ არ მიაღწევს სასურველ სიდიდეს.

ყველა HVDC სისტემას არ გააჩნია ისეთი უცვლელი მუდმივი ძაბვის მახასიათებელი როგორც ზემოთ აღვწერეთ ($B - H - E$), მის ნაცვლად უცვლელი მუდმივი ძაბვის რეჟიმის დაჭერა ხდება უცვლელი ქრობის კუთხის კონტროლის $A - B - C - D$ მახასიათებლითა და ტრანსფორმატორის ძაბვის რეგულატორის ანცაფების გადართვების საშუალებით.

2.10 დენის მარაგი

მუდმივი დენის $I_{\text{დანაყ}}$ დანაყენი გაგზავნილია როგორც გამმართველის, ასევე ინვერტორის მხარეს. როგორც წესი ინვერტორის მხარეს გაგზავნილ დენის დანაყენს აკლდება მცირე სიდიდე, და მას $I_{\text{მარაგ}}$ დენის მარაგს უწოდებენ (ნახ7). ინვერტორს ასევე გააჩნია დენის კონტროლერი და ის ცდილობს აკონტროლოს მუდმივი დენი $I_{\text{დანაყ}} - I_{\text{მარაგ}}$ სიდიდეზე, მაგრამ გამმართველის დენის კონტროლერი ნორმალურ რეჟიმში თავის თავზე იღებს მუდმივი დენის კონტროლს და ინვერტორის მცდელობა არიდებულია. ინვერტორის დენის კონტროლერი მხოლოდ მაშინ იწყებს მოქმედებას, როდესაც გამმართველი დენის კონტროლერი ვეღარ ახერხებს ამას, როდესაც დაყოვნების კუთხე თავის მინიმუმის ზღვარზეა მისული. ნახ.7-ზე გამმართველის მინიმალური დაყოვნების კუთხის მახასიათებელი $P - Q$ მონაკვეთითაა აღნიშნული. თუ რაიმე მიზეზის

გამო, ვთქვათ გამმართველზე საკომუტაციო ძაბვის დაბალი დონის გამო ჩამოვა D , ან E წერტილებზე უფრო ქვემოთ, მუშა წერტილი გადაინაცვლებს H – დან $D - E - F$ ვერტიკალური სექციის რომელიღაც წერტილში სადაც გადაიკვეთება ჩამონეული $P - Q$ მახასიათებელი. ინვერტორი უბრუნდება დენის კონტროლის რეჟიმს, და აკონტროლებს დენს $I_{დანაყ} - I_{მარაგ}$ სიდიდებზე, და გამმართველი ეფექტურად აკონტროლებს ძაბვას ვინაიდან იგი მუშაობს მინიმალური დაყოვნების კუთხის $P - Q$ მახასიათებელზე. კონტროლის ლოგიკა შესაძლებელია აიწყოს ისე, რომ გადასვლა დენის კონტროლისა გამმართველიდან ინვერტორზე მოხდეს ავტომატურად და მდორედ.

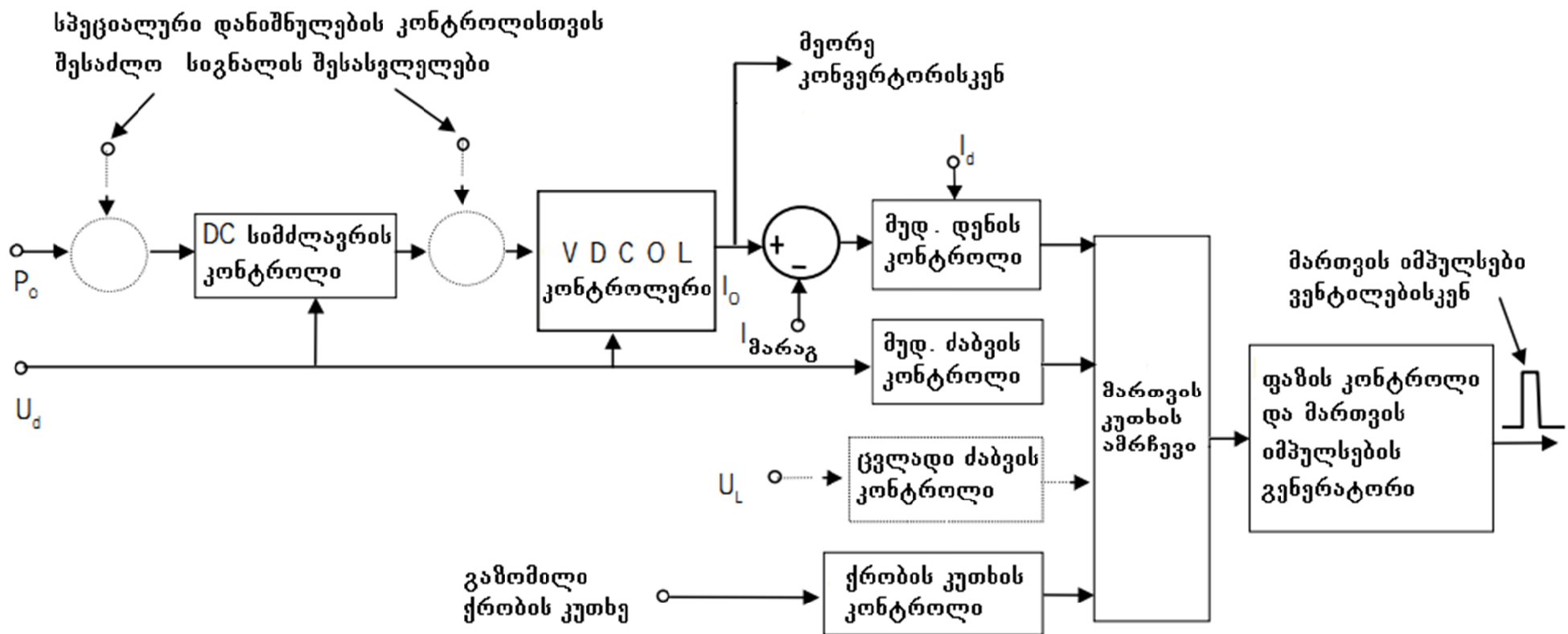
2.11 ძაბვაზე დამოკიდებული დენის დანაყენის ლიმიტი (VDCOL - Voltage Dependent Current Order Limit)

გამმართველის ან ინვერტორის მხარეს ცვლადი ძაბვის სისტემებში ავარიების დროს ცვლადი ძაბვის დონე როგორც წესი ეცემა და სუსტი ელექტრული სისტემისთვის გაუმართლებელი იქნება თუ ასეთ შემთხვევაში HVDC სისტემა შეეცდება სრული დატვირთვის დენის შენარჩუნებას. ძაბვის ჩავარდნა HVDC სისტემის ნებისმიერ ბოლოში ასევე გამოიწვევს ძაბვის დონის შემცირებას მუდმივი დენის წრედშიც. ეს პროცესი გამმართველის მახასიათებელზე შეესაბამება R-S-T უბანს, ხოლო ინვერტორის მახასიათებელზე F-G უბანს (ნახ.7). კონტროლერს, რომელიც უზრუველყოფს მაქსიმალური დენის დანაყენის შემცირებას უწოდებენ ძაბვაზე დამოკიდებული დენის დანაყენის ლიმიტის კონტროლერს, შემოკლებით VDCOL კონტროლერი. (ზოგჯერ უბრალოდ VDCOL) . VDCOL კონტროლი სისტემიდან მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე შეამცირებს მუდმივ დენს ქვედა ლიმიტამდე სანამ არ მოხდება ძაბვის აღდგენა. და მხოლოდ მაშინ, როდესაც მუდმივი ძაბვა დაუბრუნდება ნომინალურ სიდიდეს კონტროლერი დააბრუნებს დენს დავდაპირველ სიდიდებზე. ნახ.8 - ზე ნაჩვენებია HVDC სისტემის კონტროლის ლოგიკა.

2.12 ცვლადი დაბვის კონტროლი

HVDC სისტემის შეუფერხებელი და საუკეთესო მუშაობისთვის სასურველია რომ ცვლადი დაბვა საკომუტაციო კვანძებში შევინარჩუნოთ უცვლელი სიდიდის. ეს შედარებით ადვილადაა მიღწეული, თუ მოკლე შერთვის კოეფიციენტი მაღალია. დაბალი ან ძალიან დაბალი მოკლე შერთვის კოეფიციენტის შემთხვევაში სირთულეები წარმოიქმნება დატვირთვის შეცვლისას. დატვირთვის სწრაფმა ცვალებადობამ შეიძლება გამოიწვიოს საკომუტაციო კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე ან დეფიციტი, რაც შესაბამისად გადაძაბვას ან დაბვის დონის შემცირებას გამოიწვევს. როდესაც ცვლადი დაბვის სისტემა სუსტია დაბვის ცვალებადობა საკომუტაციო კვანძში შესაძლოა გადიოდეს დასაშვები ზღვებიდან. ასეთ შემთხვევაში ქვემოთ ჩამოთვლილი მიზეზების გამო გამოიყენება ცვლადი დაბვის კონტროლერი:

1. დინამიკური გადაძაბვების ლიმიტაცია და იმ ზღვრებში მოქცევა რომელიც ნაკარნახებია ქვესადგურის მონყობილობების სპეციფიკაციიდან და სტანდარტებიდან;
2. ფილტრების ან ტვირთის ჩართვა - გამორთვებით გამოწვეული დაბვის ფლუქტუაციისას კომუტაციური ჩაშლის არიდება;
3. ნორმალური რეჟიმის ალდგენის უნარიანობის გაზრდა სერიოზული სისტემური ავარიის შემდეგ;
4. კონტროლის სისტემის არასტაბილური მუშაობის არიდება, განსაკუთრებით მაშინ, როცა იგი მუშაობს ქრობის კუთხის კონტროლის რეჟიმში.



ნახ.8. HVDC - ის მართვის სისტემის ბლოკური დიაგრამა

სინქრონული კომპენსატორი წარმოადგენს ძაბვის კონტროლისთვის უპირატესობის მქონე მონწყობილობას, რამდენადაც იგი ასევე ზრდის მოკლე შერთვის კოეფიციენტს HVDC სისტემის კვანძში და მუშაობს როგორც რეგულირებადი რეაქტიული სიმძლავრის წყარო. მისი ძირითადი ნაკლია მაღალი დანაკარგები და მომსახურების ხარჯები. გარდა ამისა ძაბვის კონტროლისთვის არსებობს სხვა საშუალებებიც:

1. **ტირისტორების ბაზაზე დამზადებული სტატიკური კომპენსატორები.** მათ შეუძლიათ რეაქტიული სიმძლავრის სწრაფი კონტროლი ძაბვის სასურველი დონის მისაღწევად. ნაკლოვან მხარედ ითვლება ის რომ ისინი მოკლე შერთვის კოეფიციენტის გაზრდაში ვერ მონაწილეობენ;
2. **დაყოვნების კუთხის კონტროლი,** რომლის საშუალებითაც ხდება კონვერტორის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება;
3. **სპეციალური გაგრილების სისტემის მქონე მეტალის ოქსიდის ვარისტორების გამოყენება სწრაფად კომუტირებად შუნტური რეაქტორებთან, კონდენსატორებთან და ფილტრებთან.** მეტალის ოქსიდის ვარისტორები იცავენ HVDC ქვესადგურს დინამიკური გადაძაბვებისაგან, ხოლო რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი მონწყობილობების ჩართვით მიიღწევა რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი. ამის უარყოფითი მხარე არის ის, რომ ძაბვის კონტროლი არ არის უწყვეტი, რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლი ხდება დაყოვნებებით, რაც მექანიკური კომუტაციითაა გამოწვეული და მოკლე შერთვის კოეფიციენტი არ იზრდება;
4. **გაუდენტოვადი რეაქტორები გამოიყენება გადაძაბვების მოსახსნელად და რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის დასამყარებლად.** მოკლე შერთვის კოეფიციენტი არც ამ შემთხვევაში არ იზრდება;
5. **მიმდევრობითი კონდენსატორები (capacitor commutated converter (CCC)-კონდენსატორით კომუტირებადი კონვერტორი)** ზრდიან მოკლე შერთვის კოეფიციენტს და აუმჯობესებენ ძაბვის რეგულირებას საკომუტაციო კვანძში;

6. **სტატიკური კომპენსატორები (STATCOM)** კომუტაციისთვის იყენებენ ოროპერაციულ ტირისტორებს. ძირითადად მათ ვხვდებით ძაბვის წყაროს კონვერტორის მქონე HVDC სისტემებში და წარმოადგენენ ყველაზე სწრაფ საშუალებას ძაბვის კონტროლისათვის.

იმის გამო, რომ ცვლადი ძაბვის სისტემის და HVDC სისტემის ნებისმიერი კომბინაცია განუმეორებელი შემთხვევაა, ყველა ცალკეული კავშირისთვის აუცილებელია ძაბვის კონტროლის საკითხების ცალკე შესწავლა და დამუშავება.

2.13 სპეციალური დანიშნულების კონტროლი

არსებობს რამდენიმე სპეციალური დანიშნულების კონტროლერი, რომლებიც შეიძლება დაემატოს დანარჩენ კონტროლერებს, რათა მიღწეულ იქნას HVDC სისტემის სწრაფი რეაგირება ცვლადი ძაბვის სისტემაში სხვადასხვა სახის შეშფოთების ან ავარიის დროს. სწორედ ასეთი სპეციალური დანიშნულების კონტროლერები გვაქვს გამოყენებული მუდმივი დენის ჩანართის PSS/E მოდელში. ისინი შეიცავენ:

1. **ცვლადი ძაბვის სისტემის დემპფირების კონტროლი.** ელექტრულ სისტემაში ხშირად ხდება სიმძლავრის რყევები ელექტრომექანიკური რყევების გამო. ამ კონტროლერს შეუძლია მოახდინოს მუდმივი დენის სიმძლავრის ან მუდმივი დენის მოდულაცია ისე, რომ ცვლადი ძაბვის სისტემისთვის მივიღოთ დემპფირების ეფექტი. სისტემის სიხშირე და ძაბვის ფაზური კუთხე იზომება კონვერტორის ან ერთ ან ორივე ბოლოში და კონტროლერის ლოგიკას შესაბამისობაში მოჰყავს მუდმივი დენის სიმძლავრე;

2. **ცვლადი ძაბვის სისტემის სიხშირის კონტროლი.** ამ დანიშნულების ნელმოქმედ კონტროლერს შეუძლია არეგულიროს მუდმივი დენის სიმძლავრე ისე, რომ დაეხმაროს ცვლადი ძაბვის სისტემას სიხშირის რეგულირებაში. თუ გამმართველი და ინვერტორი ორ ასინქრონულ სისტემას აკავშირებენ ერთმანეთს, მაშინ კონტროლერს აქვს უნარი

სიხშირის დასარეგულირებლად მოახდინოს ერთი სისტემიდან მეორეში სიმძლავრის დამატებითი პორციის შეტანა ან უარეს შემთხვევაში შეუცვალოს კიდევ მიმართულება მუდმივი დენის სიმძლავრეს [14];

3. სიმძლავრის საფეხურებრივი რეგულირება. ასეთი რეგულირება გამოიყენება მაშინ როდესაც საჭიროა რომ HVDC სისტემამ მყისიერად მოხსნას ან აილოს სიმძლავრის რაღაც პორცია. ვთქვათ თუ ცვლადი ძაბვის სისტემის რელეურმა დაცვამ აღმოაჩინა, რომ რომელიმე გენერატორი ან ხაზი ავარიულად გამოირთო, სიგნალი შეიძლება გაიგზავნოს HVDC სისტემის კონტროლში, რომელიც შესაბამისად შეამცირებს სიმძლავრის ნაკადს ან დენს მუდმივი დენის წრედში ისეთ სიდიდემდე რომ დააკომპენსიროს ეს დანაკარგი. ასეთი კონტროლი რაღა თქმა უნდა აძლიერებს სისტემის დინამიურ მდგრადობას და მომხდარი შემფოთების მყისიერად ჩახშობასაც განაპირობებს;

4. ძაბვის შემცირების კომპენსაცია. ელექტრული სისტემის ზოგიერთი არეა ხშირად ხასიათდება ძაბვის დონის სისუსტით, თუ HVDC სისტემის ასეთ ადგილზე მუშაობს, კონტროლერს შეუძლია შეიგრძნოს ძაბვის შემცირება და მყისიერად შეამციროს მუდმივი დენი ან სიმძლავრე მუდმივი დენის წრედში, რასაც შედეგად მოჰყვება ძაბვის დონის ამაღლება ცვლადი ძაბვის ქსელში.

მიუხედავად იმისა, რომ საქართველოს ელექტროსისტემა ჩანართის სალტეზე მოკლე პერთვის კოეფიციენტის თვალთახედვით მძლავრი სისტემების ჯგუფს მიეკუთვნება, ხშირად გარდამავალ პროცესებში ადგილი აქვს ქსელში ძაბვის დონის მნიშვნელოვან დანევას, რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს სხვადასხვა ფაქტორით. ასეთ სიტუაციაში მეოთხე პუნქტში განხილული კონტროლი მაღალეფექტური საშუალებაა სიტუაციის გამოსწორებისთვის.

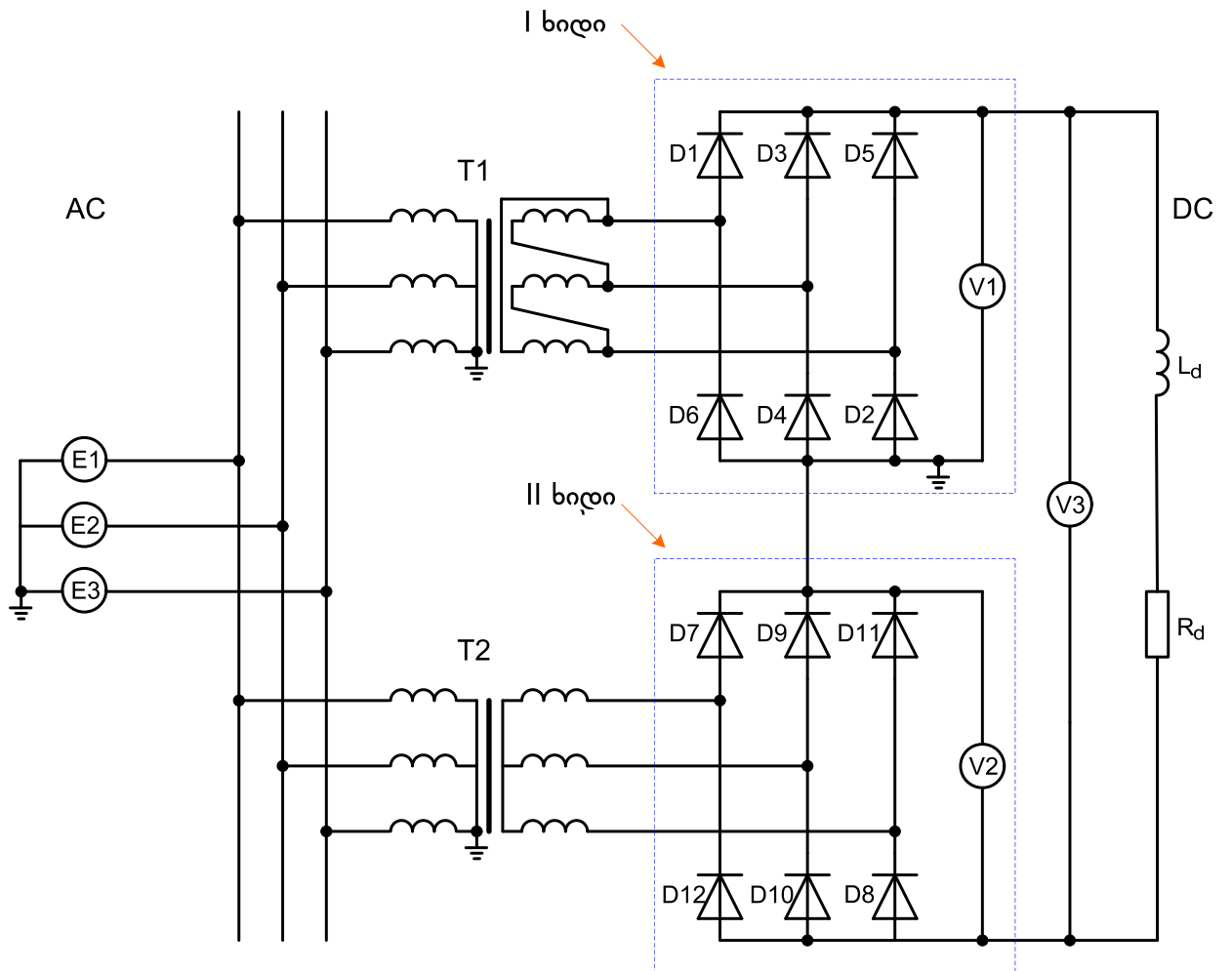
თავი III

ჩანართის მოდელირება და ჰარმონიკული ანალიზი

3.1 12-პულსიანი გამართვის სქემის მათემატიკური მოდელირება

როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ მუდმივი დენის ჩანართში ცვლადი დენის გარდაქმნისათვის მუდმივად და შემდეგ მუდმივი დენის გარდაქმნისათვის კვლავ ცვლად დენად გამოყენებულია 12-პულსიანი კონვერტორული გარდამქმნელი, რომლის შემადგენელ ძირითად ნაწილებს წარმოადგენს გამმართველი და ინვერტორი. სიმძლავრის მიმართულების რევერსირებისას ხდება გამმართველის გადასვლა ინვერტირების რეჟიმში და ინვერტორის გადასვლა გამართვის რეჟიმში. სქემის მუშაობის დეტალური ანალიზისათვის მოვახდინეთ ჩანართის ერთი ნაწილის, კერძოდ, კი 12-პულსიანი გამმართველის მოდელირება. ამასთან, განხილული გვაქვს არამართვადი გამმართველი, ანუ ძალოვან ნახევარგამტარებად გამოყენებულია დიოდები (ან ტირისტორები, რომლებიც მუშაობენ დიოდურ რეჟიმში). მათემატიკური მოდელირება შესრულებული იქნა კომპიუტერული პროგრამა "Ansoft Simplorer"-ის საშუალებით.

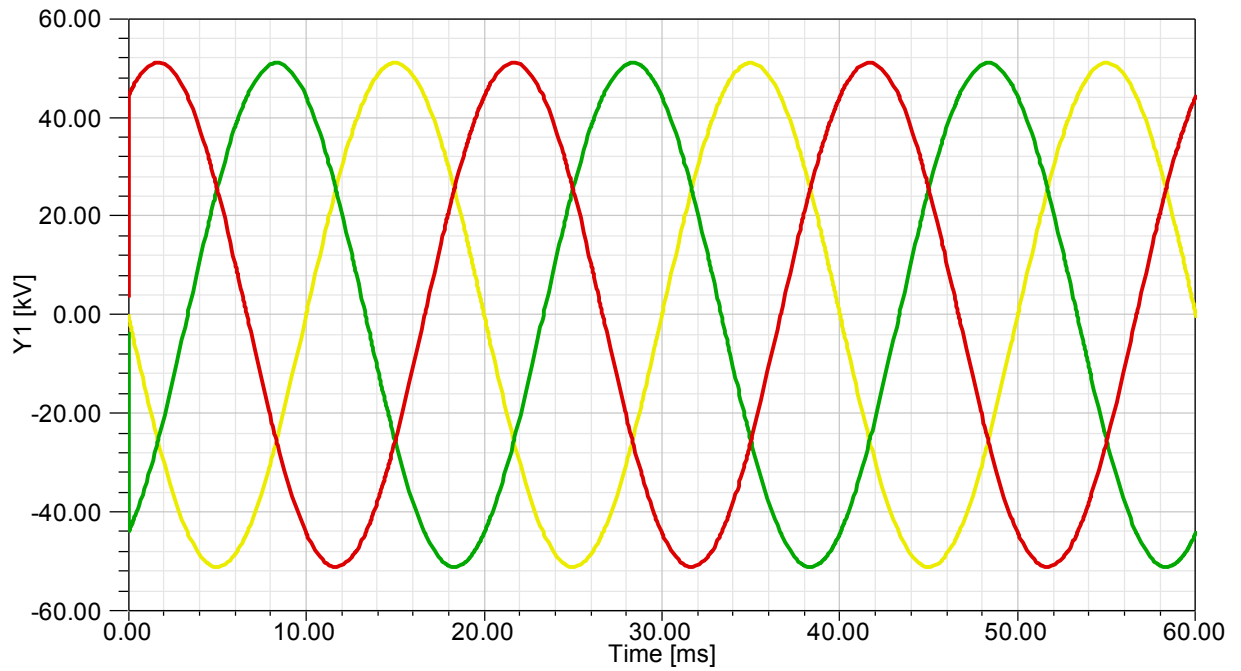
ნახ. 9-ზე მოცემულია "Ansoft Simplorer"-ში აგებული მოდელის სქემა, სადაც E1, E2 და E3 გამმართველის მკვებავი სამფაზა სისტემის ელექტრომაგნიტური ძალები. T1 ტრანსფორმატორი კვებას პირველ სამფაზა ბოგას (I ხიდი) და როგორც ნახაზიდან ჩანს მისი მეორეული გრაგნილი ჩართულია სამკუთხედად. T2 ტრანსფორმატორი კვებას მეორე სამფაზა ბოგას (II ხიდი) და მისი მეორეული გრაგნილი კი ჩართულია იზოლირებული ნეიტრალის მქონე ვარსკვლავის სქემით. V1 და V2 ვოლტმეტრები, შესაბამისად, აჩვენებს პირველი და მეორე ხიდების მიერ გამართულ ძაბვებს, ხოლო V3 ვოლტმეტრი კი აჩვენებს ამ ორი ძაბვის ჯამს (რადგან ზემოთ ხსენებული ორი სამფაზა ხიდის გამოსასვლელები, ანუ მუდმივი ძაბვის მომჭერები ერთმანეთთან ჩართულია მიმდევრობით, შუანერტილი კი ჩამიწებულია). სქემა მუშაობს Ld, Rd დატვირთვაზე.



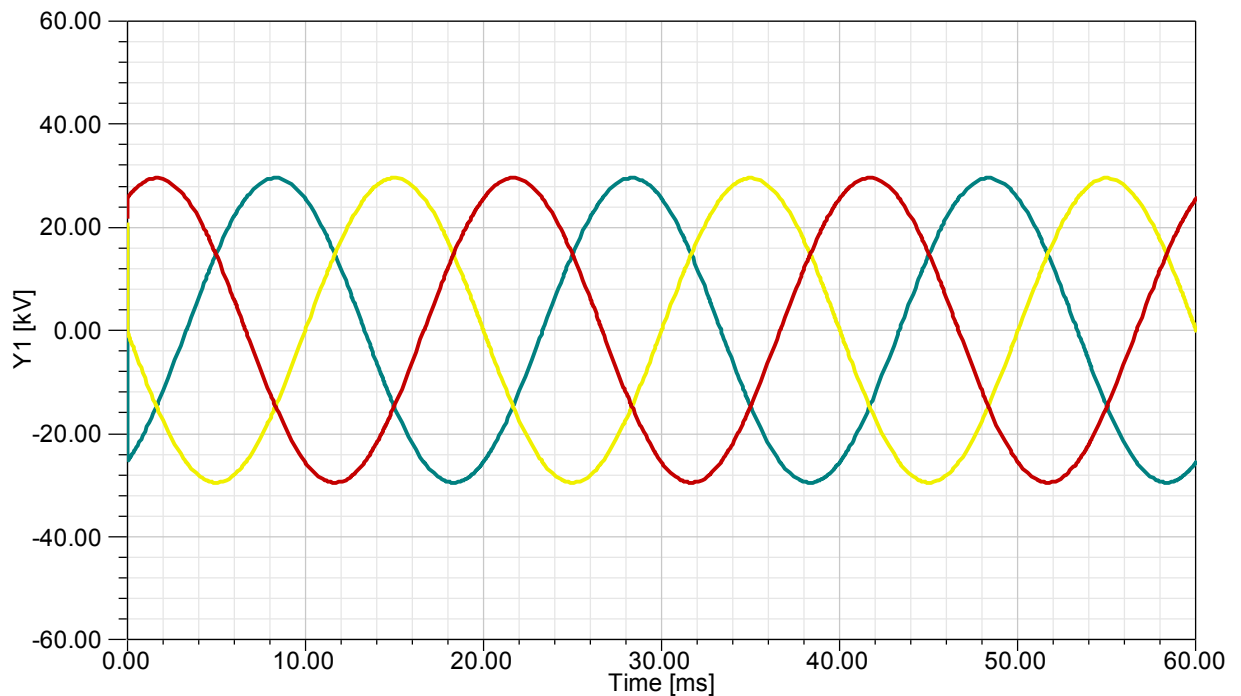
ნახ.9 12-პულსიანი გამმართველის სქემა

გამმართველის სქემიდან ნათლად ჩანს, რომ პირველ ხიდს მიეწოდება T1 ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ფაზების დაბევები, ხოლო მეორე ხიდს T2 ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ფაზებს შორის დაბევები ანუ ხაზური დაბევები. ამიტომ T1-ისთვის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ისეა შერჩეული, რომ მისი ფაზური დაბევები სიდიდით T2-ის ხაზური დაბევების ტოლი გამოდის, ანუ $K_{T1}=1.73K_{T2}$.

პირველი ხიდის მკვებავი გრაგნილის ფაზის ამპლიტუდა 49 კვ-ია ხოლო მეორე ხიდის მკვებავი გრაგნილისა კი 1.73-ჯერ ნაკლები, ანუ 28.3 კვ. ნახ.10-ზე და ნახ. 11-ზე მოცემულია, შესაბამისად, I და II ხიდის მკვებავი დაბევები.



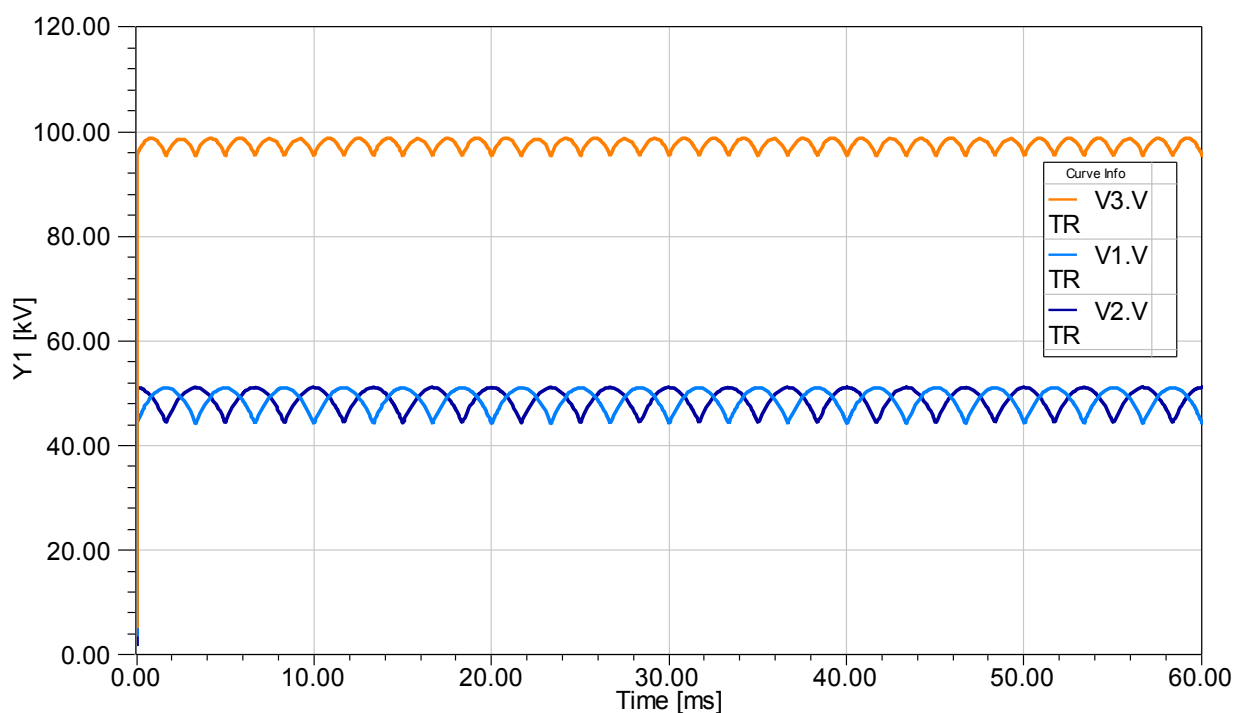
ნახ.10 გამმართველის I ხიდის მკვებავი ემძ-ები (Δ -ად ჩართული დ.დ. გრაგნილი)



ნახ.11 გამმართველის II ხიდის მკვებავი ემძ-ები (Y-ად ჩართული დ.დ. გრაგნილი)

ამ ორი გრაგნილის ფაზებს შორის ძვრის კუთხე, მათი შეერთების ჯგუფიდან გამომდინარე, 30° -ია. (Y_0/Δ ; Y_0/Y).

ნახ. 12-ზე მოყვანილია გამართული ძაბვების მრუდები, ანუ V1, V2 და V3 ვოლტმეტრების ჩვენებები.

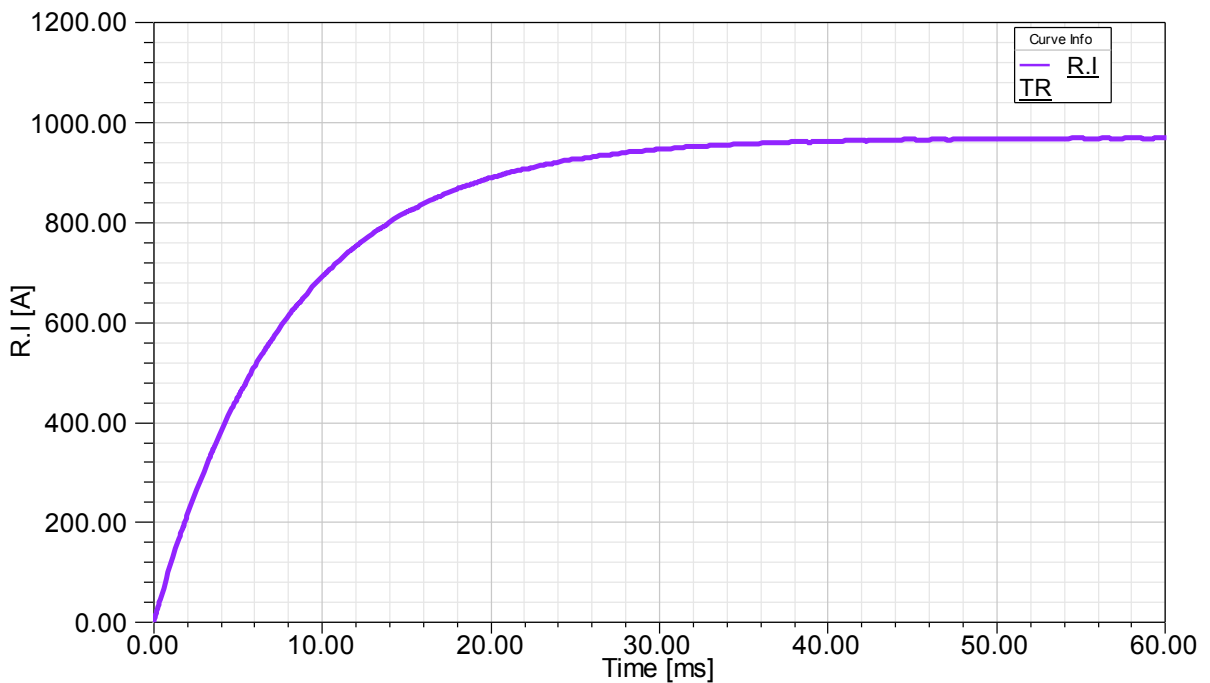


ნახ.12 მუდმივი ძაბვები გამართველის მომჭერებზე

როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ ხიდეების მკვებავი ცვლადი ძაბვების ერთსახელა ფაზები დაძრულები არიან 30° -ით და, ამიტომ, მათ მიერ გამართული პულსირებული ძაბვებიც (გამართველის სქემიდან გამომდინარე თითოეულისათვის 6 პულსი პერიოდში) 30° -ით იქნებიან დაძრულები (V1 და V2 ვოლტმეტრების ჩვენება), ხოლო მათი მყისა მნიშვნელობების ჯამი (V3 ვოლტმეტრის ჩვენება) გვაძლევს ჯამურ გამართულ ძაბვას, რომლის პულსების რიცხვი პერიოდში 12-ის ტოლია. აქედან გამომდინარეობს გამართვის სქემის სახელწოდებაც.

შეტვასებითი ანალიზის ჩასატარებლად ანაგარიშების პირველ ეტაპზე დატვირთვის წინალობა, პირობითად, აღებული გვაქვს $R=100$ ომი, დატვირთვის ინდუქტივობა კი $L=1$ ჰნ და ჩავთვალეთ, რომ დენი დატვირთვაში პრაქტიკულად გავლუვებულია, ანუ თითქმის არ ფეთქავს (ნახ.13). რეალურ სრულ სქემაზე, სადაც კონვერტორი გამართველის გარდა შეიცავს ინვერტორსაც, გამართველის დატვირთვის მხარეს წარმოადგენს ინვერტორი თავისი უკუ ელექტრომაგნიტური დალით.

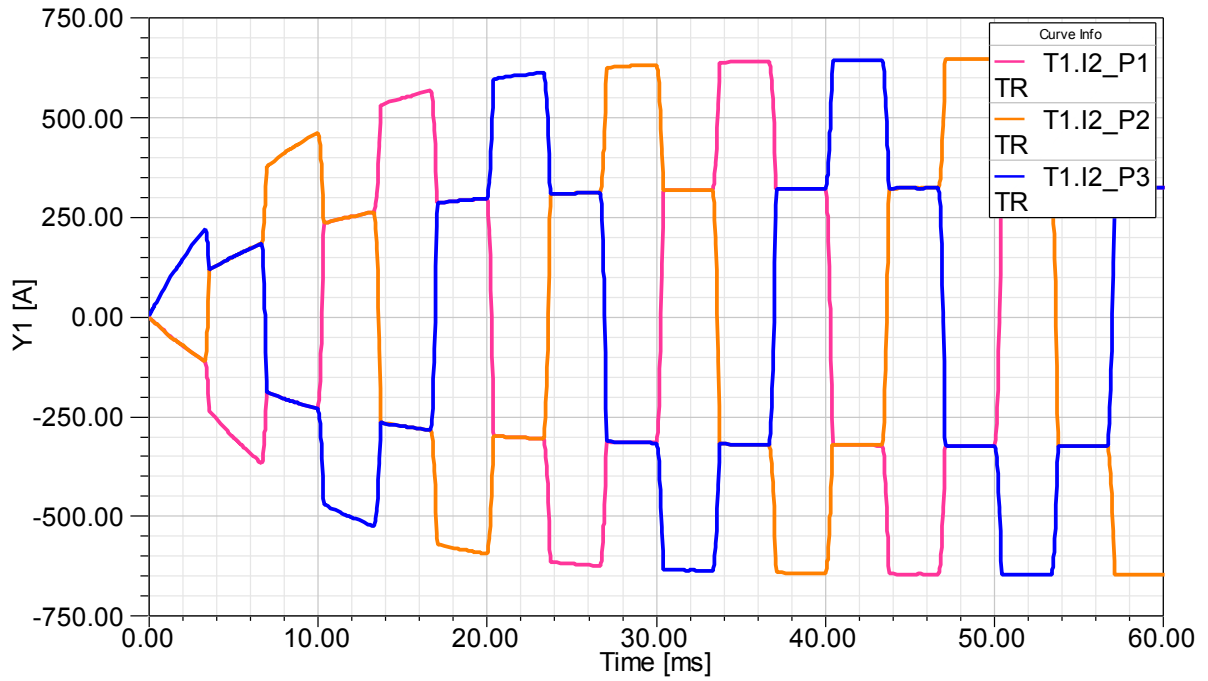
წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებულია ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს ელექტროსისტემისთვის, რომელიც წარმოადგენს სიმძლავრის გამცემ სისტემას, ანუ გამმართველის მხარეს და რადგან ასეთი ანალიზის დროს გამმართველის მკვებავ სალტებზე ძაბვის დამახინჯებაზე ინვერტორული მონწყობილობის გავლენა მცირეა, ამიტომ ნაშრომში ინვერტორის მოდელირებას არ ვახდენთ და მის ნაცვლად ვიყენებთ ეკვივალენტურ წრედს.



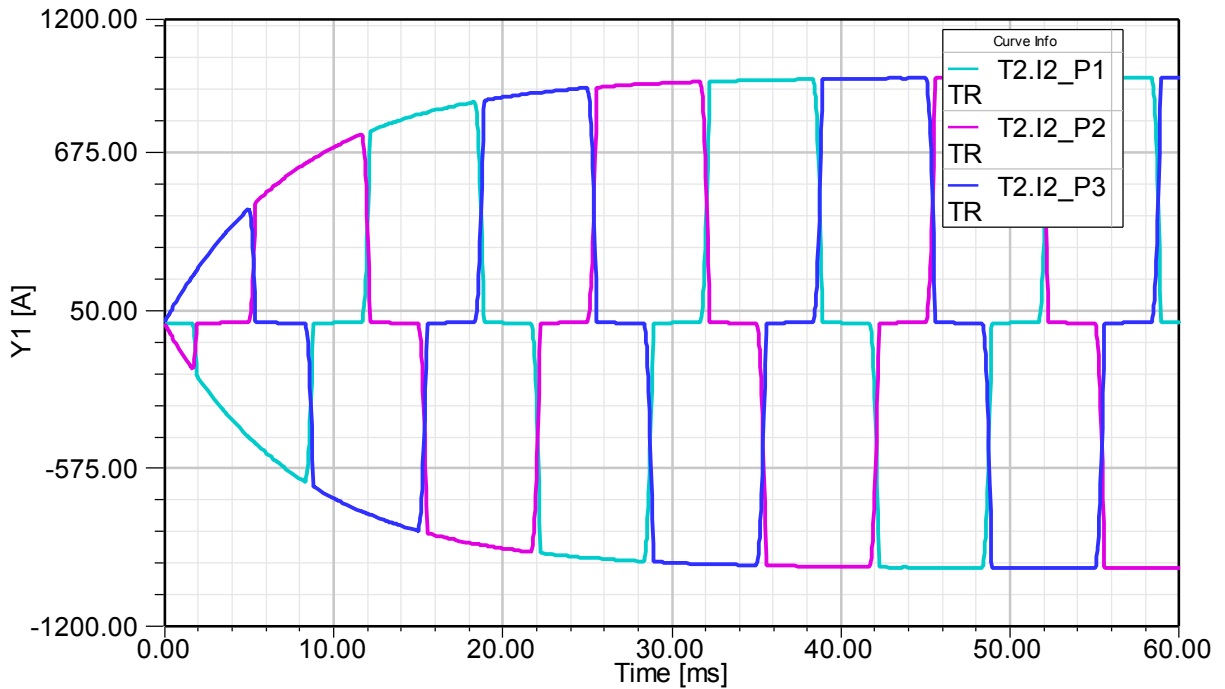
ნახ.13 დატვირთვის დენი

ნახ.13-ზე წარმოდგენილ დიაგრამაზე ნაჩვენებია დატვირთვის დენის მდორე ზრდა განპირობებულია მუდმივი დენის მხარეს ჩართული დიდი ინდუქტივობით.

T1 ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გრაგნილში გამავალ დენებს აქვთ ნახ.14-ზე ნაჩვენები სახე, ხოლო დენებს T2 ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გრაგნილში გამავალ დენებს კი ნახ. 15-ზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.14 დენები ტრანსფორმატორის სამკუთხედად შეერთებულ გრაგნილში

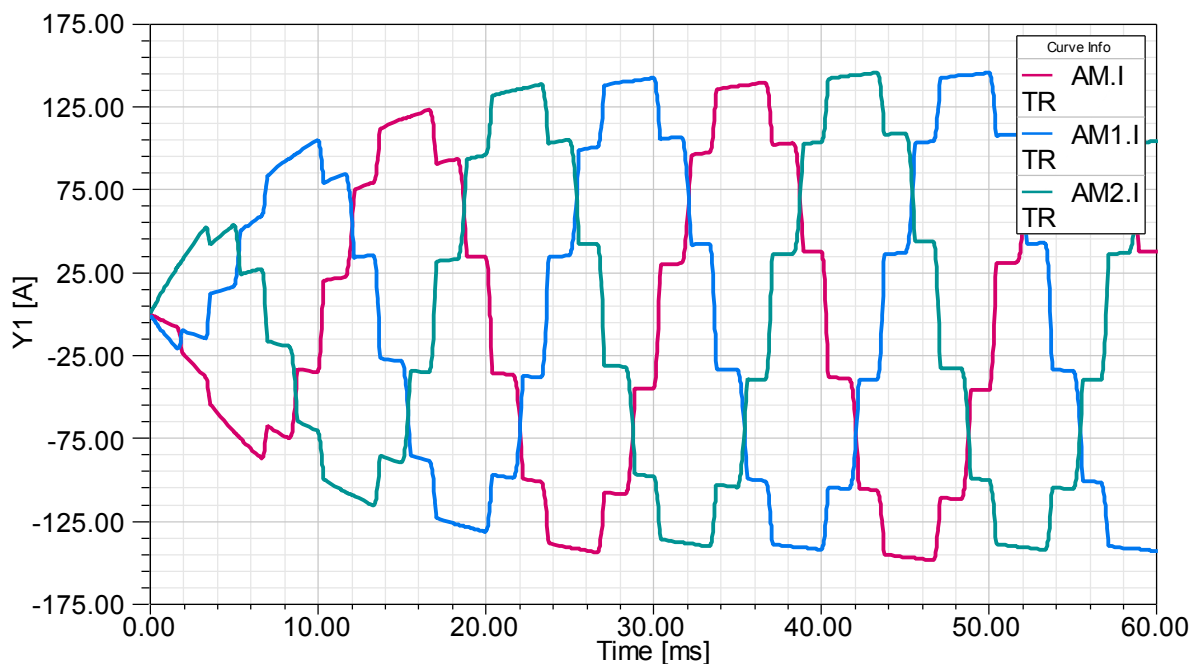


ნახ.15 დენები ტრანსფორმატორის ვარსკვლავად შეერთებულ გრაგნილში

როგორც ბოლო ორი დიაგრამიდან ჩანს, დენები ტრანსფორმატორების მეორეულ გრაგნილებში მკვეთრად განსხვავდებიან სინუსოიდისაგან. 12-პულსიანი სქემის გამოყენების აზრი მდგომარეობს მასში, რომ წყაროდან მოთხოვნილი დენები, ანუ დენები E1, E2 და E3 მკვეთრად სამუაზა სისტემაში წარმოადგენს ამ ორი დიაგრამის ზედღებას

(რადგან ტრანსფორმატორები ჩართულია პარალელურად) და ზედღებული დენი გარკვეულწილად უახლოვედება სინუსოიდას. (შესაძლებელია აგრეთვე შემთხვევა, რომლის დროსაც T1 და T2 ტრანსფორმატორების ნაცვლად გვექნება ერთი ტრანსფორმატორი რომელსაც ექნება ორი დაბალი ძაბვის გრაგნილი თითოეული T1 და T2 ტრანსფორმატორების დაბალი გრაგნილების მსგავსად ჩართული, და მიღებული ეფექტი არ შეიცვლება).

ნახ.16-ზე მოცემულია ტრანსფორმატორების პირველადი გრაგნილების დენების ჯამი, ანუ ჩანართის მიერ მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი დენი.



ნახ.16 ჩანართის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენები

მიუხედავად იმისა, რომ ვიყენებთ 12-პულსიან სქემას, მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი დენი დამახინჯებული სინუსოიდაა და შეიცავს სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკებს, რომელთა ხარისხობრივი და რაოდენობრივი გავლენის შესწავლა და ანალიზი მნიშვნელოვანია მკვებავი ელექტროსისტემისთვის. ასეთი შესწავლა და ანალიზი ჩატარებული იქნა საქართველოს ელექტროსისტემისთვის, რამეთუ ქვესადგურ “ახალციხეში” დაიდგმება დიდი სიმძლავრის მუდმივი დენის ჩანართი თურქეთთან არასინქრონული კავშირის განხორციელების მიზნით (თავი III, IV, V).

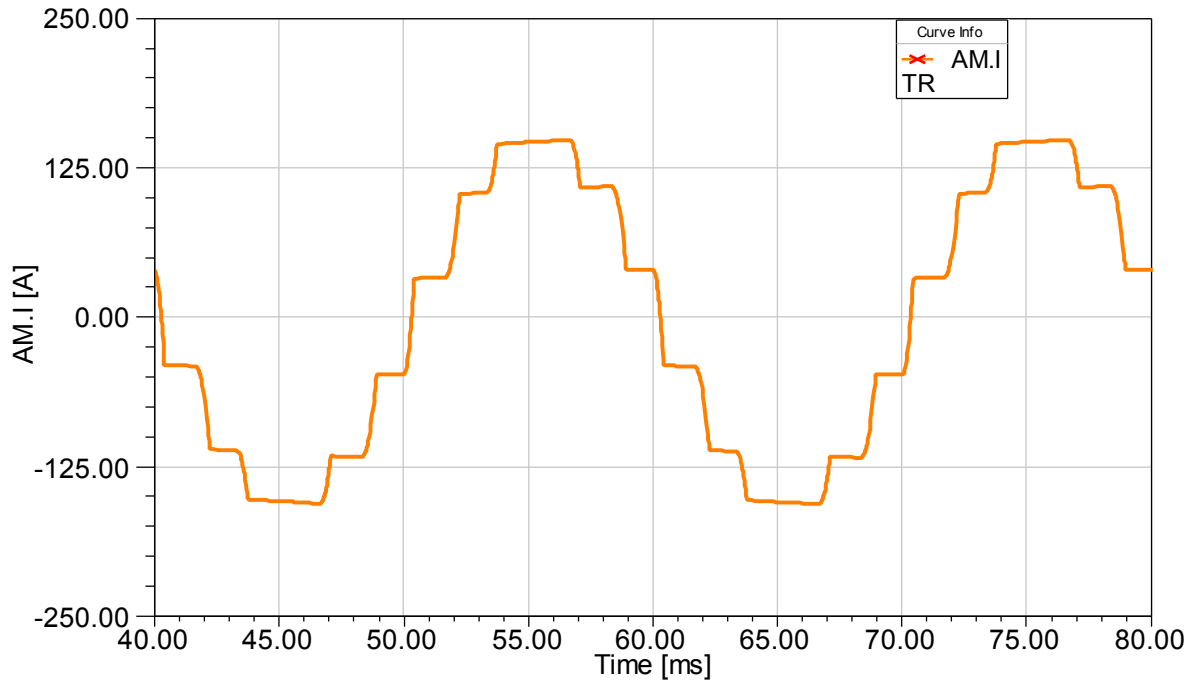
3.2 არასინუსოიდურობის ხარისხის გამოკვლევა ჩანართით გადასაცემ სიმძლავრესთან დამოკიდებულებაში

როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ კონვერტორი ქსელიდან მოითხოვს არასინუსოიდურ (დამახინჯებულ) დენს. საქართველოს ელექტროსისტემა წარმოადგენს სიმძლავრის გამცემ სისტემას და გამოსაკვლევი გამმართველის მიერ მოთხოვნილი დამახინჯებული დენის გავლენა სისტემის დაბვის დამახინჯებაზე.

დამახინჯებული დენი გადის მკვებავი ტრანსფორმატორების პირველად გრაგნილებში და იწვევს ტრანსფორმატორებზე მოდებული სინუსოიდური დაბვის დამახინჯებასაც. ეს დამახინჯება უმნიშვნელო სიდიდისაა მაშინ, როდესაც მუდმივი დენის დატვირთვა გაცილებით მცირეა სიმძლავრის გამცემი სისტემის ჯამურ დატვირთვასთან შედარებით, ხოლო როდესაც ეს დატვირთვები თანაზომადია, მაშინ დაბვის სინუსოიდის დამახინჯების ხარისხი შედარებით მაღალია, რაც მოითხოვს სათანადო ანალიზის ჩატარებას და საჭიროების შემთხვევაში, შესაბამისი ღონისძიებების გატარებას. თანამედროვე ტექნიკური სტანდარდების მიხედვით (*IEEE Standards*) დაბვის (დენის) დამახინჯება დასაშვებია, თუ იგი ძირითადი ჰარმონიკის მიმართ არ აღემატება (2,5-3)%-ს. დაბვის (დენის) დამახინჯების (არასინუსოიდურობის) კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$K_{arasin} \% = \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=3} U_{\gamma}^2}}{U_1} 100 \quad (14)$$

სადაც U_{γ} - γ რიგის ჰარმონიკის ამპლიტუდაა U_1 კი პირველი რიგის (ძირითადი) ჰარმონიკის ამპლიტუდა. უფრო კონკრეტულად, ჩვენი სისტემისთვის U_1 იმ კვანძის 50 ჰერცი სიხშირის დაბვაა, რომელისთვისაც ვახდენთ ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარებას. ამასთან, U_1 არის რეჟიმის დაბვა და არა ნომინალური დაბვა. ნახ.17-ზე მოცემულია კონვერტორის 100 მგვტ სიმძლავრით დატვირთვისას მის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენის მრუდი, რომლის ჰარმონიკული შემადგენლობა ნახ.18-ზეა ნაჩვენები.

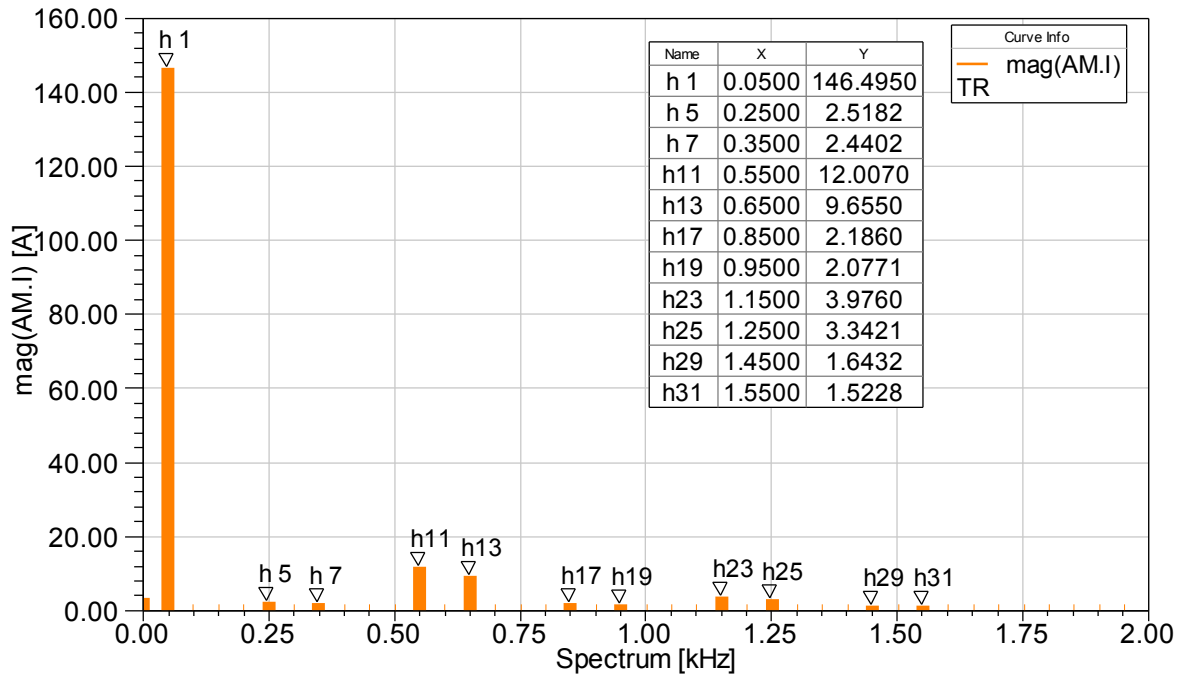


ნახ.17 100 მგვტ – ით დატვირთული კონვერტორის მიერ მკვეთრადი ქსელიდან მოთხოვნილი დენის მრუდი

ქსელიდან მოთხოვნილ დენის მრუდში ჰარმონიკული სპექტრი განისაზღვრება ფორმულით :

$$n = km \pm 1, \quad (15)$$

სადაც m გამართული ძაბვის პულსების რაოდენობაა ცვლადი ძაბვის ერთ პერიოდში, ჩვენ შემთხვევაში $m=12$ და k ნატურალურ რიცხვთა სიმრავლეა და $k=1; 2; 3; 4; 5; 6$. . მნიშვნელობებისთვის გვაქვს შემდეგი რიგის ჰარმონიკები $n=11; 13; 23; 25$. ამასთან, ჰარმონიკის ამპლიტუდა მისი ნომრის გაზრდისას მკვეთრად მცირდება (ნახ.18). ჰარმონიკული სპექტრიდან ჩანს, რომ ყველაზე დიდი ამპლიტუდა 1 ჰარმონიკის (ძირითადი ჰარმონიკა) შემდეგ აქვს მე-11 რიგის ანუ 550 ჰერცი სიხშირის ჰარმონიკას, შემდეგ მოდის მე-13 რიგის ანუ 650 ჰერცი სიხშირის და ა.შ.

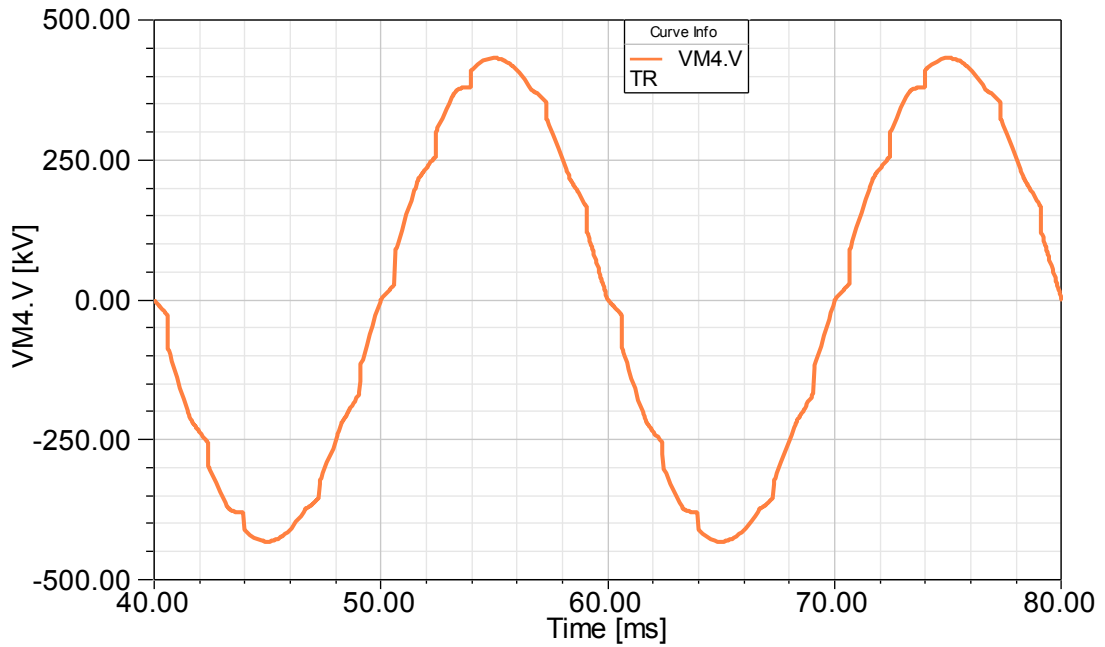


ნახ.18 100 მგვტ – ით დატვირთული კონვერტორის მიერ მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი დენის ჰარმონიკული სპექტრი

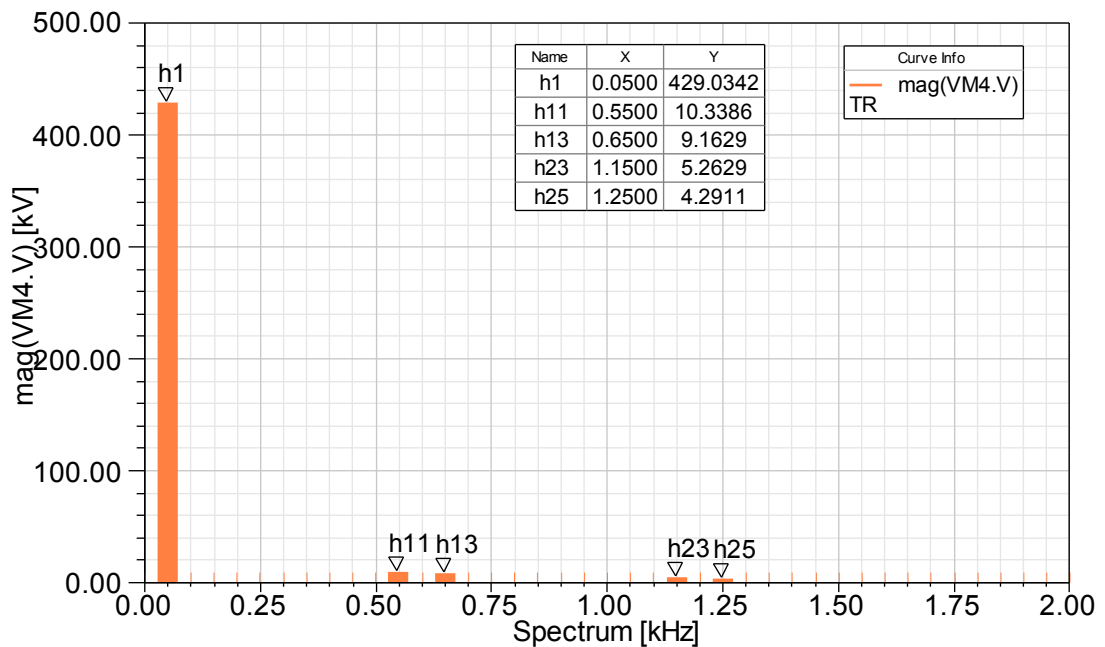
500 კვ ძაბვის სალტებზე ფაზური ძაბვის მრუდს აქვს ნახ.19-ზე ნაჩვენები სახე. მისი ჰარმონიკული სპექტრი კი ნაჩვენებია ნახ.20-ზე.

ძაბვისა და დენის დამახინჯების კოეფიციენტები სიმძლავრის ცვლილებასთან ერთად იცვლება. ზემოთ მოყვანილი ჩანართის გამარტივებული სქემის (ნახ.9) საფუძველზე მოდელირების პირველ ეტაპზე ჩავატარეთ შეფასებითი ანალიზი გადასაცემი სიმძლავრის 100 ± 700 მგვტ მნიშვნელობებისას 100 მგვტ-იანი ბიჯით.

ძაბვისა და დენის დამახინჯების კოეფიციენტების ცვლილების კანონზომიერება ნაჩვენებია ნახ. 21-ზე. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს, 100-დან 700 მგვტ-მდე დატვირთვის გაზრდისას დენის დამახინჯების კოეფიციენტი 12.11%-დან 7.98 %-მდე მცირდება, ხოლო ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტი, პირიქით, 0.81 % -დან 2 %-მდე იზრდება.



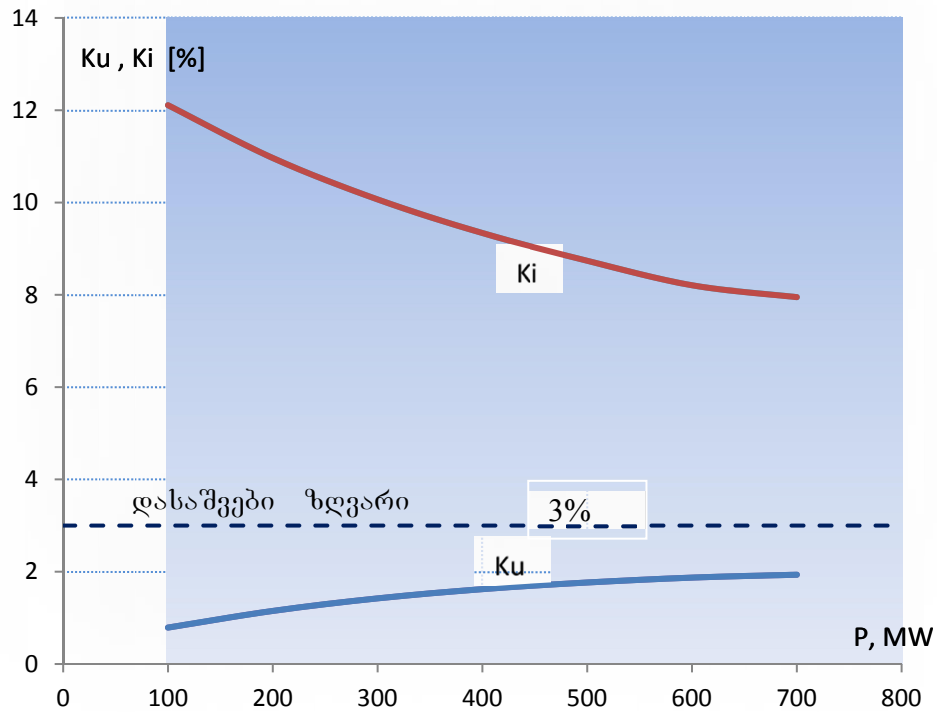
ნახ.19 ფაზური ძაბვა 500 კვ-იან სალტებზე



ნახ.20 ფაზური ძაბვის სპექტრი

არსებული თეორიული კვლევები გვიჩვენებს, რომ დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტებზე გავლენას ახდენს მთელი რიგი ფაქტორები. კერძოდ, სიმძლავრის გამცემი სისტემის ჯამური დატვირთვა, ქსელის კონფიგურაცია და მისი ელემენტების ელექტრული პარამეტრები, გენერატორებისა და მოხმარების კვანძების ურთიერთ ელექტრული განლაგება და ა.შ. ნახ.21-ზე მოცემულ რეზულტატში ეს ფაქტორები

გათვალისწინებული არ გვექონდა, რადგან ჩანართი პირდაპირ იყო მიერთებული წყაროსთან. აქედან გამომდინარე იგი არ არის ზუსტი, უბრალოდ იძლევა ზოგად წარმოდგენას დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტების გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულების ხასიათს.



ნახ.21 დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება სიმძლავრეზე

ჩამოთვლილი ფაქტორების გავლენის ხარისხის შეფასება მეტად მნიშვნელოვანია, რადგან რეალურად სისტემაში ჩანართსა და გენერატორებს შორის არსებობს გარკვეული ელექტრული დაშორება (გადაცემის ქსელი). ამიტომ, უფრო ზუსტი რეზულტატის მისაღებად აუცილებელია გარდა მუდმივი დენის ჩანართისა, ასევე, მოვახდინოთ საქართველოს ელექტროსისტემის გენერაციის კვანძებისა და ელექტროგადაცემის ქსელის მოდელირებაც.

თავი IV

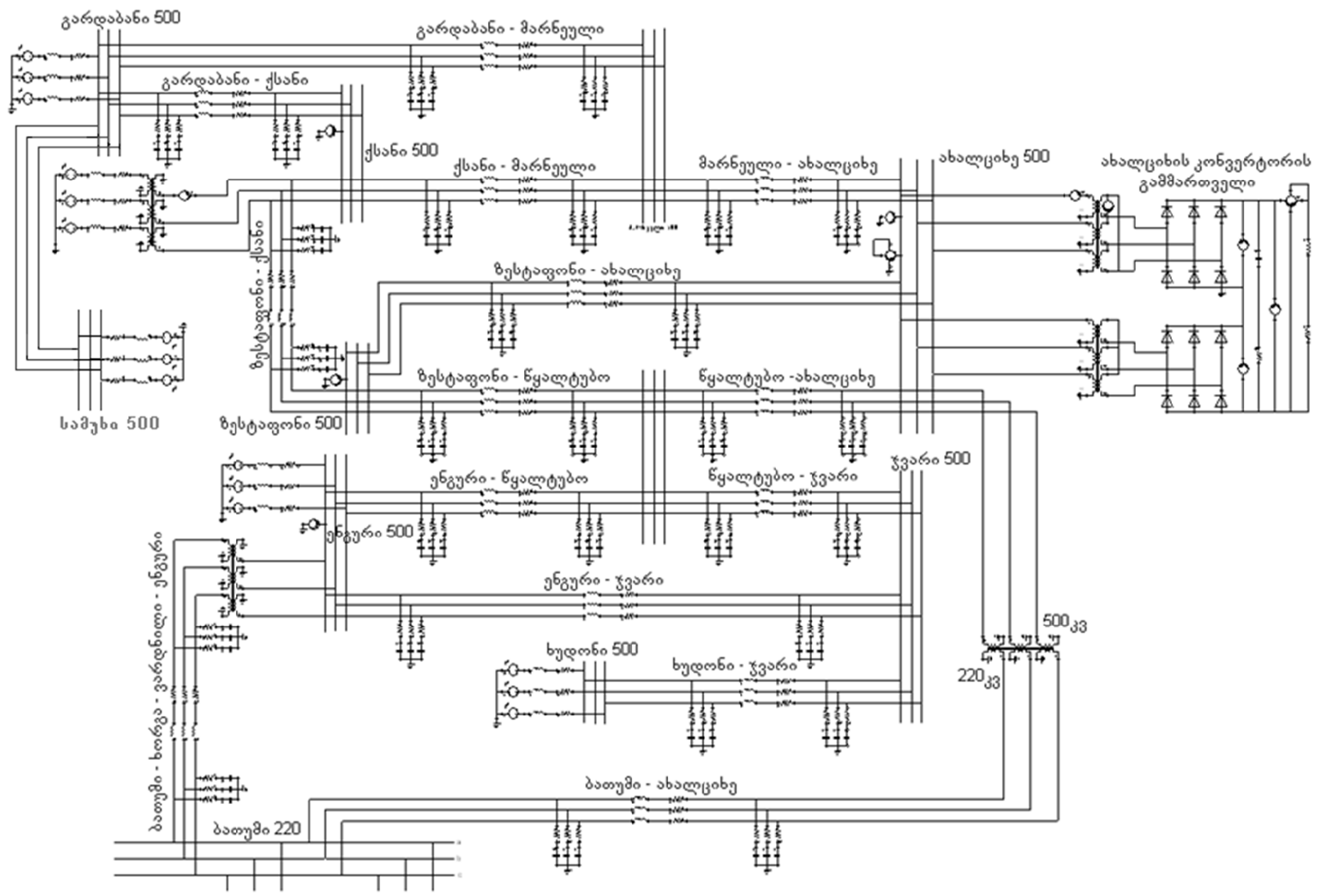
გადაცემის ქსელის გავლენა დამახინჯების კოეფიციენტებზე

4.1 გადაცემის ქსელის მოდელირება "Ansoft Simplorer" - ში

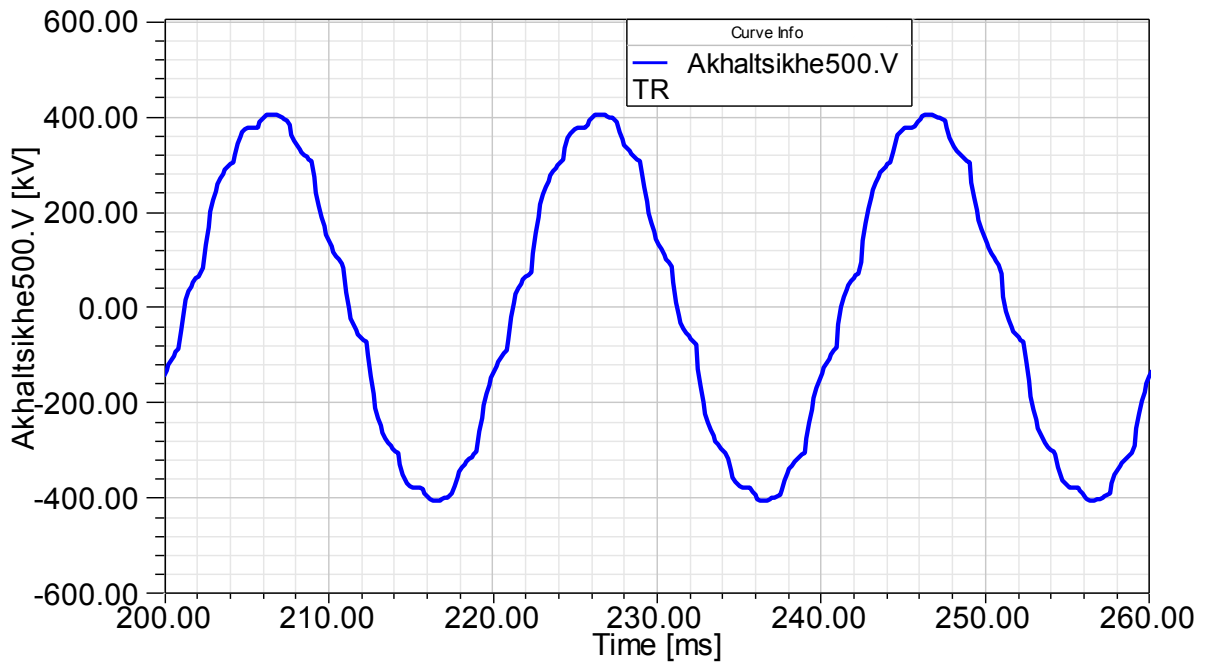
გადაცემის ქსელის გავლენის შესასწავლად პროგრამა "Ansoft Simplorer" მოვახდინეთ საქართველოს პერსპექტიული სქემის მოდელირება. ეს სქემა მოცემულია ნახ.22-ზე. მოდელირებულია 500 კვ ძაბვის არსებული ("გარდაბანი-ქსანი", "ქსანი-ზესტაფონი", "ენგური-ზესტაფონი") და პერსპექტიული ("გარდაბანი-მარნეული", "ქსანი-მარნეული", "მარნეული-ახალციხე", "ზესტაფონი-ახალციხე", "წყალტუბო-ახალციხე", "წყალტუბო-ჯვარი", "ენგური-ჯვარი", "ხუდონი-ჯვარი") ხაზები, ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის გამმართველი და 220 კვ ძაბვის ქსელის ნაწილი. ასევე გათვალისწინებულია 500 კვ ძაბვის კავშირი აზერბაიჯანის ელექტრო-სისტემასთან, რომელიც წარმოდგენილია ეკვივალენტური სისტემის სახით. სისტემის დანარჩენი კვანძები, რომელთა გავლენა ქსელში სინუსოიდური ძაბვის დამახინჯების ხარისხზე ძალიან უმნიშვნელოა, გათვალისწინებული არ არის.

ხაზები წარმოდგენილია Π -სებრი ჩანაცვლების სქემის სახით. ტრანსფორმატორების მოდელად კი გამოყენებულია "ანსოფტ სიმპლორერის" TFR3P6WL მოდელი, რომელიც სპეციალურადაა შექმნილი დიდი სიმძლავრის ტრანსფორმატორების მოდელირებისათვის.

ძაბვისა და დენის დამახინჯების კოეფიციენტების დასაშვები სიდიდეები საერთაშორისო სტანდარტის გათვალისწინების გარდა, აგრეთვე, უნდა ითვალისწინებდეს იმ ქვეყნის ქსელის გრიდკოდის (ქსელის კოდი) მოთხოვნებს, რომელ ქსელშიც ვახდენთ ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარებას. საქართველოს 500/220 კვ ქსელისთვის ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის დასაშვები სიდიდე თანხვდება საერთაშორისო სიდიდეს და შეადგენს (2.5 – 3)% -ს.

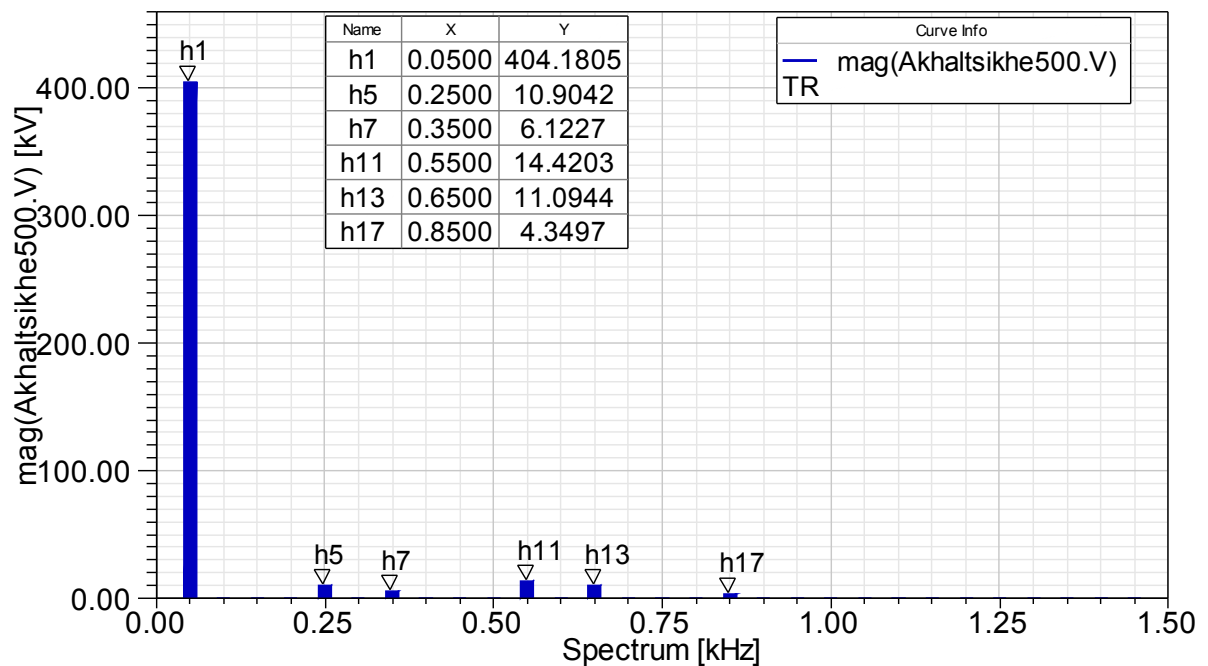


ნახ. 22 საქართველოს ელექტროგადამცემი ქსელის მოდელირებული ნაწილი “ანსოფტ სიმპლორერში”



ნახ.23 დაბვა ქ/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

ნახ.23-ზე მოცემულია ახალციხის 500 კვ სალტის დაბვა, ხოლო ნახ.24-ზე მისი ჰარმონიკული შემადგენლობა ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის მაქსიმალური დატვირთვისას (700 მგვტ). ამავე ნახაზზე დატანილია თითოეული ჰარმონიკის სიხშირე და ამპლიტუდა.



ნახ.24 ქ/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ – ის სალტის დაბვის სპექტრი

ჯამური დამახინჯების დამახინჯების კოეფიციენტი ახალციხის 500 კვ სალტის დაბვითვის იქნება:

$$THD \% (V.Akhal) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2 + h_{17}^2}}{h_1} \times 100 =$$

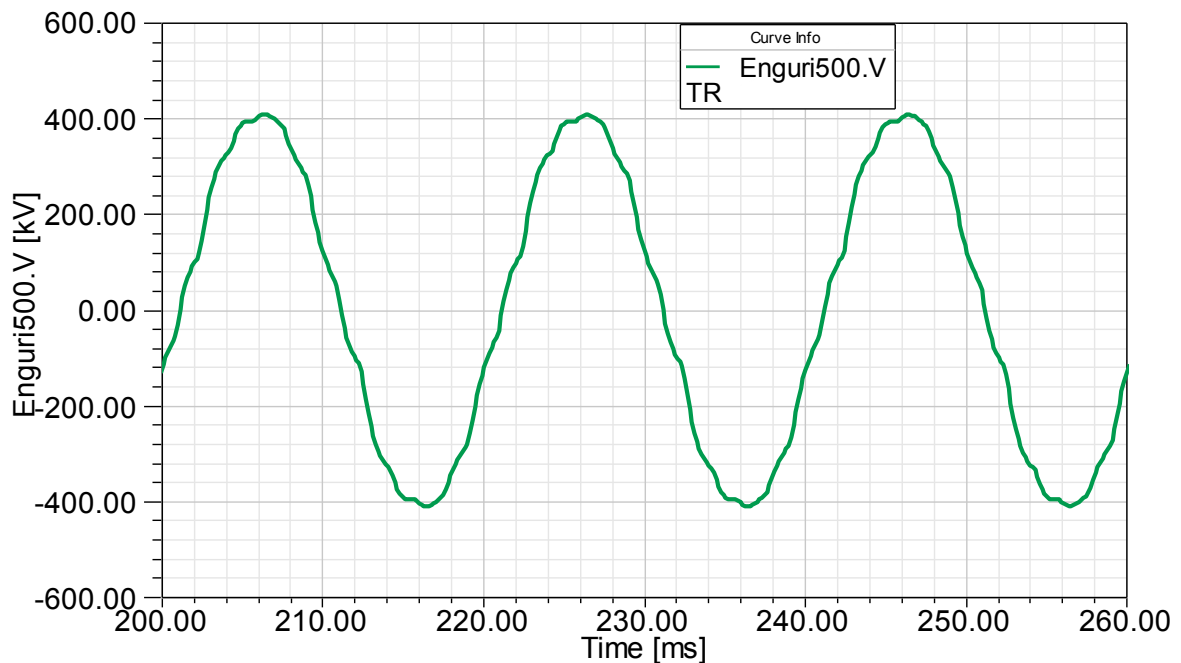
$$= \frac{\sqrt{10.9^2 + 6.12^2 + 14.42^2 + 11.09^2 + 4.4^2}}{404.18} \times 100 = \frac{22.5}{404.18} \times 100 = 5.57\%$$

ენგურის 500 კვ სალტის დაბვის ფორმა და მისი ჰარმონიკული შემადგენლობა შესაბამისადაა მოცემული 25-ე და 26-ე ნახაზებზე.

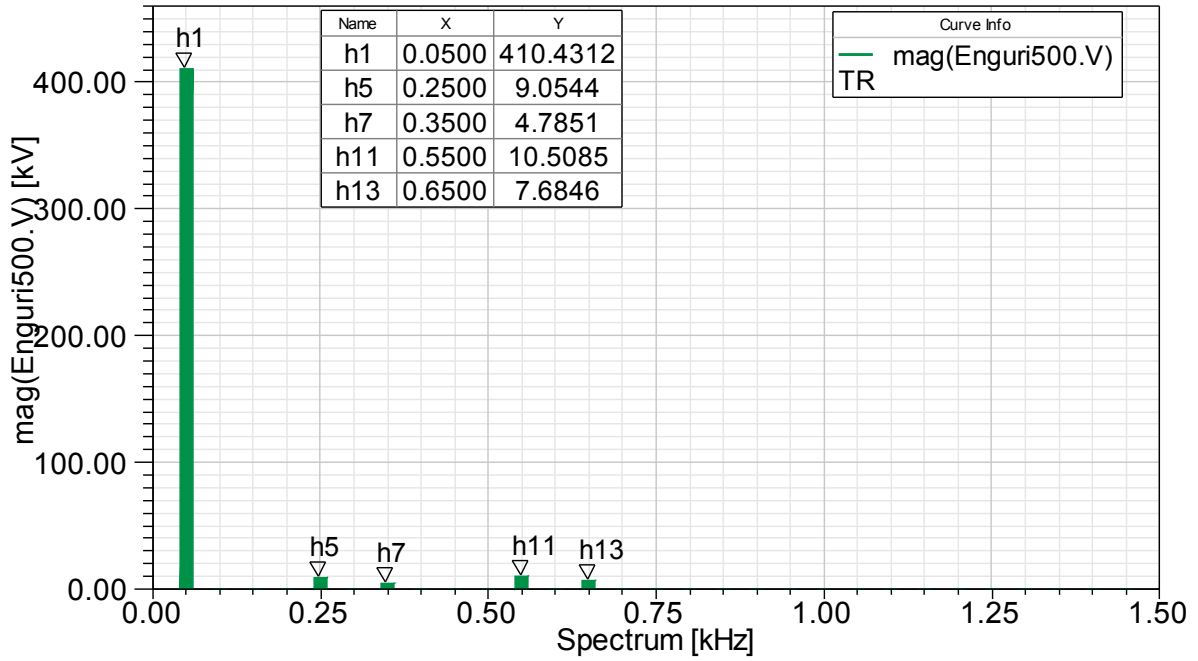
ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ქ/ს “ენგური 500”-ის 500 კვ სალტის დაბვისთვის იქნება:

$$THD \% (V.Enguri) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{9.05^2 + 4.79^2 + 10.51^2 + 7.69^2}}{410.43} \times 100 = \frac{16.58}{410.43} \times 100 = 4.04\%$$

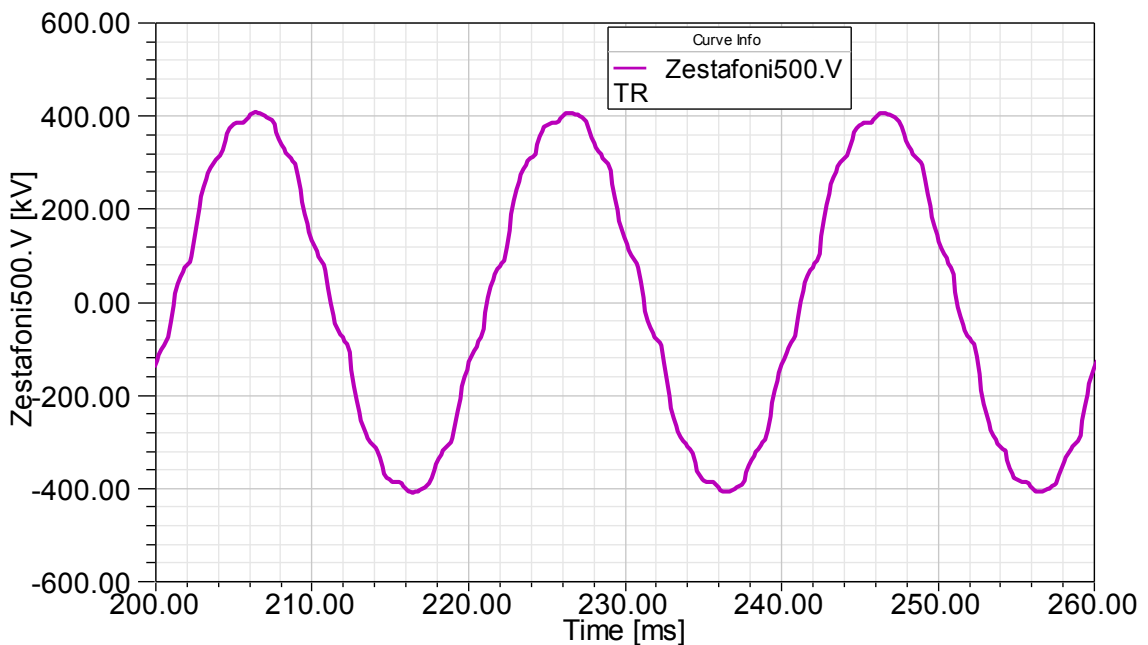


ნახ.25 დაბვა ქ/ს “ენგური 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე



ნახ.26 ქ/ს “ენგური 500”-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი

“ზესტაფონი 500”-ის ძაბვის ფორმა და ჰარმონიკული სპექტრი 27-ე და 28-ე ნახაზებზეა მოცემული.

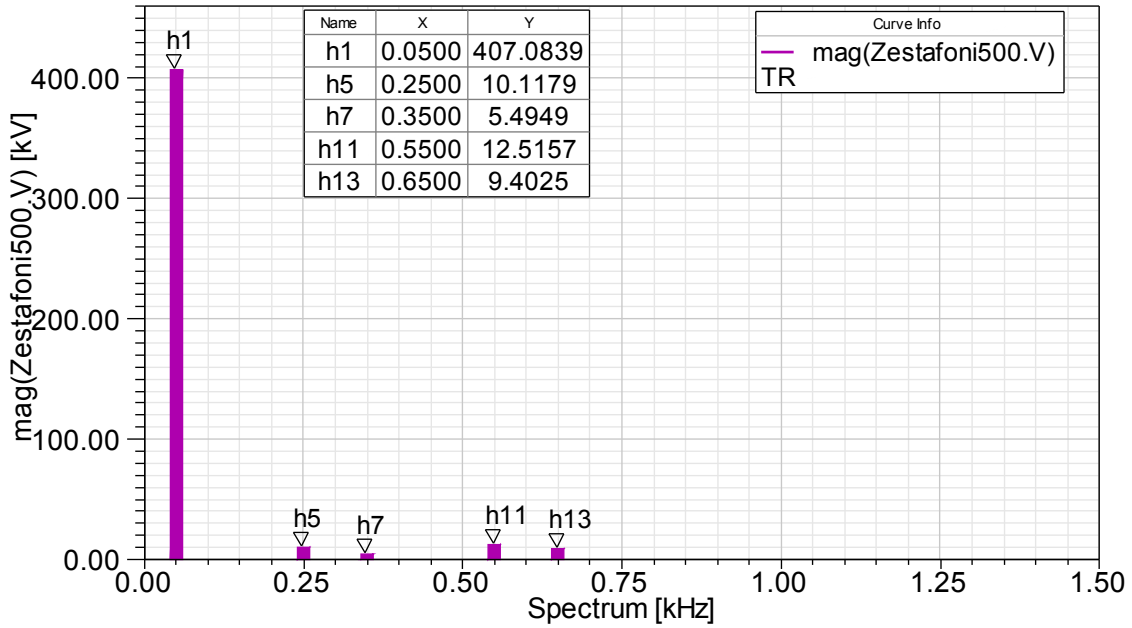


ნახ.27 ძაბვა ქ/ს “ზესტაფონი 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ქ/ს “ზესტაფონი 500”-ის 500 კვ სალტის ძაბვისთვის იქნება:

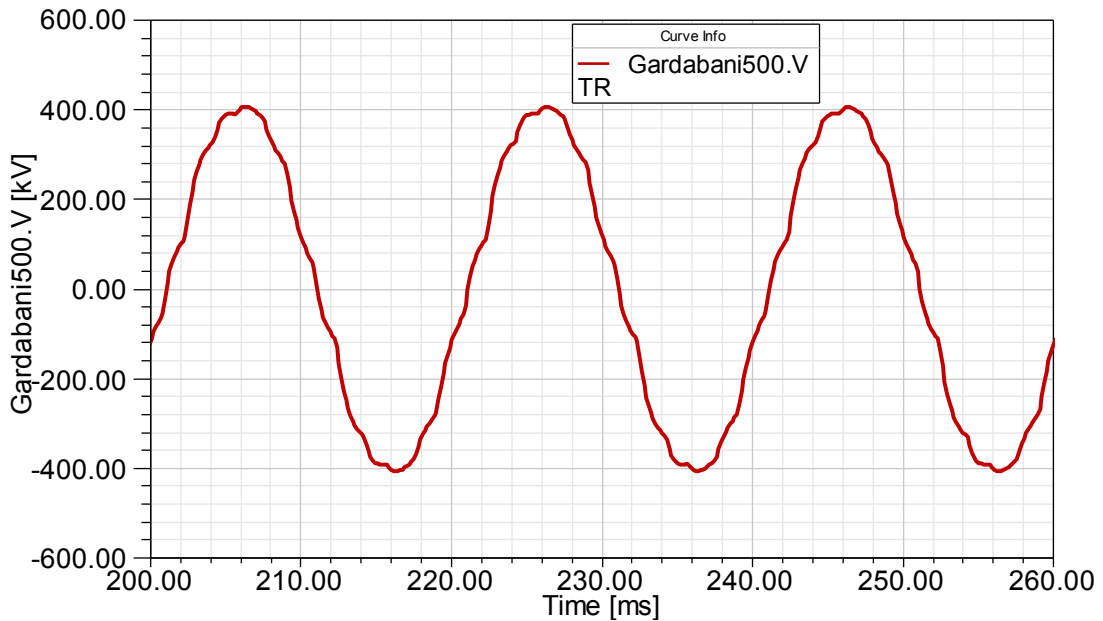
$$THD \% (V.Zest.) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{10.12^2 + 5.49^2 + 12.52^2 + 9.4^2}}{407.08} \times 100 = \frac{19.43}{407.08} \times 100 = 4.77\%$$



ნახ.28 ქ/ს “ზესტაფონი 500”-ის 500 კვ – ის სალტის დაბვის სპექტრი

“გარდაბანი 500”-ის დაბვის ფორმა და ჰარმონიკული სპექტრი 29-ე და 30-ე ნახაზებზეა მოცემული.

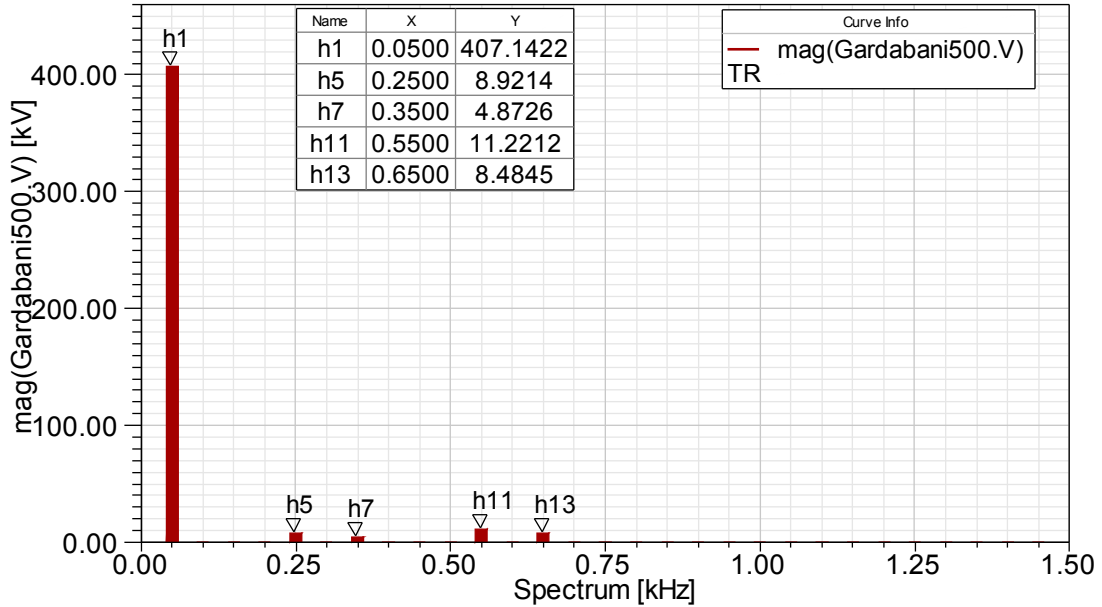


ნახ.29 დაბვა ქ/ს “გარდაბანი 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

გარდაბანში 500 კვ დაბვის სალტის დაბვისთვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი იქნება :

$$THD \% (V. Gard.) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{8.92^2 + 4.87^2 + 11.22^2 + 8.49^2}}{407.14} \times 100 = \frac{17.35}{407.14} \times 100 = 4.26\%$$

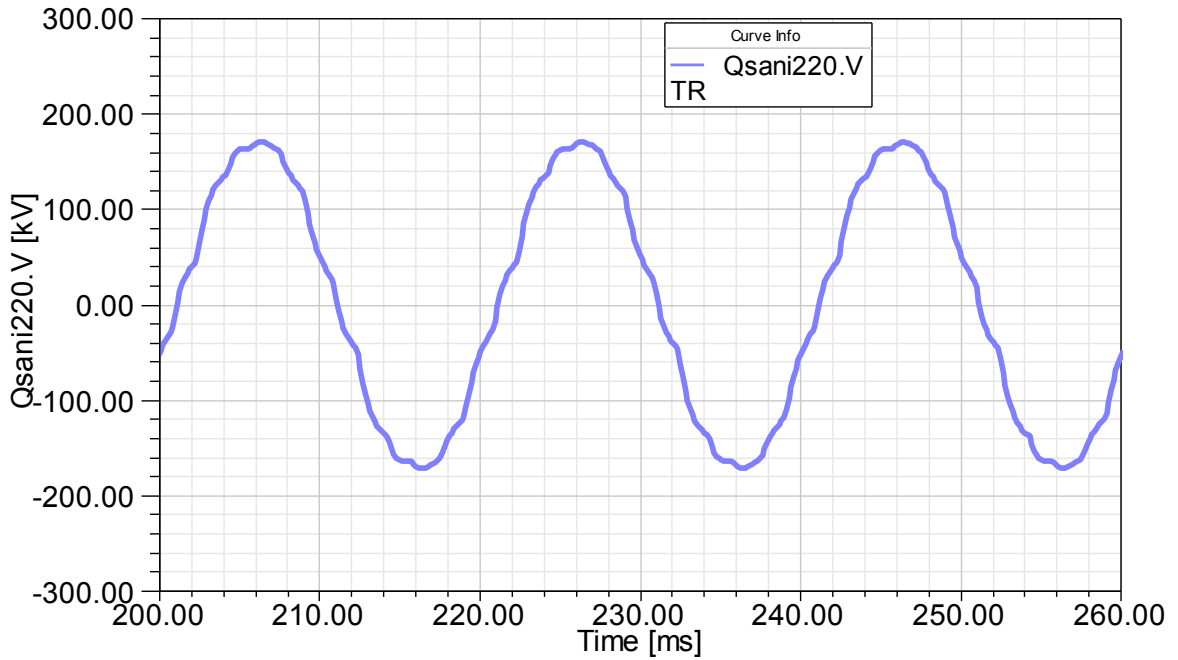


ნახ.30 ე/ს "გარდაბანი 500"-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი

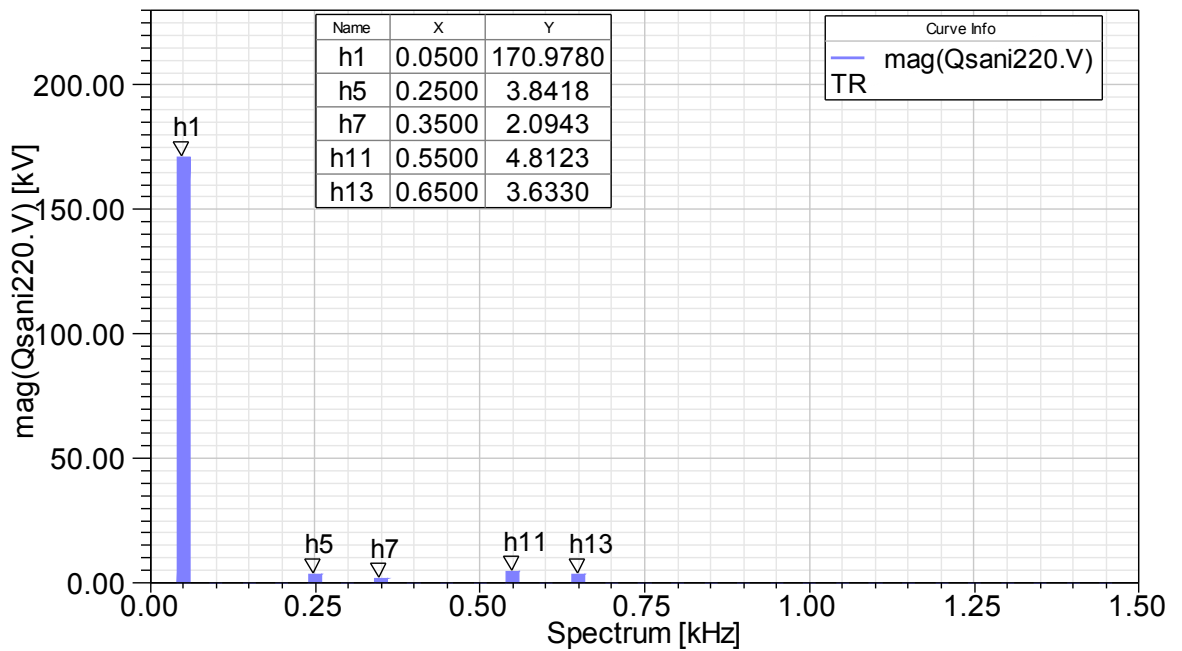
მოდელირებამ აჩვენა რომ მაღალი რივის ჰარმონიკები ტრანსფორმირდებიან და მათი გავლენა შეიმჩნევა 220კვ და უფრო დაბალი ძაბვის წრედებშიც. 31-ე და 32-ე ნახაზებზე განხილული გვაქვს ქსანის 220 კვ სალტის ძაბვა და მისი ჰარმონიკული სპექტრი. ჯამური დამახინჯება მისთვის ტოლია:

$$THD \% (V. Gard.) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{3.84^2 + 2.09^2 + 4.81^2 + 3.63^2}}{170.98} \times 100 = \frac{17.35}{407.14} \times 100 = 4.35\%$$

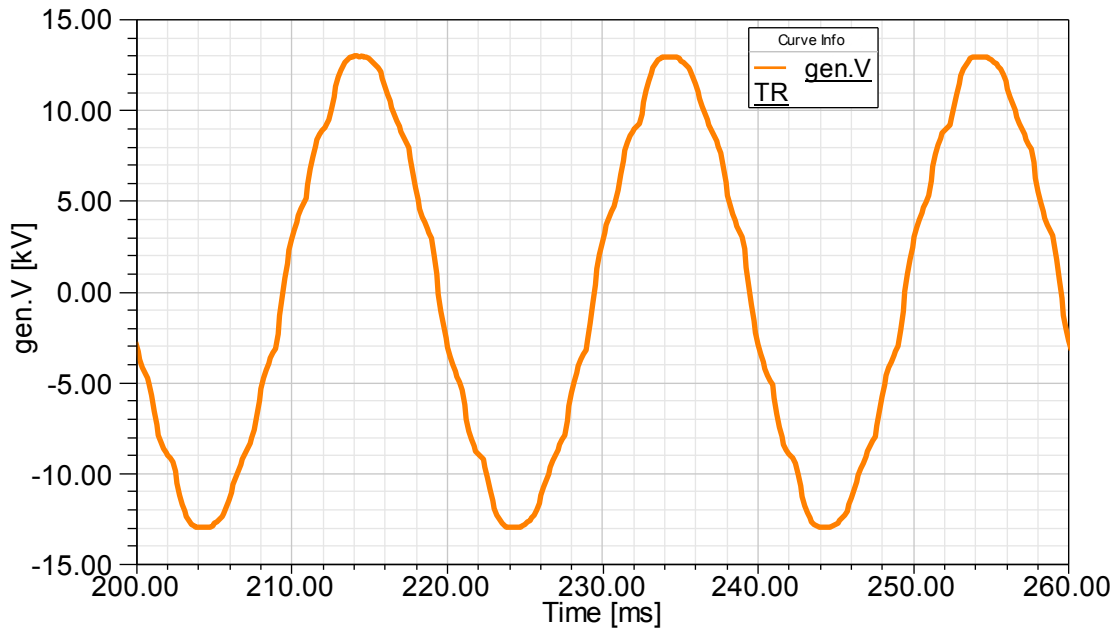


ნახ.31 დაბვა ქ/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ – ის სალტებზე

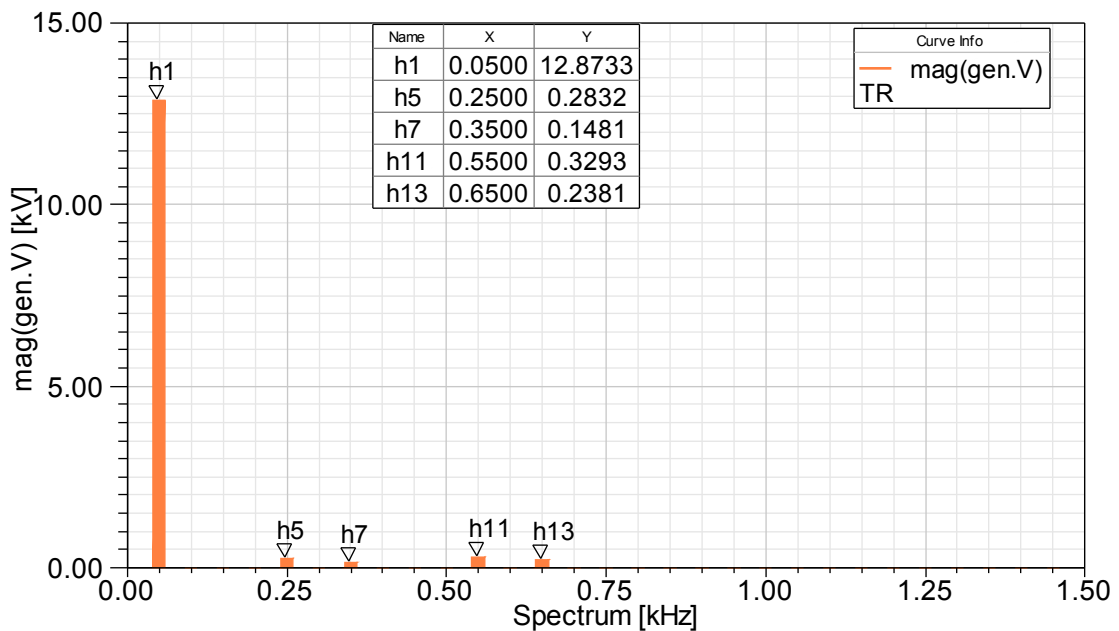


ნახ.32 ქ/ს “ქსანი 500” - ის 220 კვ – ის სალტის დაბვის სპექტრი

სინუსოიდური დაბვის დამახინჯება ასევე შესამჩნევია საგენერატორო დაბვაზეც. მაგალითისთვის რეზულტატი გამოვიყვანეთ ენგურის გ1-ის სალტის დაბვისთვის. ეს დაბვა და მისი ჰარმონიკული სპექტრი შესაბამისად 33-ე და 34-ე ნახაზებზეა მოცემული.



ნახ.33 ძაბვა ენგურის გ1-ის სალტებზე



ნახ.34 ენგურის გ1-ის სალტის ძაბვის სპექტრი

ჯამური დამახინჯება ენგურის პირველი გენერატორისთვის გვექნება:

$$\begin{aligned}
 THD \% (V. Eng.) &= \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 = \\
 &= \frac{\sqrt{0.28^2 + 0.15^2 + 0.33^2 + 0.24^2}}{12.87} \times 100 = \frac{0.517}{12.87} \times 100 = 4.02\%
 \end{aligned}$$

საქართველოს ელექტროსისტემი მაღალი ძაბვის ქსელის დანარჩენ კვანძებში ძაბვის ჰარმონიკულ დამახინჯებაზე წარმოდგენის შესაქმნელად დეტალური რეგულატორი ნაჩვენებია გვაქვს ცხნე-1-ში

ჰარმონიკის რიგი	ჰარმონიკის სიხშირე	ჰარმონიკის ამპლიტუდა						
		ახალციხე	ენგური	ზესტაფონი	გარდაბანი	ქსანი	წყალტუბო	ხუდონი
#	ჰც	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ
h 1	50	404.18	410.43	407.08	407.14	406.06	408.54	410.87
h 5	250	10.91	9.05	10.12	8.92	9.21	9.77	8.84
h 7	350	6.12	4.78	5.49	4.87	5.02	5.24	4.66
h 11	550	14.42	10.51	12.51	11.22	11.53	11.73	10.21
h13	650	11.09	7.68	9.40	8.49	8.71	8.71	7.44
h 17	850	4.34	0.2	0.3	0.15	0.21	0.25	2.12
h 19	950	0.03	0.005	0.01	0.09	0.01	0.004	0.025
h 23	1150	0.005	0.003	0.004	0.0025	0.003	0.002	0.01
h 25	1250	0	0	0	0	0	0	0
THD, %	-	5.57	4.04	4.77	4.26	4.39	4.48	3.95

ცხრ.1 საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ქსელის კვანძების ჰარმონიკული სპექტრი

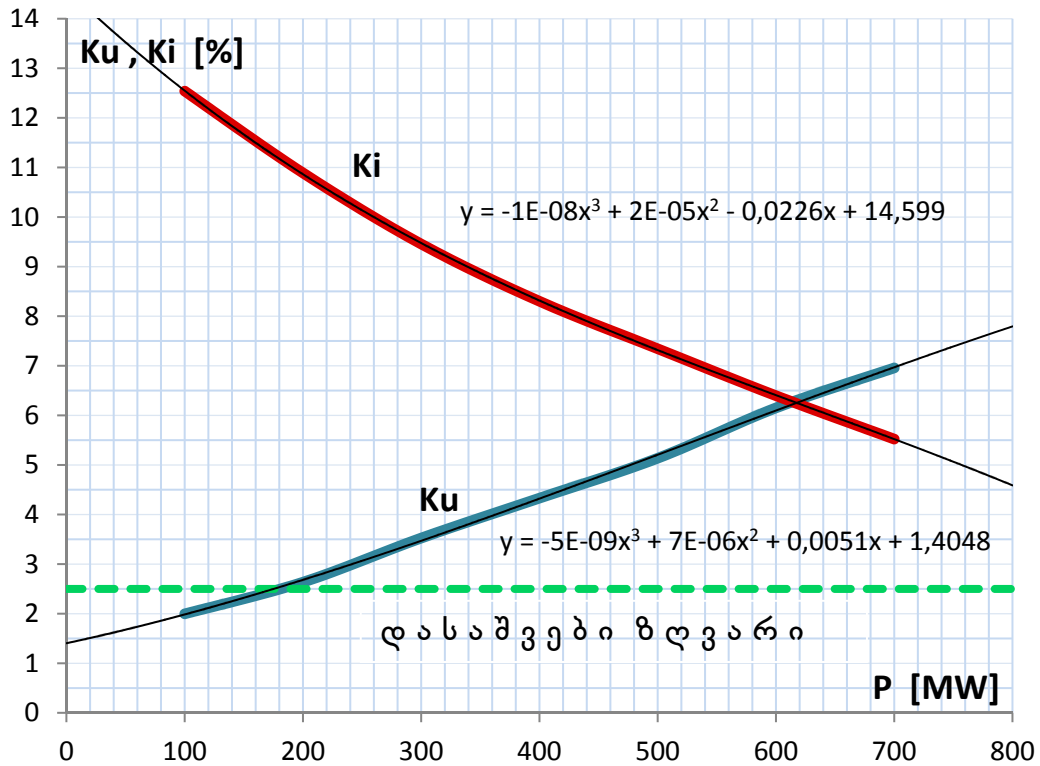
4.2 არასინუსოიდურობის ხარისხის დამოკიდებულება გადასაცემ სიმძლავრეზე სქემის პარამეტრების გათვალისწინებით

ზემოთ, 3.2 პარაგრაფში განხილული გვექონდა დაბების ჰარმონიკული დამახინჯების დამოკიდებულება გადასაცემ სიმძლავრეზე ისეთი კერძო შემთხვევისთვის, როდესაც მუდმივი დენის ჩანართი უშუალოდ იყო მიერთებული დაბვის წყაროსთან და სქემის პარამეტრები უგულებელყოფილი იყო. ასეთი მოდელირება მოვახდინეთ გაანგარიშებების საწყის სტადიაზე. საქართველოს ელექტროსისტემის 500 და 220 კვ დაბვის ქსელის გარკვეული ფრაგმენტის მოდელირების შემდეგ საშუალება გვაქვს გამოვიკვლიოთ თუ რა გავლენას ახდენს ჩანართით გადაცემული სიმძლავრის სიდიდე სიმძლავრის გამცემი სისტემის ქსელის დაბების არასინუსოიდურობაზე. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ “ანსოფტ სიმპლორერში” მოდელირებულ საქართველოს მაღალი დაბვის ქსელის ძირითად ნაწილს აქვს ნახ.22-ზე ნაჩვენები სახე.

მოდელირების საწყის ეტაპზე მიღებული შედეგების თანახმად ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი სიმძლავრის 100 დან 700 მგვტმდე გაზრდისას დაახლოებით 12%-დან 8%-მდე მცირდებოდა. ახალციხის 500 კვ დაბვის სალტებზე კი დაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი 0.8%-დან 2.1%-მდე იზრდებოდა.

ქსელის მოდელირების შემდეგ მოვახდინეთ ახალციხის ჩანართის მიერ თურქეთში გაცემული სიმძლავრის კვლავ 100 დან 700 მგვტ-მდე 100 მგვტ-იანი ბიჭით ცვლილება და გამოვთვალეთ ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტები 500 კვ დაბვის ქსელის სხვადასხვა კვანძებისათვის.

ნახ.35-ზე ნაჩვენებია დენისა და დაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება ქსელის მოდელის გათვალისწინებით ახალციხის 500 კვ დაბვის სალტისთვის. (დენში იგულისხმება ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი ჯამური დენი, ანუ კონვერტორის ტრანსფორმატორების პირველადი გრაგნილების დენების ჯამი).

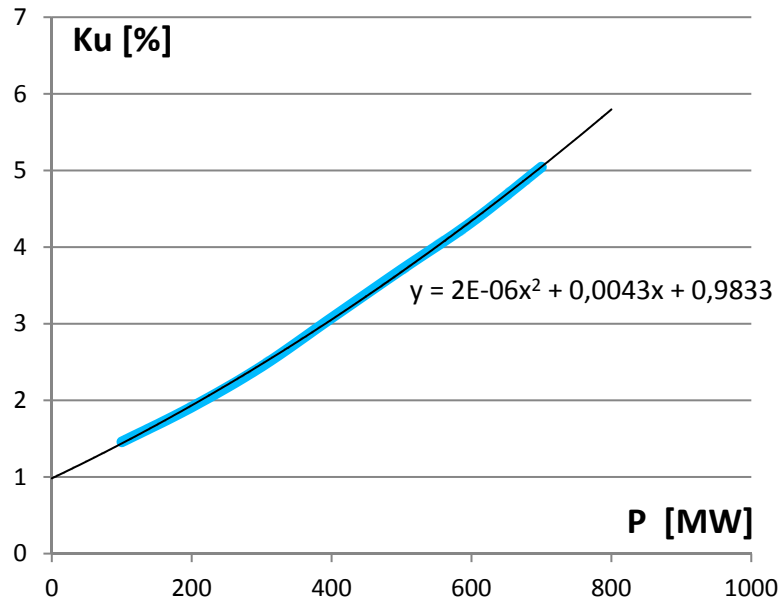


ნახ.35 ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება ქსელის პარამეტრების გათვალისწინებით

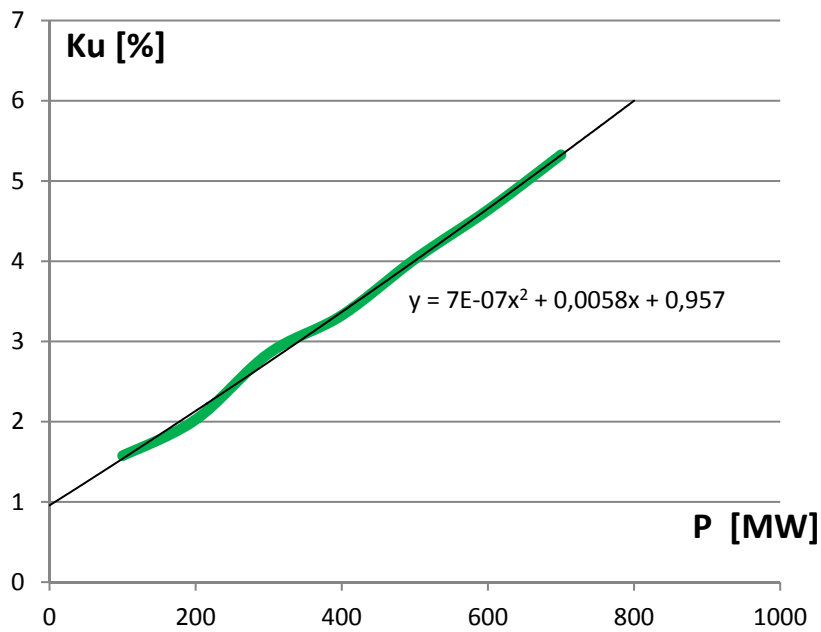
როგორც ნახ.35-დან ჩანს ქსელის გავლენის გათვალისწინებით ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად განსხვავდება მოდელირების საწყის ეტაპზე მიღებული შედეგებისაგან.

დენის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი სიმძლავრის აღნიშნულ დიაპაზონში 12.6%-დან 5.5%-მდე მცირდება, ხოლო ძაბვის ჯამური დამახინჯება კი 1.9%-დან 7%-მდე იზრდება.

ქსელის დანარჩენ კვანძებში ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის სიმძლავრეზე დამოკიდებულების გამოკვლევის მიზნით განვიხილეთ ენგურის და გარდაბანის 500 კვ ძაბვის კვანძები. ამ კვანძებითვის ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების სიმძლავრეზე დამოკიდებულება ნაჩვენებია 36-ე და 37-ე ნახაზებზე



ნახ.36 ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება ენგურის 500 კვ ძაბვის კვანძისთვის



ნახ.37 ძაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტის გადასაცემ სიმძლავრეზე დამოკიდებულება გარდაბანის 500 კვ ძაბვის კვანძისთვის

მიღებული მრუდებიდან შეიძლება ითქვას რომ ქსელის გავლენა დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტების სიდიდეებში საკმაოდ

შესამჩნევია. განსაკუთრებით დიდ განსხვავებას ვლენულობთ დაბვის დამახინჯების კოეფიციენტებში.

რაც შეეხება ჩანართისაგან ელექტრულად დაშორებულ კვანძებს, აქ დაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების ცვლილების კანონზომიერებაში რაიმე განსაკუთრებული განსხვავება არ შეიმჩნევა.

4.3 n-1 ანალიზი

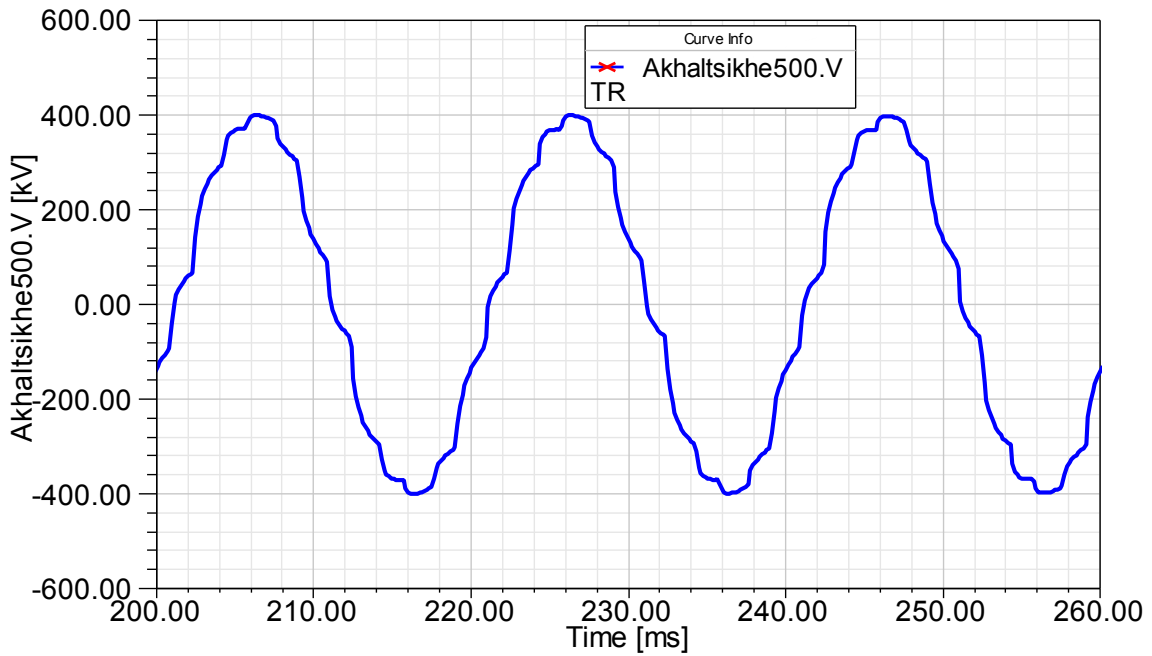
500 კვ დაბვის წრეში რომელიმე ეგზ-ის რემონტში ჩაყენების ან სხვა რაიმე მიზეზით გეგმიური (ან ავარიული) გამორთვის შემთხვევაში ქსელი მეტ-ნაკლებად სუსტდება და, მუდმივი დენის ჩანართის პირობებში, ეს შესუსტება გამოიწვევს ქსელის კვანძებში სინუსოიდური დაბვის დამახინჯების გაძლიერებას, რამდენადაც ასეთ სიტუაციაში ჩანართის მკვებავი ხაზების ეკვივალენტური წინალობა გაიზრდება და შესაბამისად ჰარმონიკული დაბვის ვარდნები გაზრდილ წინალობებზე კიდევ უფრო მაღალი იქნება.

n-1 ანალიზის ჩასატარებლად განვიხილეთ “ზესტაფონი – ახალციხე” ელექტროგადაცემის ხაზის ავარიული გამორთვა.

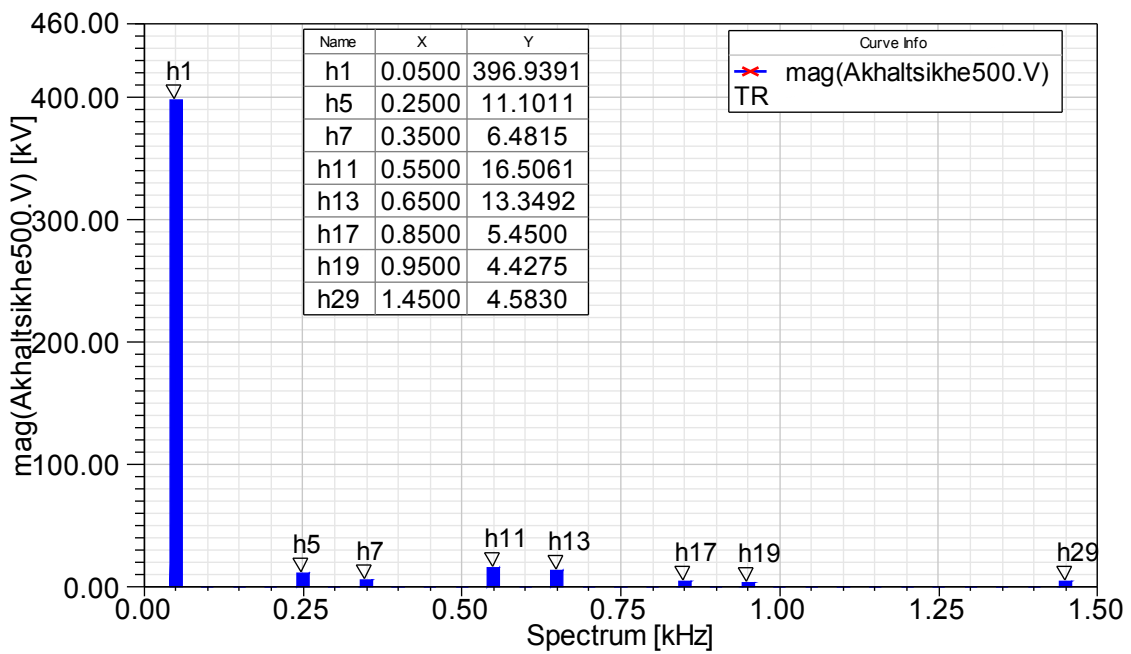
განგარიშებები ჩავატარეთ ახალციხის კვანძიდან ჩანართით 690 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტისას. ახალციხის 500 კვ დაბვის სალტებზე დაბვის დამახინჯების სურათი და მისი ჰარმონიკული სპექტრი 38-ე და 39-ე სურათებზეა ნაჩვენები.

ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ახალციხის კვანძისთვის ტოლია:

$$\begin{aligned}
 THD \% (V. Akhal) &= \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2 + h_{17}^2 + h_{19}^2 + h_{29}^2}}{h_1} \times 100 = \\
 &= \frac{\sqrt{11.1^2 + 6.48^2 + 16.51^2 + 13.35^2 + 5.45^2 + 4.42^2 + 4.58^2}}{396.93} \times 100 = \\
 &= \frac{26,19}{396,93} \times 100 = 6,59\%
 \end{aligned}$$



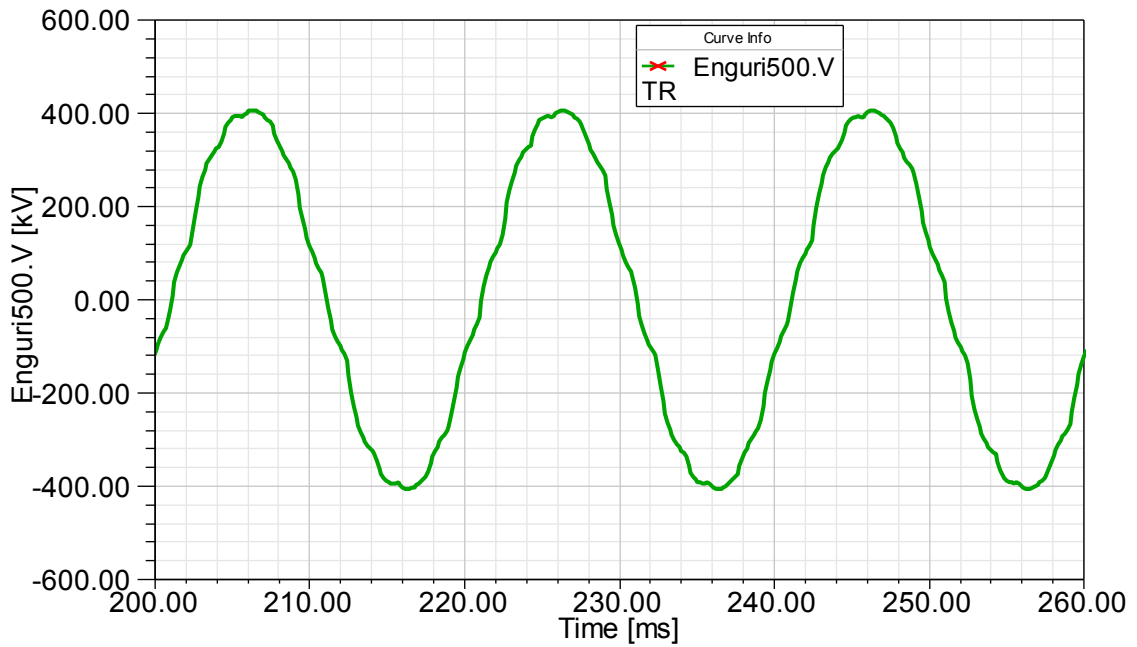
ნახ.38 დაბვა ე/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე



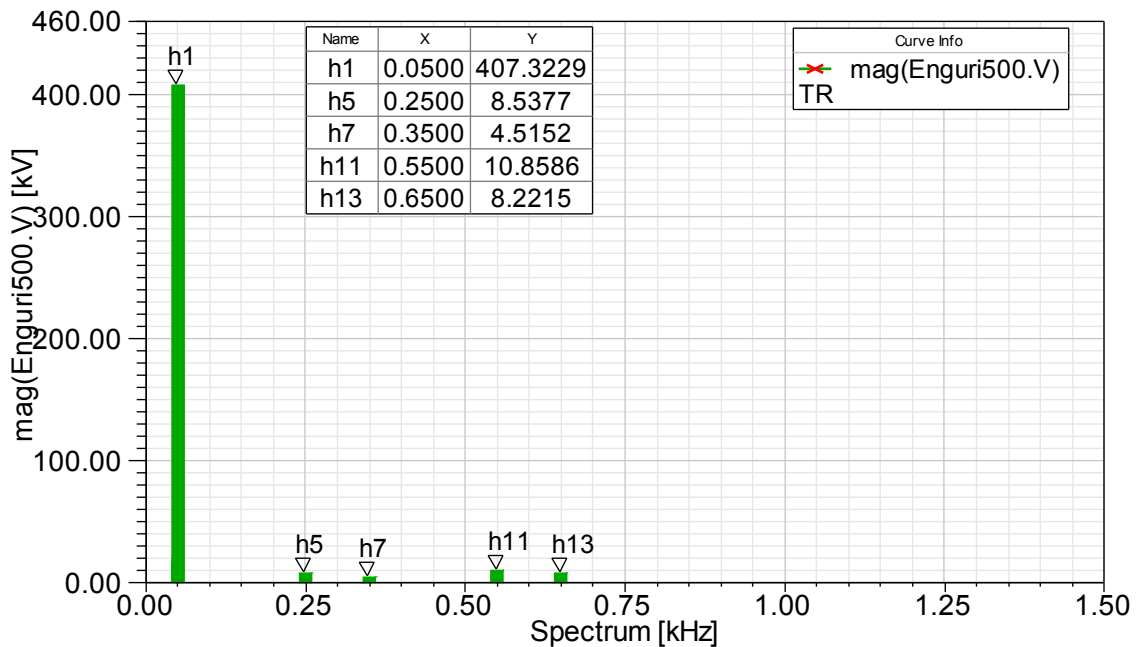
ნახ.39 ე/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ – ის სალტის დაბვის სპექტრი

როგორც ჩანს n-1 რეჟიმში ახალციხის კვანძში დაბვის დამახინჯება თითქმის 1% -ითაა გაზრდილი ავარიისწინა რეჟიმში დამახინჯების კოეფიციენტთან (5.57%) შედარებით. მართალია ეს ნაზრდი მცირეა, მაგრამ ფილტრების შერჩევისას გასათვალისწინებელია.

ენგურის 500 კვ სალტის დაბვა და მისი სპექტრი მოცემულია, შესაბამისად, მე-40 და 41-ე ნახაზებზე.



ნახ.40 ძაბვა ქ/ს “ენგური 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

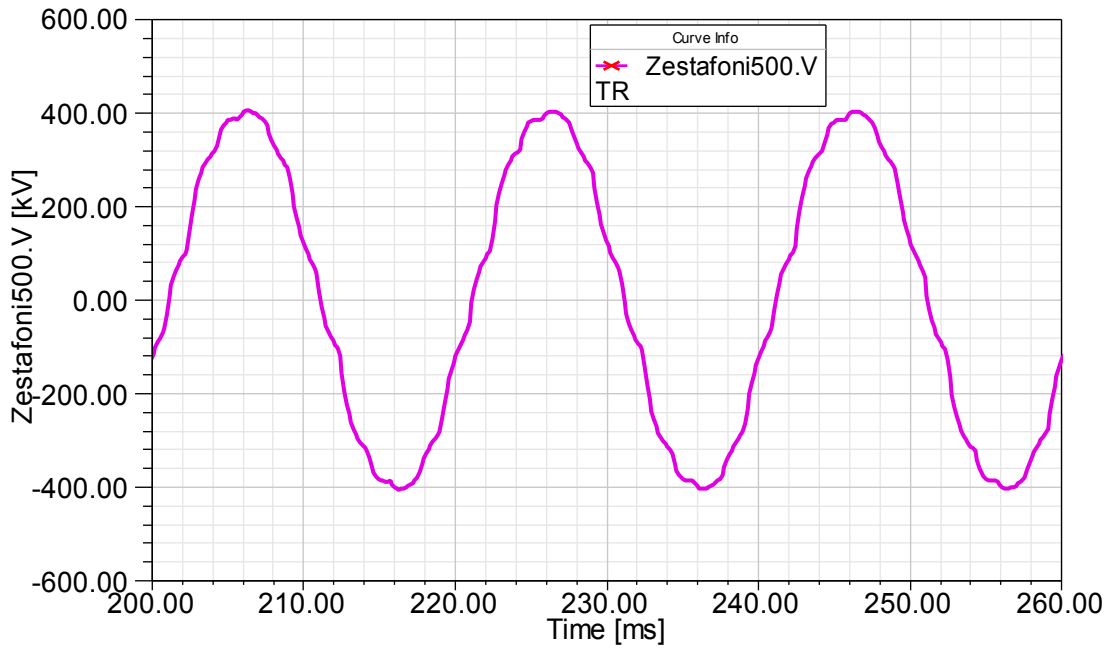


ნახ.41 ქ/ს “ენგური 500”-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი

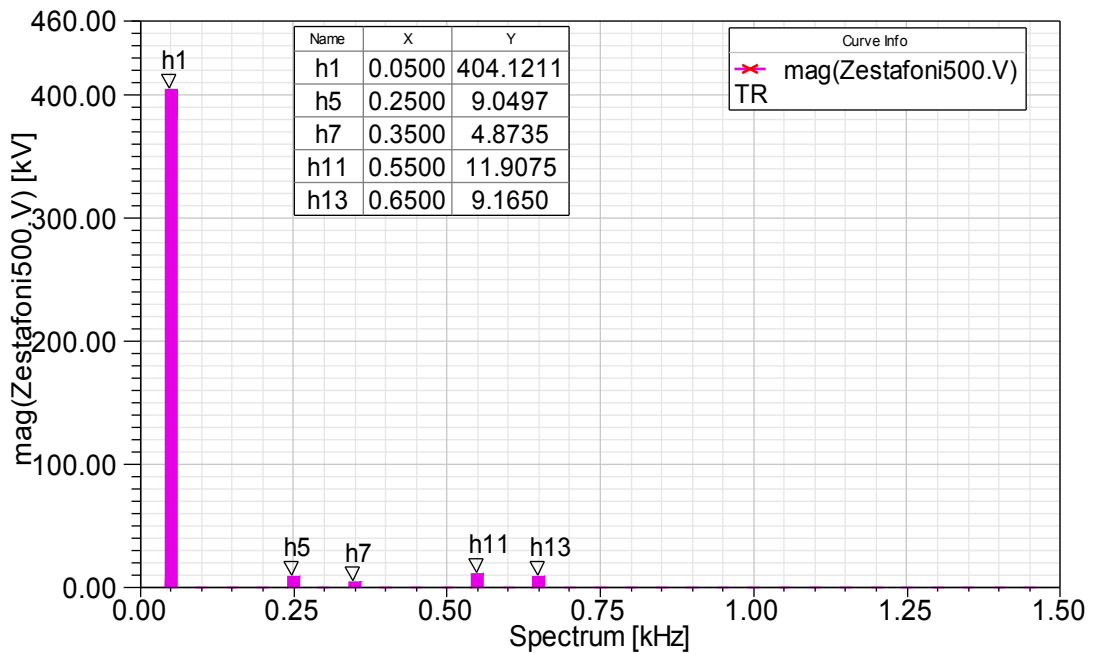
გამოთვალეთ THD ენგურის 500 კვ ძაბვის სალტისთვის:

$$\begin{aligned}
 THD \% (V.Enguri) &= \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 = \\
 &= \frac{\sqrt{8.54^2 + 4.52^2 + 10.86^2 + 8.22^2}}{407.32} \times 100 = \frac{16.96}{407.32} \times 100 = 4.17\%
 \end{aligned}$$

42-ე და 43-ე ნახაზებზე ნაჩვენებია რეზულტატები “ზესტაფონი 500”-სთვის



ნახ.42 დაბვა ქ/ს “ზესტაფონი 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

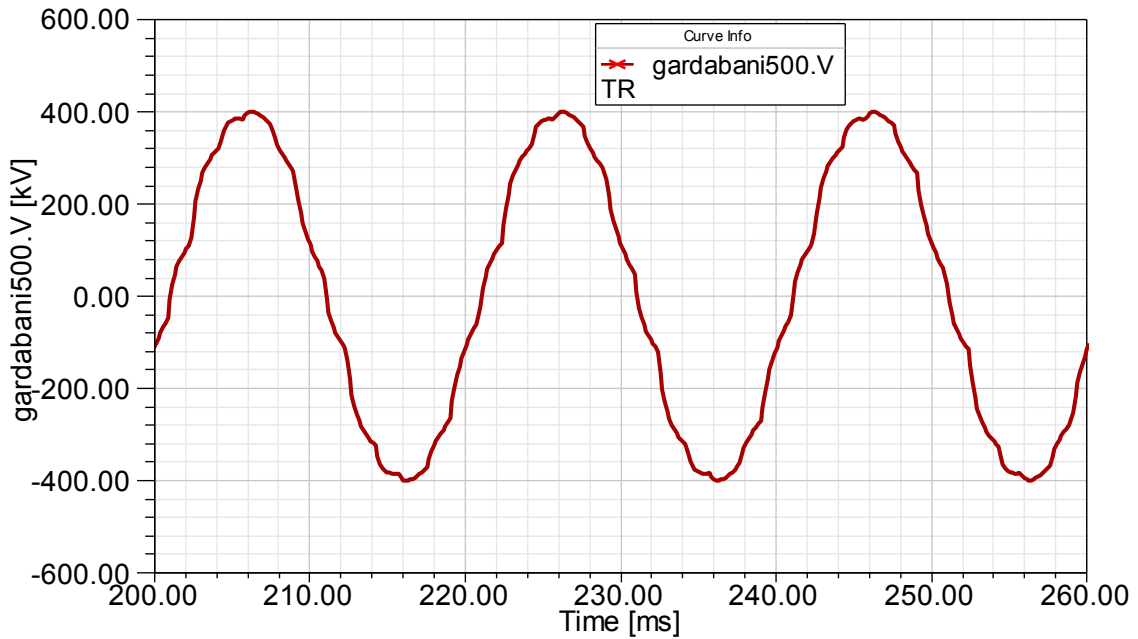


ნახ.43 ქ/ს “ზესტაფონი 500”-ის 500 კვ – ის სალტის დაბვის სპექტრი

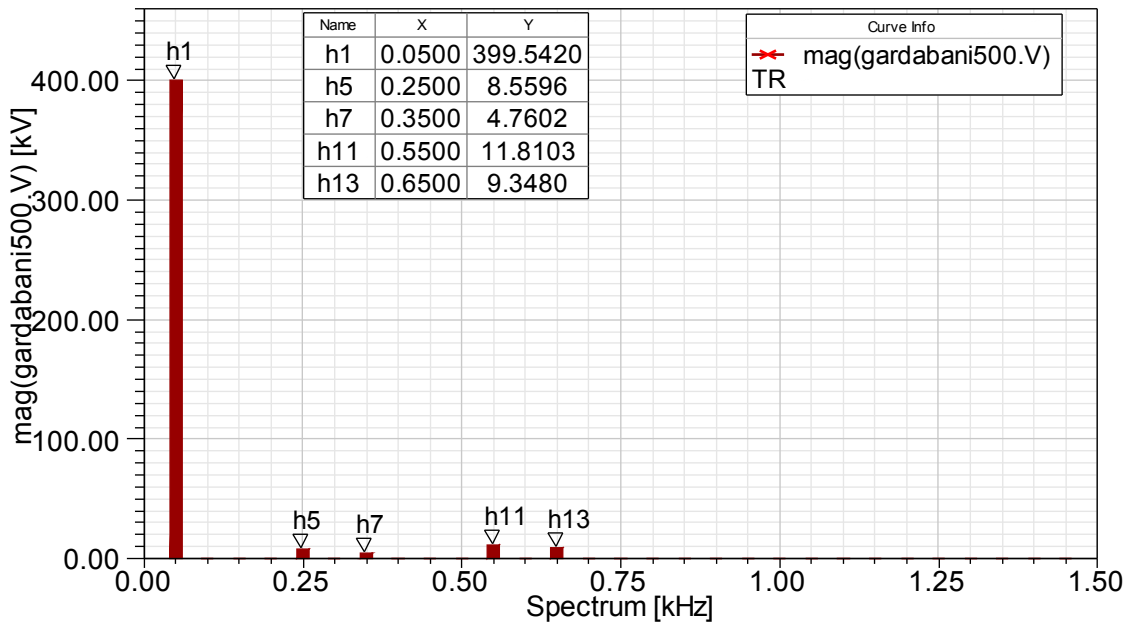
ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ზესტაფონის კვანძითვის გვექნება:

$$\begin{aligned}
 THD \% (V.Zest) &= \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 = \\
 &= \frac{\sqrt{9.05^2 + 4.87^2 + 11.91^2 + 9.17^2}}{404.12} \times 100 = \frac{18.21}{404.12} \times 100 = 4.51\%
 \end{aligned}$$

ქ/ს “გარდაბანი 500”-ის 500 კვ სალტის ძაბვის მრუდი და მისი ჰარმონიკული სპექტრი ნაჩვენებია, შესაბამისად, 44-ე და 45-ე ნახაზებზე.



ნახ.44 ძაბვა ქ/ს “გარდაბანი 500”-ის 500 კვ – ის სალტებზე

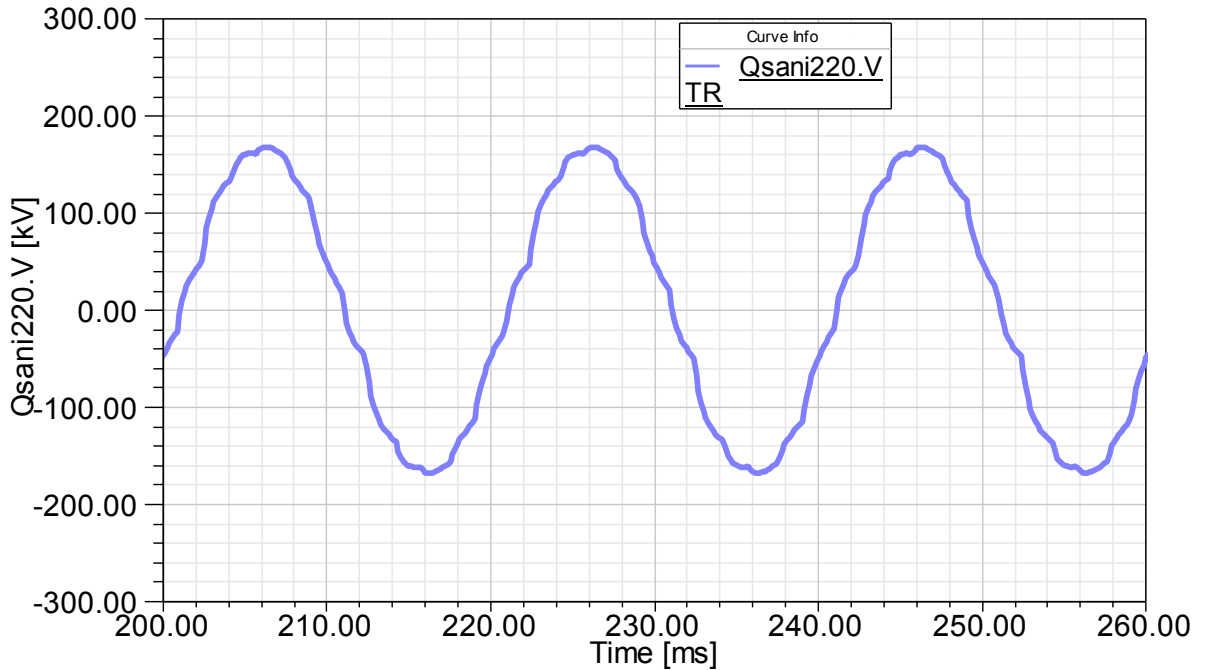


ნახ.45 ქ/ს “გარდაბანი 500”-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი გარდაბანის კვანძისთვის იქნება:

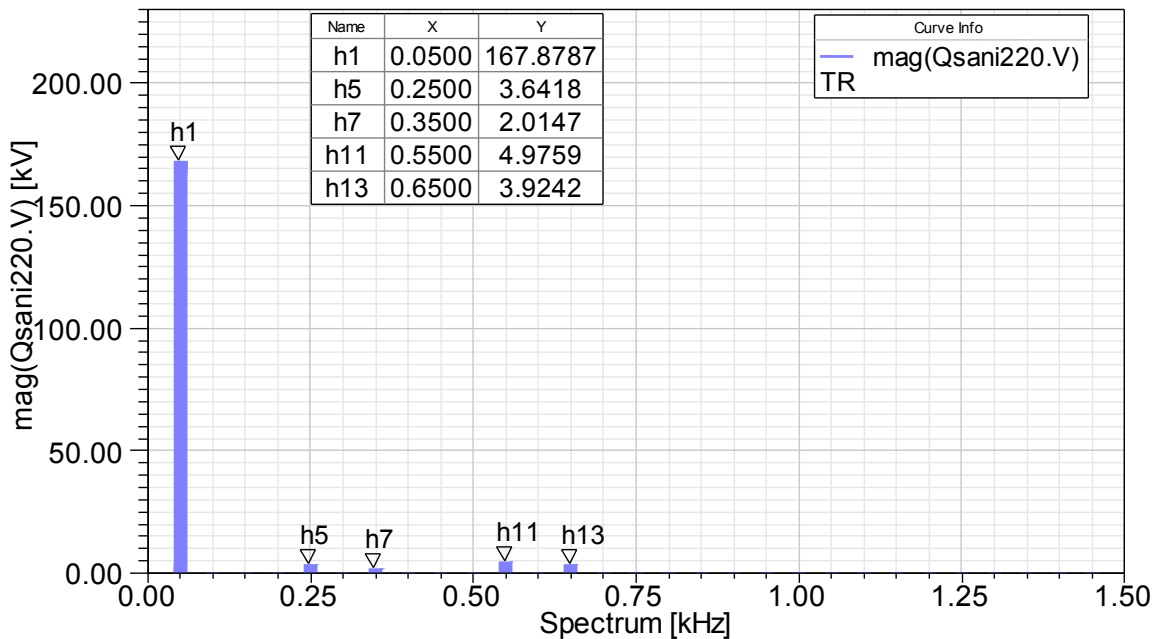
$$THD \% (V. Gard) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{8.56^2 + 4.76^2 + 11.81^2 + 9.35^2}}{399.54} \times 100 = \frac{17.97}{399.54} \times 100 = 4.497\%$$

რაც შეეხება 220 კვ ძაბვის ქსელს, შეფასებისთვის ჰარმონიკული ანალიზი ჩავატარეთ ქსანის 220 კვ სალტის ძაბვისთვის. რეზულტატი 46-ე და 47-ე ნახაზებზეა ნაჩვენები.



ნახ.46 ძაბვა ქ/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ – ის სალტზე



ნახ.47 ქ/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი

ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ქს ქსანის 220 კვ სალტისთვის იქნება:

$$THD \% (V. Qsani) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{3.64^2 + 2.02^2 + 4.98^2 + 3.92^2}}{167.88} \times 100 = \frac{7.58}{167.88} \times 100 = 4.52\%$$

საინტერესოა აგრეთვე, თუ რა წილი აქვს თითოეულ (ინდივიდუალურ) ჰარმონიკას ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტში. ამის შეფასებისთვის განვიხილოთ ახალციხის კვანძის დაბვა, რადგან დამახინჯების წყარო სწორედ აქ გვაქვს. ახალციხის 500 კვ დაბვის სპექტრს აქვს ცხრ.2-ში მოცემული სახე:

ცხრ.2 ახალციხის ქვესადგურის 500 კვ სალტის დაბვის სპექტრი

#	სიხშირე, კჰც	ამპლიტუდა, კვ
h1	0.05	396.9391
h5	0.25	11.1011
h7	0.35	6.4815
h11	0.55	16.5061
h13	0.65	13.3492
h17	0.85	5.4500
h19	0.95	4.4275
h29	1.45	4.5830

გამოვთვალოთ ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება თითოეული ჰარმონიკისათვის

$$IHD (h5)\% = \frac{h_5}{h_1} \times 100 = \frac{11.1}{396.94} \times 100 = 2.79$$

$$IHD (h7)\% = \frac{h_7}{h_1} \times 100 = \frac{6.48}{396.94} \times 100 = 1.63$$

$$IHD (h11)\% = \frac{h_{11}}{h_1} \times 100 = \frac{16.51}{396.94} \times 100 = 4.15$$

$$IHD (h13)\% = \frac{h_{13}}{h_1} \times 100 = \frac{13.35}{396.94} \times 100 = 3.36$$

$$IHD (h17)\% = \frac{h_{17}}{h_1} \times 100 = \frac{5.45}{396.94} \times 100 = 1.37$$

$$IHD (h19)\% = \frac{h19}{h1} \times 100 = \frac{4.43}{396.94} \times 100 = 1.12$$

$$IHD (h29)\% = \frac{h29}{h1} \times 100 = \frac{4.58}{396.94} \times 100 = 1.15$$

პროცენტულად ყველაზე დიდი წილი ჯამურ ჰარმონიკულ დამინჯებაში მე-11 რიგის ჰარმონიკას აქვს, რაც სავსებით ლოგიკურია რადგან ახალციხის ჩანართში გამოყენებულია 12-პულსიანი სქემა, რომელიც მოიცავს მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკების ჩახშობის ღონისძიებას.

ცხრ.3-ში მოყვანილია საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ძაბვის ქსელი ჰარმონიკული სპექტრი საქართველოდან თურქეთში დაახლოებით 700 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტისას n-1 რეჟიმში (“ზესტაფონი – ახალციხის” გამორთვა). აღნიშნული ცხრილის ცხრ.1-თან (ავარიისწინა რეჟიმი) შედარება გვაძლევს სურათს, თუ რამდენად მძიმდება სიტუაცია არასინუსოიდურობის კუთხით.

4.4 კანონიკური და არაკანონიკური ჰარმონიკები

ჩანართის სტრუქტურის განხილვისას (თავი II) ავლნიშნეთ, რომ 12-პულსიანი ბლოკის მკვებავი ტრანსფორმატორებიდან ერთის მეორეული გრავნილი ჩართულია ვარსკვლავად, მეორისა კი სამკუთხედად, რაც წარმოადგენს მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკების ჩახშობის ღონისძიებას. იდეალურად გასწორებული მუდმივი დენის პირობებში ჩანართის ტრანსფორმატორების მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენების (ნახ.48) ფურიეს ანალიზი გვაძლევს შემდეგ გამოსახულებებს:

1)Y/Y

$$I = \frac{2 \times \sqrt{3}}{\pi} \times I_d \times \left[\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t \dots \right] (16)$$

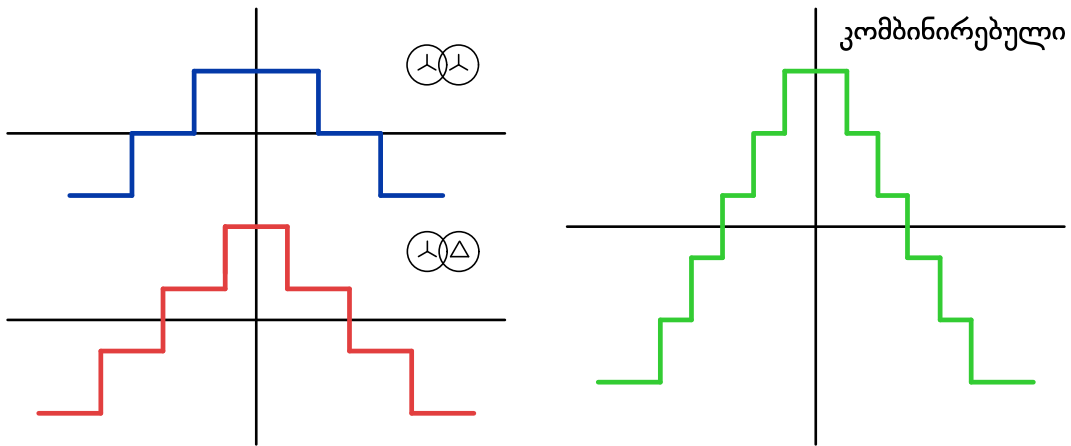
2)Y/Δ

$$I = \frac{2 \times \sqrt{3}}{\pi} \times I_d \times \left[\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5 \omega t - \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t \dots \right] (17)$$

ჰარმონიკის რიგი	ჰარმონიკის სიხშირე	ჰარმონიკის ამპლიტუდა						
		ახალციხე	ენგური	ზესტაფონი	გარდაბანი	ქსანი	წყალტუბო	ხუდონი
#	ჰც	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ	კვ
h 1	50	396.94	407.32	404.12	399.54	401.1	402.21	403.5
h 5	250	11.10	8.54	9.5	8.56	9.32	9.91	8.91
h 7	350	6.48	4.52	4.87	4.76	5.11	5.31	4.72
h 11	550	16.51	10.86	11.91	11.81	10.52	11.22	10.41
h13	650	13.35	8.22	9.17	9.35	8.9	8.93	7.88
h 17	850	5.45	0.01	0.05	0.02	0.01	0.06	0.03
h 19	950	4.43	0.004	0.02	0.04	0.015	0.002	0.002
h 23	1150	0.002	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001
h 25	1250	0	0	0	0	0	0	0
h 29	1450	4.58	0	0	0	0	0.02	0.05
THD, %	-	6.59	4.18	4.51	4.49	4.35	4.53	4.09

ცხრ.3 საქართველოს ელექტროსისტემის 500 კვ ქსელის კვანძების ჰარმონიკული სპექტრი N-1 რეჟიმში

ამ გამოსახულებებიდან ნათლად ჩანს რომ თითოეული 6-პულსიანი ბლოკი გენერირებს $6n \pm 1$ ($n=1, 2, 3 \dots$) რიგის ჰარმონიკებს. ტრანსფორმატორების მეორეული გრგვანილების ფაზების ერთმანეთისაგან 30 გრადუსით დაძვრის შედეგად დენის ფორმა უფრო უახლოვდება სინუსოიდას (ნახ.35)



ნახ.48 12-პულსიანი კონვერტორის დენები

ასეთი მრუდის ფურიეს ანალიზი ფაქტიურად წარმოადგენს ცალცალკე აღებული 6-პულსიანი ბლოკების გამოსახულებების ჯამს, სადაც მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკები საპირისპირო ნიშნის გამო ბათილდებიან:

$$I = \frac{4 \times \sqrt{3}}{\pi} \times I_d \times \left[\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t - \frac{1}{23} \cos 23 \omega t + \frac{1}{25} \cos 25 \omega t \dots \right] \quad (18)$$

ე.ი. 12 პულსიან ბლოკებში კვებავი ქსელის ძაბვის ჯამურ დამახინჯებაში წამყვან როლს თამაშობენ $12n \pm 1$ ($n=1, 2, 3 \dots$) რიგის ჰარმონიკები, რაც შესამჩნევი იყო ზემოთ ჩატარებული მოდელირების რეზულტატების გამოყვანისას. თუმცა ეს გამოსახულებები სამართლიანია პირობებისთვის, როდესაც მუდმივი დენის რეაქტორის ინდუქციურობა უსასრულოდ დიდია და კონვერტორული სისტემის მკვებავი სისტემის ცვლადი ძაბვების მრუდები კი იდეალური სინუსოიდები. ასეთი იდეალური პირობებით მიღებულ ჰარმონიკებს კანონიკური ჰარმონიკები ეწოდებათ. მაგრამ რეალურ სისტემებში არც მკვებავი ქსელიც და ძაბვებიც

კონვერტორის დენებიც იდეალურისაგან ხშირად საკმაოდ განხვავებულია. ამიტომ საყვარებით ლოგიკურია, რომ პრაქტიკაში გარდა ზემოთ აღნიშნული კანონიკური ჰარმონიკებისა გვხვდება სხვა რიგის ჰარმონიკებიც, რომლებსაც არაკანონიკური ჰარმონიკები ეწოდებათ [24].

არაკანონიკური ჰარმონიკების გამომწვევი მიზეზები შესაძლოა სხვადასხვა იყოს: მკვებავი ძაბვების ასიმეტრია (რაც იწვევს ნულოვანი მიმდევრობის დენების გაჩენას), კონვერტორის ტრანსფორმატორების ფანტვის ინდუქტივობების არატოლობა (რაც იწვევს მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკების გამოჩენას, რომლებიც სქემის მიხედვით უნდა გაბათილებულიყვნენ), კონვერტორის ტრანსფორმატორების შემყვანების ტევადობების სხვადასხვაობა და ა.შ.

არაკანონიკური ჰარმონიკების გაჩენის ერთერთი მიზეზია ასიმეტრია მკვებავი სამთაბა სისტემის წრედში. ასეთი ასიმეტრია ყველაზე მკვეთრ სახეს იღებს ერთთაბა მოკლე შერთვის დროს, როდესაც მოკლე შერთვის შემდეგ ხორციელდება დაზიანებული ფაზის ავტომატური განმეორებითი ჩართვა. ასეთი არასიმეტრიისას არაკანონიკური ჰარმონიკების გაჩენის პროცესის მოდელირება და ანალიზი შესრულებულია მომდევნო პარაგრაფში.

4.5 ერთთაბა მშ და აგჩ ეგხ “ზესტაფონი – ახალციხეზე”

ხშირად საჰაერო ხაზებზე ერთთაბა მოკლე შერთვის გამომწვევი მიზეზი არის იზოლაციის გადათარვა, რომელსაც როგორც წესი იწვევს ატმოსფერული გადამეტება. დაზიანებული ფაზის გამორთვის შემდეგ მცირე დროის გასვლის შემდეგ (დაახლოებით 1 წამი) გარღვეული საიზოლაციო შუალედი კვლავ აღიდგენს დიელექტრიკულ თვისებებს, ანუ ჰაერი დეიონიზირდება და ასეთ პირობებში დაზიანებული ფაზის კვლავ ჩართვა საშუალებას იძლევა აღდგეს ეგხ-ის ნორმალური ფუნქციონირება. აღნიშნული პროცედურა ელექტრულ სისტემებში ხორციელდება ავტომატური განმეორებითი ჩართვის (აგჩ) მოწყობილობის საშუალებით.

დროის შუალედს ფაზის გამორთვიდან განმეორებით ჩართვამდე აგჩ-ს პაუზას უწოდებენ.

აღნიშნული სახის მოკლე შერთვები და შესაბამისად თანმდევი ავტომატური განმეორებითი ჩართვაც არც ისე იშვიათია ნებისმიერ ელექტროსისტემაში. განვიხილოთ ასეთი პროცესის მოდელირება საქართველოს ელექტროსისტემაში მუდმივი დენის ჩანართის პირობებში.

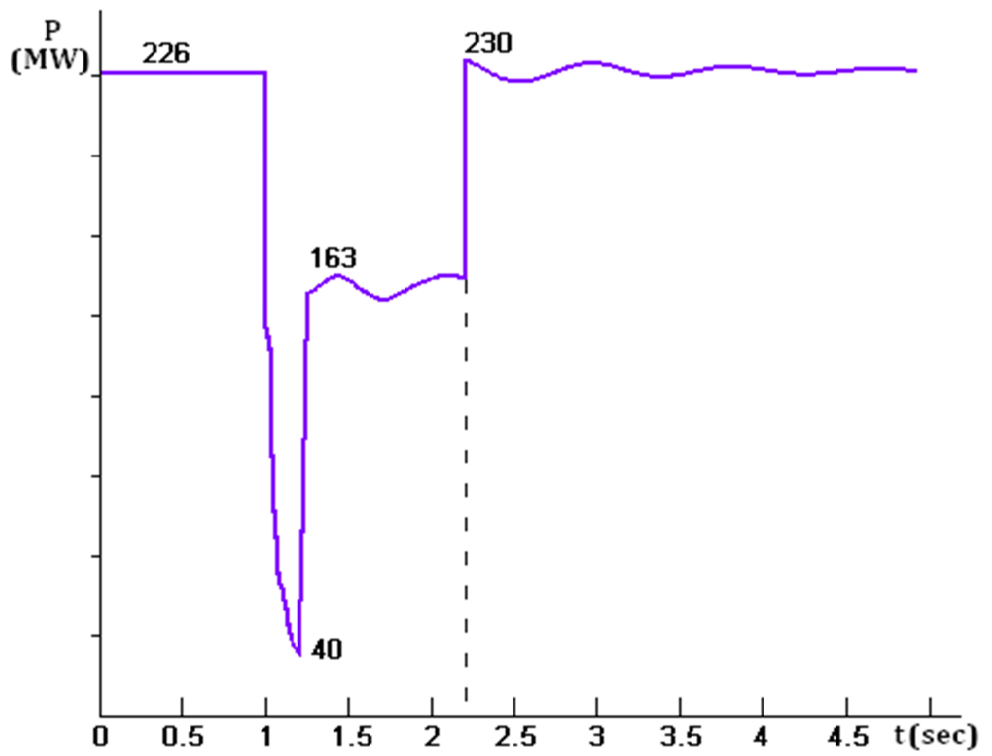
აგჩ-ს დროს მიმდინარე პროცესების შესასწავლად გამოვიყენეთ ორი კომპიუტერული პროგრამა PSS/E და AS.

მუდმივი დენის ჩანართის მოდელი, რომელიც PSS/E-ში გვაქვს გამოყენებული, შეიცავს ინვერტორულ წრედსაც და კონტროლის ბლოკსაც. ასევე გააჩნია სისტემის სიხშირით და სიხშირის წარმოებულთ სიმძლავრის რეგულირების მოდელი, რომელიც ფაქტიურად წარმოადგენს ჩანართის დამატებით კონტროლს. თუმცა ეს უკანასკნელი ჩვენ მოდელირებისას გამორთული გვაქვს რადგან ამ კერძო შემთხვევაში მისი გავლენა არ გვაინტერესებს.

განვიხილოთ რეჟიმი რომელშიც საქართველოს ელექტროსისტემიდან თურქეთის ელექტროსისტემაში მუდმივი დენის ჩანართის გავლით გადის დაახლოებით 680 მგვტ სიმლავრე. ეგზ "ზესტაფონი - ახალციხეზე" მოვახდინეთ ერთფაზა მოკლე შერთვა და განვახორციელოთ ავტომატური განმეორებითი ჩართვა.

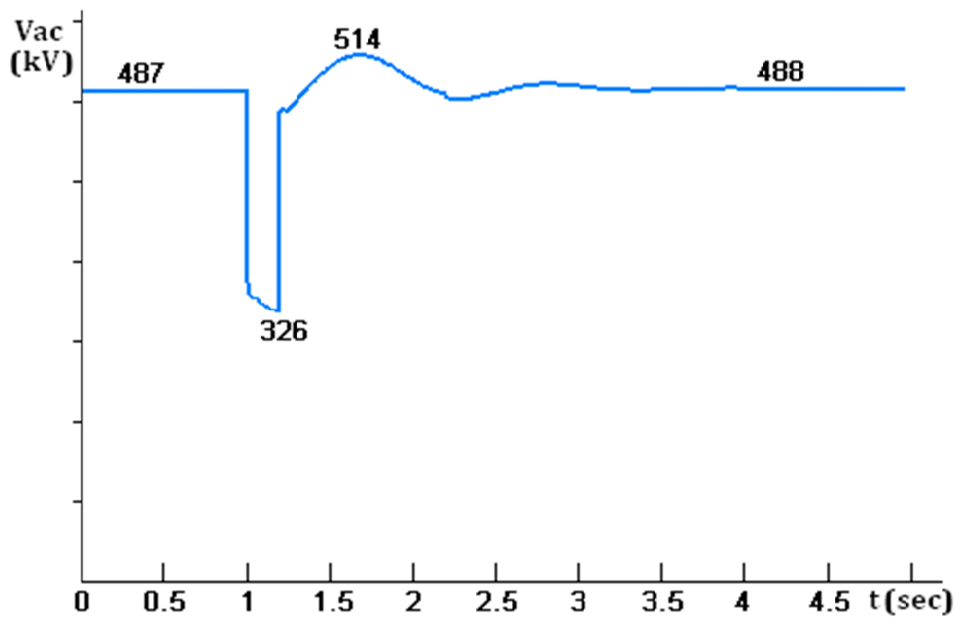
ავარიის წინა რეჟიმში ელექტროსისტემა მუშაობდა ნორმალურად და, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, თურქეთის მიმართულებით ჩანართის გავლით გადადინება შეადგენს 680 მგვტ-ს. $t=1$ წმ-ზე ეგზ "ზესტაფონი - ახალციხეზე" მოხდა ერთფაზა მშ 0.2 წამის ხანგრძლივობით. 0.2 წმ-ში დაზიანებული ფაზა ამოირთო და ერთი წამის შემდეგ (აგჩ-ს პაუზა) კვლავ ჩაირთო.

49-ე ნახაზზე ნაჩვენებია სიმძლავრის გადადინების ცვლილება ეგზ "ზესტაფონი ახალციხეზე". როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს ნორმალურ რეჟიმში გადიოდა 226 მგვტ სიმლავრე, ფაზაზე მოკლე შერთვის შუალედში გადადინება ეცემა 40 მგვტ-მდე. მოკლე შერთვის მოხსნის მომენტიდან აგჩ-ს პაუზის დასრულებამდე გადადინება დაახლოებით 163 მგვტ-ს აღწევს, რაც შეესაბამება ორი ჯანსაღი ფაზით მუშაობას.



ნახ.49 გადაღინება ევბ “ზესტაფონი – ახალციხეზე”

აგჩ-ს განხორციელებისას, ანუ გათიშული ფაზის კვლავ ჩართვისას სიმძლავრე აღნიშნულ ხაზში ბრუნდება საწყის მნიშვნელობასთან ახლოს.

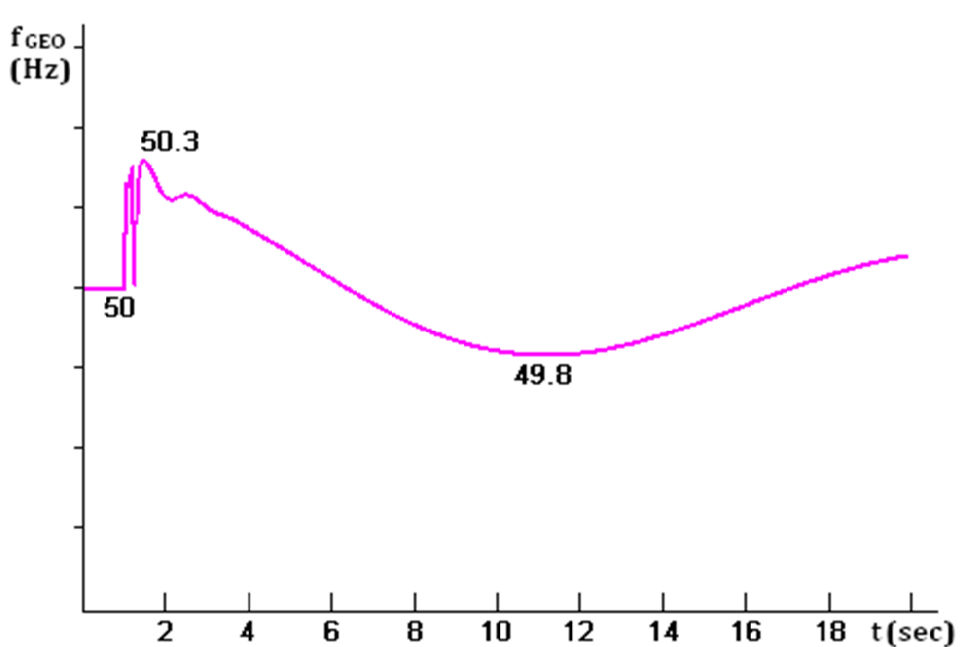


ნახ.50 დაბვა ახალციხის 500 კვ სალტებზე

50-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ხაზური დაბვა ახალციხის 500 კვ სალტებზე. ავარიამდე მისი მნიშვნელობა 487 კვ-ია და მოკლე შერთვის მომენტში

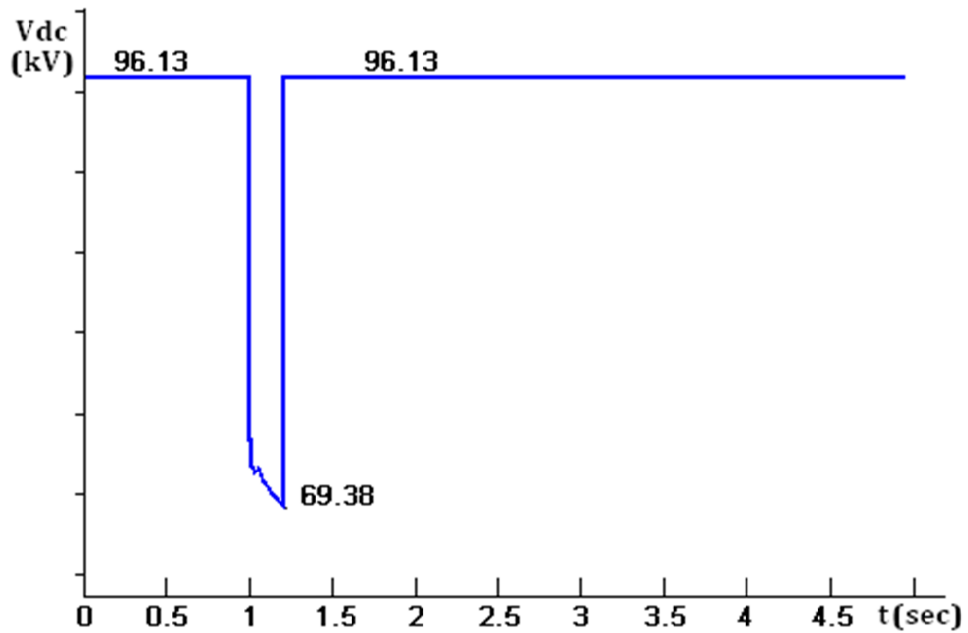
ეცემა 326 კვ-მდე, მისი მოხსნის შემდეგ მცირე ამპლიტუდის მქონე რხევითი პროცესით უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.

51-ე ნახაზზე ნაჩვენებია საქართველოს ელექტროსისტემაში სიხშირის ცვლილება. ავარიის მომენტში იგი იზრდება 50.3 ჰერცამდე, შემდეგ ეცემა 49.8 ჰერცამდე და რამდენიმე რხევითი პერიოდის შემდეგ უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.



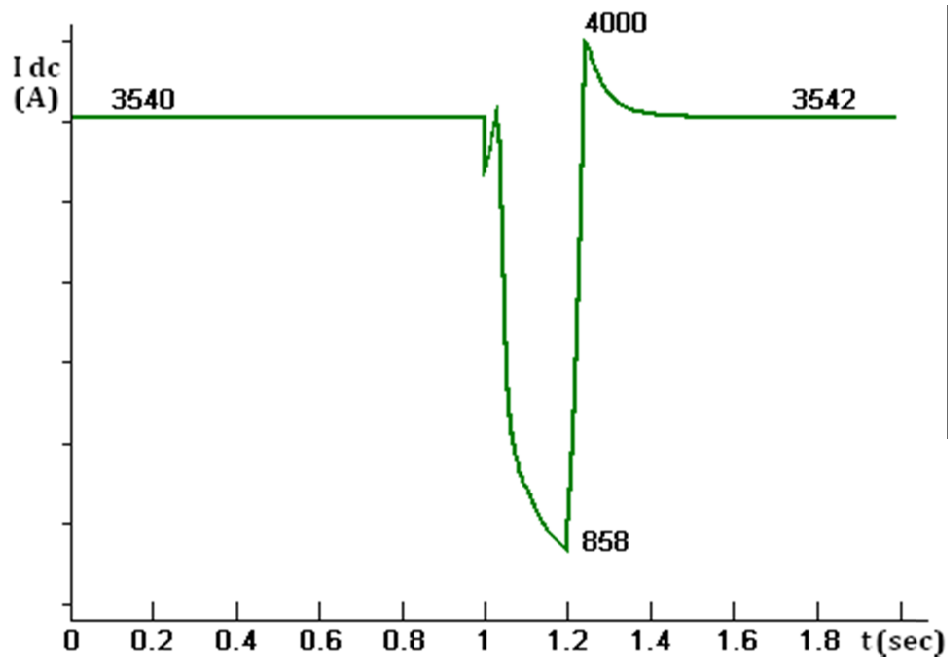
ნახ.51 საქართველოს ელექტროსისტემის სიხშირე

52-ე ნახაზზე ნაჩვენებია კონვერტორის ძაბვა მუდმივი დენის წრედში. ნორმალურ რეჟიმში იგი იყო 96.13 კვ და მოკლე შერთვის დროს ეცემა 69.38 კვ-მდე. ამ დროს კონვერტორი მუშაობას იწყებს მეორე თავში აღწერილი VDCOL მახასიათებელზე, რომელიც გრძნობს მუდმივი ძაბვის შემცირებას და ხელოვნურად ზღუდავს მუდმივ დენსაც (ნახ.53)



ნახ.52 კონვერტორის მუდმივი ძაბვა

მუდმივი დენი ნორმალურ რეჟიმში 3540 ა იყო და ავარიის მომენტიდან იგი მცირდება 858 ამპერამდე. მოკლე შერთვის მოხსნის შემდეგ ძაბვა კონვერტორის მუდმივი ძაბვის სალტეზე კვლავ უბრუნდება ნორმალური რეჟიმის შესაბამის მნიშვნელობას და რასაც შეიგრძნობს VDCOL -ი და კვლავ ზრდის დენს მახასიათებლის შესაბამისად.



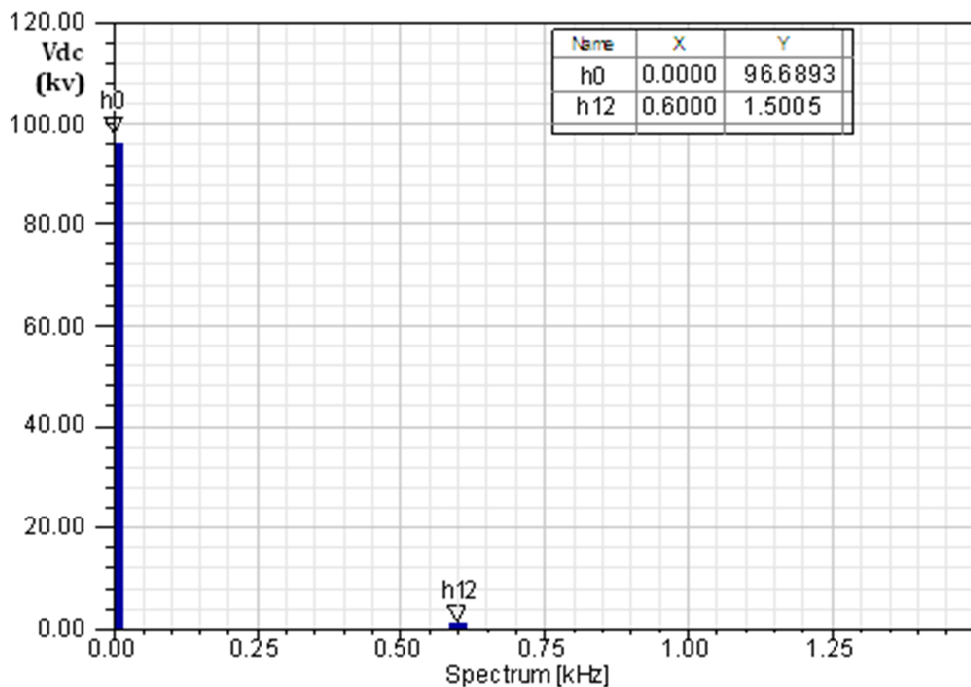
ნახ.53 კონვერტორის მუდმივი დენი

ახლა განვიხილოთ თუ რა ხდება ასეთი ავარიისას ჰარმონიკული თვალსაზრისით. ამისათვის მოვახდინეთ იდენტური რეჟიმის მოდელირება პროგრამა “ასნოფტ სიმპლორერშიც”, რადგან ჰარმონიკული ანალიზი PSS/E-ის ფუნქციებში არ შედის.

54-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ახალციხის კონვერტორის მუდმივი ძაბვის ჰარმონიკული სპექტრი ნორმალურ რეჟიმში მუშაობისას, რომელიც შეიცავს მუდმივ მდგენელს (h_0) და 600 ჰერციან ჰარმონიკას (h_{12}), რაც გამომდინარეობს კარგად ცნობილი ემპირიული ფორმულიდან:

$$F_k = kmf \quad (19)$$

სადაც f – კონვერტორის გამმართველის მკვებავი ქსელის სიხშირეა (საქართველოს ელექტროსისტემისთვის $f=50$ ჰც), m გამართული ძაბვის პულსაციის რიცხვია ცვლადი ძაბვის ერთ პერიოდში და ახალციხის კონვერტორისთვის $m = 12$, k კი ნატურალურ რიცხვთა სიმრავლეა.



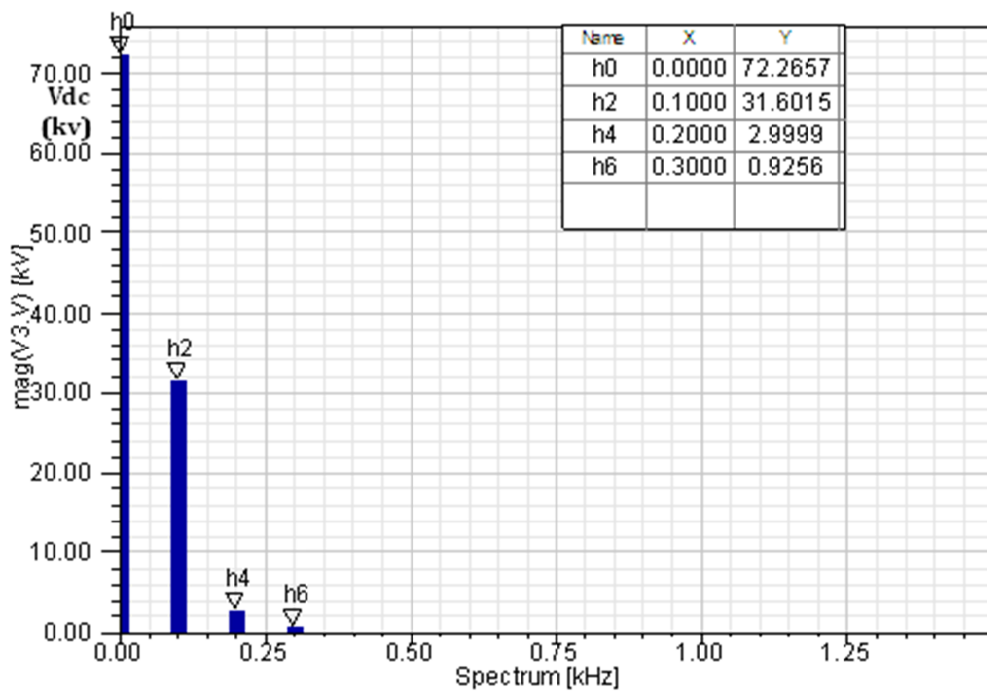
ნახ.54 ახალციხის კონვერტორის მუდმივი ძაბვის სპექტრი ნორმალურ რეჟიმში

მუდმივი ძაბვის სალტებზე დამონტაჟებული კონდენსატორების გამო h_{12} -ზე მაღალი რივის ჰარმონიკები პრაქტიკულად განულებულია.

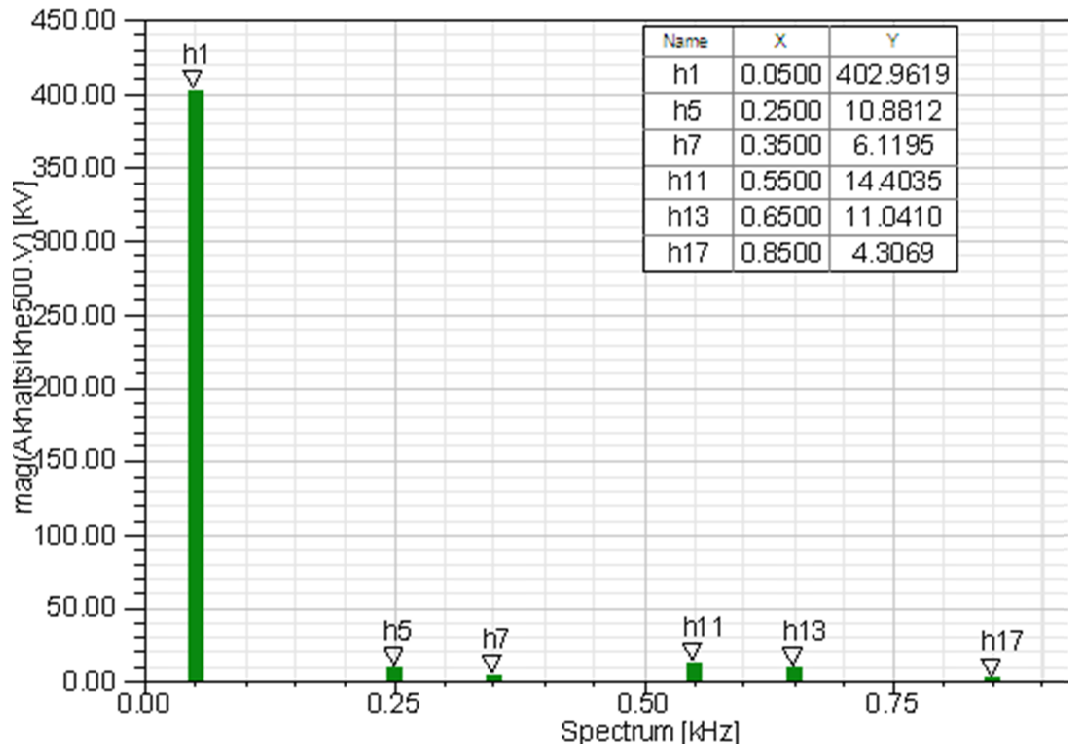
55-ე ნახაზზე ნაჩვენებია კონვერტორის მუდმივი ძაბვის სპექტრი ეგზ ‘ზესტაფონი – ახალციხეზე’ მოკლე შერთვის მომენტში. როგორც ნახაზიდან ჩანს ავარიის დროს მუდმივ ძაბვაში ჩნდება 100 ჰერციანი და მისი ჯერადი

ჰარმონიკები, რაც მოკლე შერთვისას მკვებავი სამფაზა სისტემის არასიმეტრიულობითაა გამოწვეული.

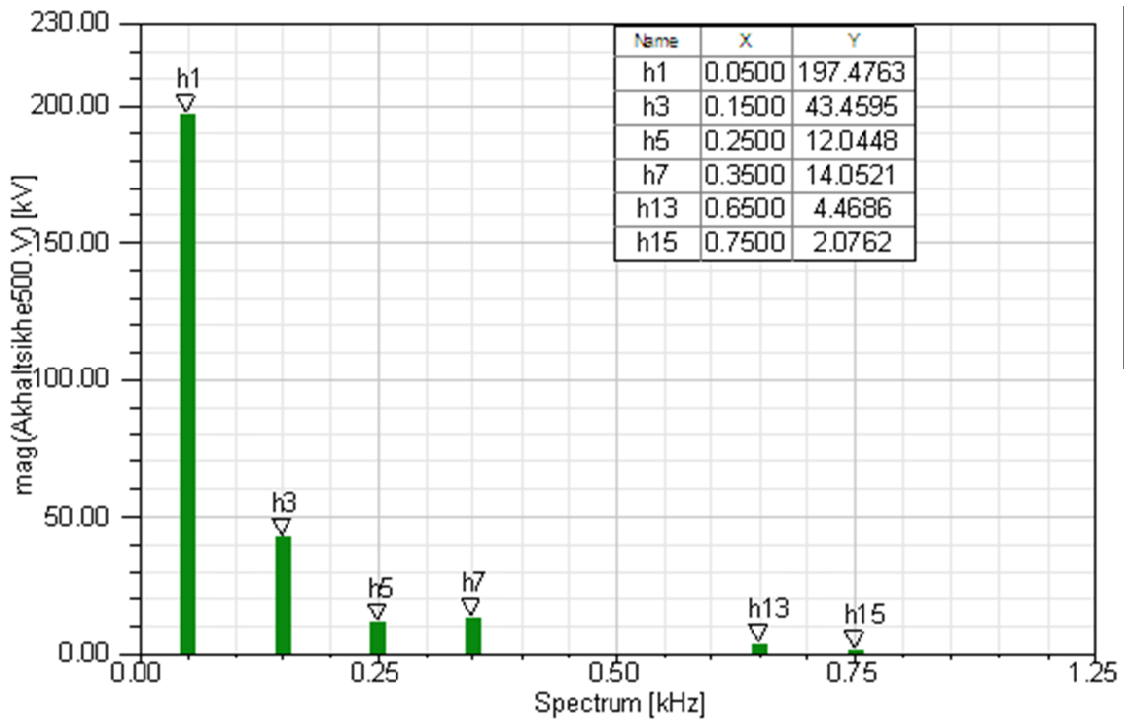
ცვლადი დაბვის ქსელშიც ადგილი აქვს არაკანონიკური ჰარმონიკების წარმოქმნას. შედარებისთვის 56-ე და 57-ე ნახაზებზე შესაბამისადაა მოცემული ახალციხის 500 კვ სალტის დაბვის მოკლე შერთვამდე და მოკლე შერთვისას. ამ ნახაზებიდან მკაფიოდ ჩანს, რომ ნორმალურ რეჟიმში კონვერტორი გენერირებს მხოლოდ კანონიკურ ჰარმონიკებს (მე-5, მე-7, მე-11, მე-13 და მე-17). მოკლე შერთვის მომენტში კი თავს იჩენს მე-3 რივის ჰარმონიკა (150 ჰერცი) და მისი ჯერადი მე-15 რივის ჰარმონიკაც.



ნახ.55 ახალციხის კონვერტორის მუდმივი დაბვის სპექტრი ავარიულ რეჟიმში



ნახ.56 ახალციხის 500 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი მოკლე პერთვამდე



ნახ.57 ახალციხის 500 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი მოკლე პერთვის მომენტში

მართალია მოკლე პერთვის ხანგრძლივობა იმდენად მცირეა, რომ ამ დროს გენერირებული არაკანონიკური ჰარმონიკები დიდ ზიანს ვერ მიაყენებენ სისტემას და მის ელემენტებს, მაგრამ არაკანონიკური

ჰარმონიკების შესაძლო წარმოქმნა მაინც გათვალისწინებული უნდა იქნეს, რადგან მათ წარმოქმნას რეალურად ადგილი აქვს არა მარტო მოკლე პერიოდისას, არამედ მკვებავი სამფაზა ძაბვების სისტემაში ნებისმიერი უბალანსობის დროსაც. აღნიშნულ გარემოებას განსაკუთრებით დიდი ყურადღება ექცევა, მაშინ როდესაც სიმძლავრის გამცემი სისტემის გენერაცია კონვერტორის დატვირთვას დიდად არ ჭარბობს. საქართველოს და თურქეთის ასინქრონული ურთიერთკავშირიც მსგავსი შემთხვევაა და ასეთ სიტუაციაში სასურველია გამცემი სისტემის სალტეზე მესამე რიგის ჰარმონიკული ფილტრის არსებობაც.

თავი V

ჰარმონიკების ფილტრაცია

5.1 ფილტრების შერჩევის ლოგიკა

ჰარმონიკული დამახინჯების მიხედვით ფილტრების შერჩევას საფუძვლად უდევს 58-ე ნახაზზე მოცემული სქემა:

სადაც ,

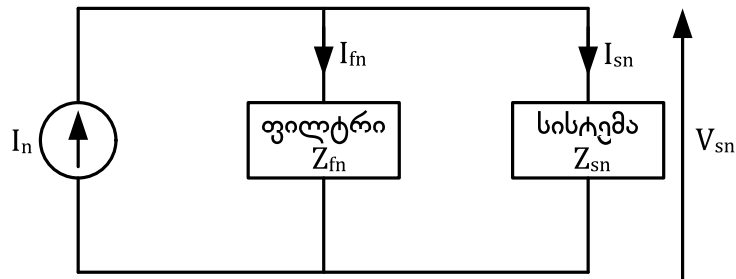
I_n - კონვერტორის მიერ გენერირებული ჰარმონიკული დენებია;

I_{fn} - ფილტრებში გამავალი ჰარმონიკული დენებია;

I_{sn} - მკვებავ სისტემაში შეჭრილი ჰარმონიკული დენებია;

Z_{fn} - ფილტრის ჰარმონიკული წინააღობა;

Z_{sn} - მკვებავი სისტემის ჰარმონიკული წინააღობა.



ნახ.58 სისტემის წინააღობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა

ძაბვის და დენის დამახინჯებებს თითოეული ჰარმონიკისთვის გამოვთვლით შემდეგი გამოსახულებიდან

$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n \quad (20)$$

$$V_{sn} = \frac{Z_{fn} \times Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n \quad (21)$$

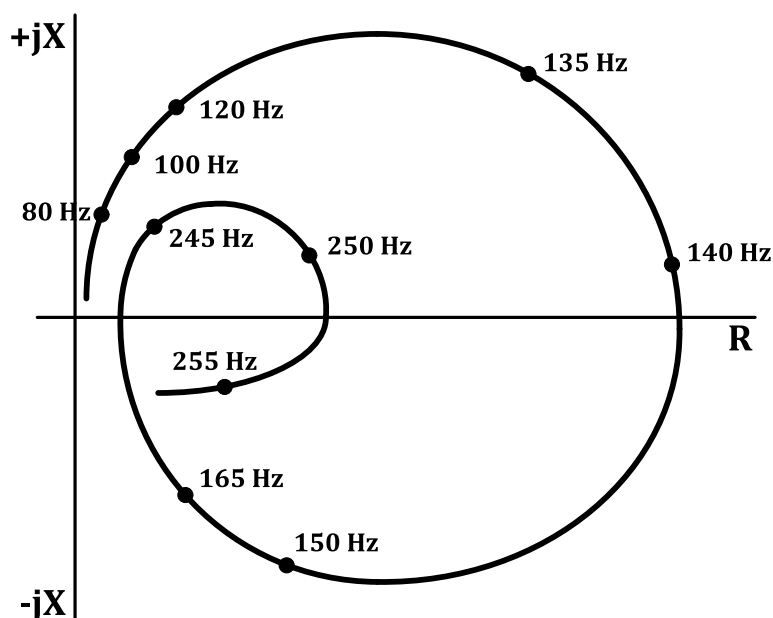
თუ ასეთ შემთხვევაში მიღებული დენის და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტები ზღვარს გარეთ იქნებიან , მაშინ აუცილებელია ფილტრების დამატება ან ხელახალი შერჩევა.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ საქართველოს ელექტროსისტემის მაღალი ძაბვის ქსელში ძაბვის დამახინჯების დონე დასაშვებია, თუ ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი არ აღემატება 2.5-3%-ს.

მაღალი რივის ჰარმონიკების ჩახშობის თვალსაზრისით არსებობს ფილტრების შერჩევის სხვადასხვა მეთოდი.

5.2 წინალობების წრის მეთოდი

კონვერტორის მკვებავ ელექტროსისტემას კონკრეტული რივის ჰარმონიკისთვის გააჩნია ან ინდუქტიური ან ტევადური ხასიათის წინალობა. თუ რომელიმე ჰარმონიკისთვის ინდუქტიური და ტევადური წინალობები ტოლი აღმოჩნდება წარმოიქმნება რეზონანსი და სისტემის წინალობა ამ რივისთვის იქნება მხოლოდ აქტიური წინალობის ტოლი. 59-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ტიპური სისტემის წინალობების მრუდი 50–255 კვ დიაპაზონში.

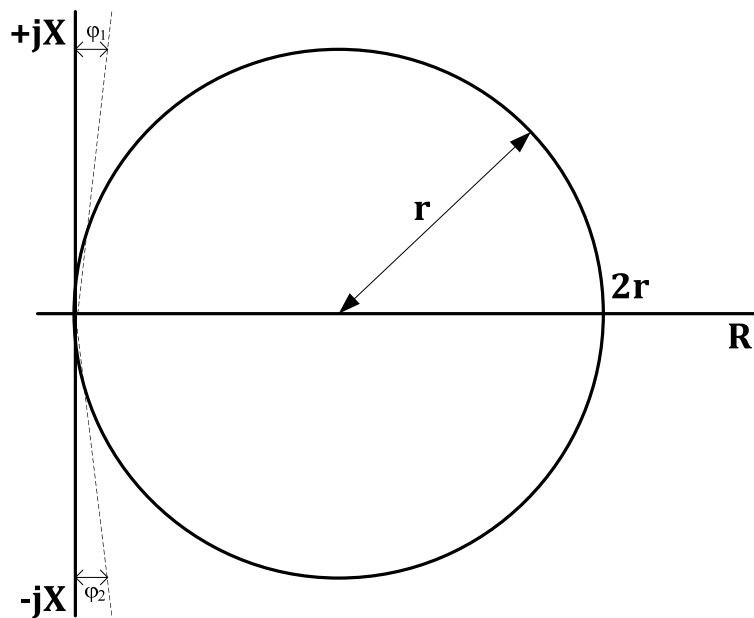


ნახ.59 მკვებავი სისტემის წინალობები სიხშირის მიხედვით

როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს სისტემას აქვს ინდუქტიური წინალობა დაახლოებით 140 ჰერცამდე. შემდეგ თითქმის 200 ჰერცამდე სისტემას აქვს ტევადური წინალობა და ა.შ. ამასთან, 140, 245 და 250 ჰერცის

მახლობლობაში ადგილი აქვს რეზონანსს. ზოგადად, სისტემის წინალობა შეიძლება ძალიან მკვეთრად იცვლებოდეს სიხშირის თუნდაც მცირე ცვლილებებისას.

ზემოთ ნაჩვენები სისტემის წინალობების განმსაზღვრელი მრუდი სამართლიანია სისტემის მხოლოდ ერთი კონფიგურაციისთვის, რადგან ელექტროსისტემას, ქსელის მოცემული კონფიგურაციისა და სისტემის მოცემული შემადგენლობის დროს, თითოეული ჰარმონიკისთვის აქვს დისკრეტული ერთი მნიშვნელობის წინალობა. კონფიგურაციის შეცვლილსას (მაგალითად რომელიმე ხაზის გამორთვა, სხვა გენერაციების ჩართვა, დატვირთვის შეცვლა და ა.შ.) აღნიშნული მრუდის სახე იცვლება და, შესაბამისად, მისი გამოყენება მოუხერხებელი ხდება. ამიტომ, ზემოთ აღნიშნული მრუდის ნაცვლად განიხილება წრე, რომელიც თავის თვართში მოიცავს ყველა შესაძლო წერტილებს სისტემის ნებისმიერი (არსებული და პერსპექტიული) კონფიგურაციისთვის (ნახ.60).



ნახ.60 სისტემის წინალობათა წრე

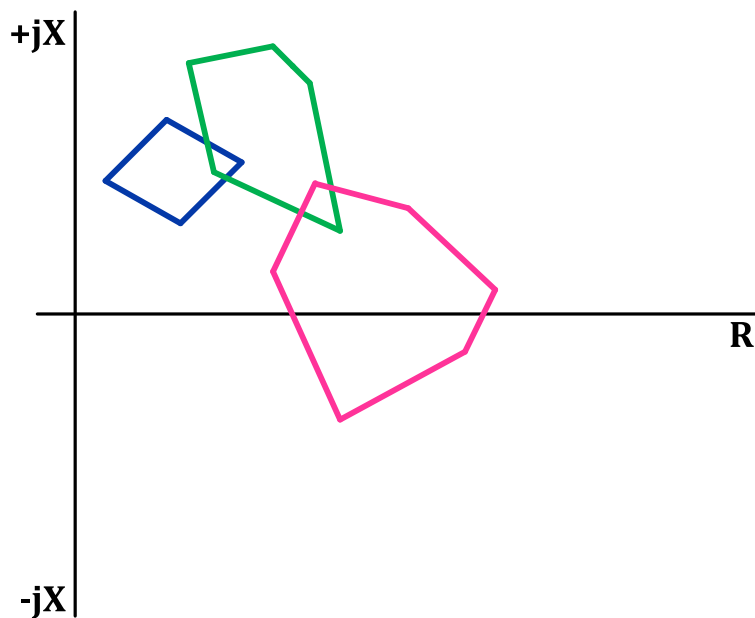
ფილტრების შერჩევისას სისტემის წინალობას ვიღებთ ნებისმიერ სიდიდეს წრიდან, რომელიც იწვევს მაქსიმალურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას. კომპიუტერის დახმარებით მოიძებნება წინალობების არეა ყოველი ჰარმონიკისთვის. რეალურ სისტემასთან მეტი მიახლოების მიზნით

ძებნის არეალს ვზღუდავთ წინასწარ შემოღებული φ_1, φ_2 (ტიპურად $5^\circ-15^\circ$) ლიმიტის კუთხეებითა და R-ის სიდიდით.

მაღალი რივის ჰარმონიკების ჩახშობის თვალსაზრისით ფილტრების შერჩევის ეს მეთოდი უსაფრთხოა, რამდენადაც ითვალისწინებს სისტემის მომავალ გაფართოებასაც, თუმცა ასე შერჩეული ფილტრები ძვირია, რადგანაც შერჩეულია დიდი მარაგით.

5.3 პოლიგონის მეთოდი

კონკრეტული რივის ჰარმონიკისთვის სისტემის წინაღობა, სისტემის სხვადასხვა შემადგენლობისა (გენერაცია-დატვირთვა) და ქსელის ყველა შესაძლო კონფიგურაციისათვის, სხვადასხვაა. ამ წინააღობათა სიმრავლე R, X სიბრტყეზე შეიძლება წარმოვადგინოთ მრავალკუთხედის სახით, რომელსაც წინააღობათა პოლიგონს უწოდებენ (ნახ.61).



ნახ.61 წინააღობების 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).

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

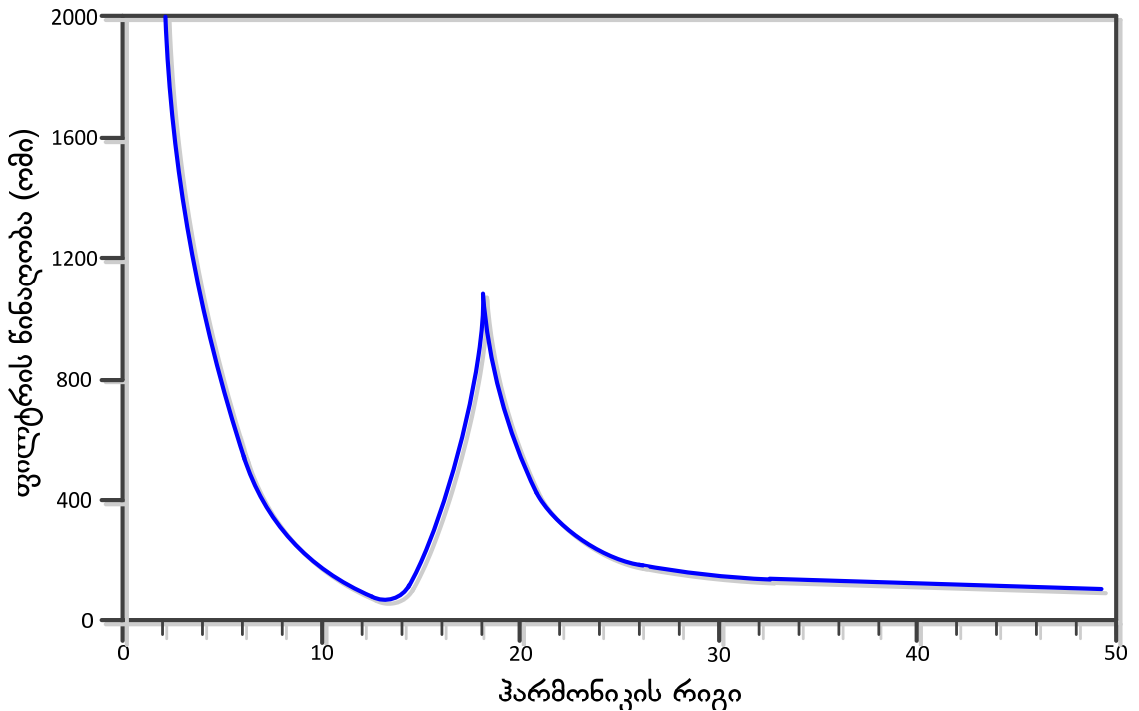
5.4 ახალციხის კონვერტორის ცვლადი ძაბვის ფილტრები

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე (თავი III, IV) მიღებული ჰარმონიკული დამახინჯებების კოეფიციენტთა მნიშვნელობების გათვალისწინებით, პოლიგონის მეთოდისა და კომპიუტერული მაქსიმიზაციის გამოყენებით, ახალციხის კონვერტორული ქვესადურისთვის შევირჩიეთ ცვლადი ძაბვის TT 3/12/24, DT 12/36 და C ფილტრების რამდენიმე ბლოკი. TT 3/12/24 და DT 12/36 ფილტრების სიხშირული მახასიათებლები (ნახ.62, 63) აღწერილია 5.4.1 და 5.4.2 ქვეპარაგრაფებში.

5.4.1 TT 3/12/24 ფილტრი

64-ე ნახაზზე ნაჩვენებია A1 ბლოკი წარმოადგენს TT 3/12/24 (Triple Tuned –სამრეზონანსიანი, გათვლილი სამ სიხშირეზე) ტიპის ფილტრს, რომელიც 50 ჰერც სიხშირეზე გენერირებს 80 მგვარ რეაქტიულ სიმძლავრეს. მისი წინააღმდეგობის სიხშირული მახასიათებლიდან (ნახ.62) კარგად ჩანს, რომ ყველაზე დაბალი წინააღმდეგობა მას აქვს მე-12 რიგის ჰარმონიკის მახლობლობაში (იგი გათვლილია, ძირითადად, მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკების ჩახშობაზე და, შესაბამისად, რეზონანსული კონტურის გაანგარიშება ხდება მე-12 რიგის ჰარმონიკის სიხშირეზე). მე-19 რიგის ჰარმონიკამდე ფილტრის წინააღმდეგობა იზრდება, შემდეგ მცირდება და 24-ე ჰარმონიკისა უფრო მაღალსიხშირულ დიაპაზონში აქვს მცირე წინააღმდეგობა.

A2 ბლოკი წარმოადგენს A1-ის აბსოლუტურად იდენტურ მოდულს და როგორც მოდელირების რეზულტატმა გვიჩვენა მისი ჩართვა საჭირო ხდება ჩანართის 50%-ზე მეტად დატვირთვისას.

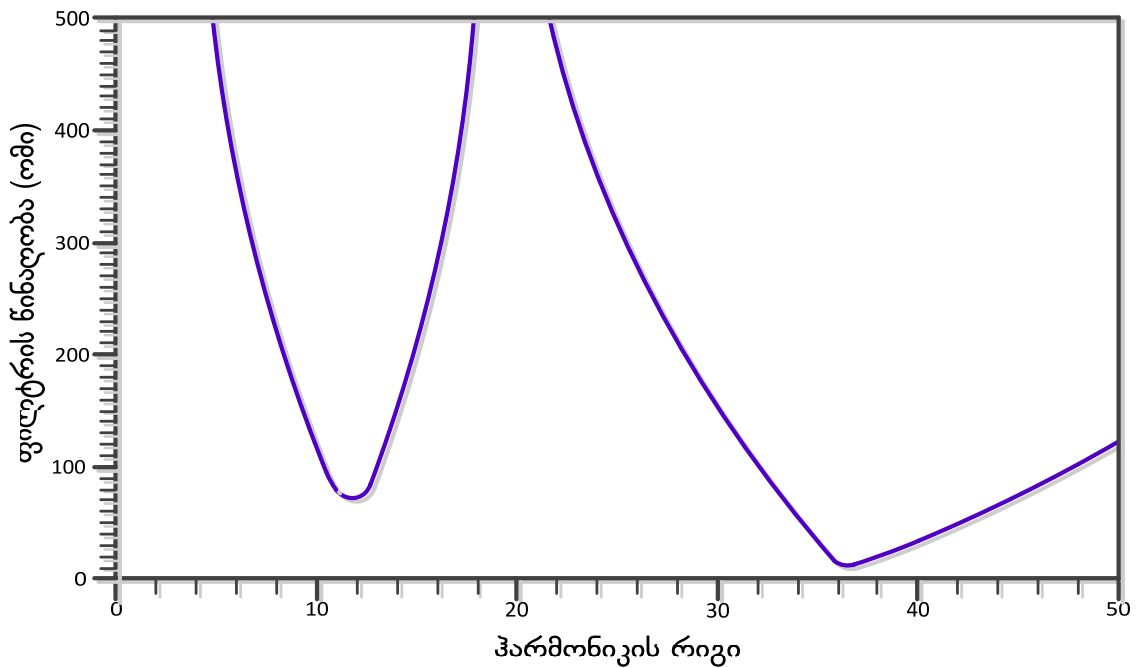


ნახ.62 TT 3/12/24 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი

5.4.2 DT 12/36 ფილტრი

64-ე ნახაზზე ნაჩვენებია B1 ბლოკი წარმოადგენს DT 12/36 (Double Tuned –ორრეზონანსიანი, გათვლილია ორ სიხშირულ ზოლზე) ტიპის ფილტრის მოდულს, რომლის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე 50 ჰერზე შეადგენს 80 მგვარ-ს. მისი წინაღობის სიხშირული მახასიათებელიდან (ნახ.63) კარგად ჩანს, რომ პირველი რეზონანსული კონტურის წარმოქმნა ხდება მე-12 რიგის ჰარმონიკაზე და იგი თითქმის თანაბრად ახშობს მის მეზობელ მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკებსაც. მე-13-დან 30-ე რიგის ჰარმონიკის სიხშირეების ჩათვლით DT 12/36 ფილტრს აქვს მაღალი წინაღობა და ამ დიაპაზონში იგი ფაქტიურად არ მონაწილეობს ჰარმონიკების ფილტრაციაზე.

მეორე რეზონანსული კონტური წარმოიქმნება 36-ე რიგის ჰარმონიკის სიხშირეზე. ლოგიკა აქაც იგივეა: რეზონანსულ სიხშირედ ვიღებთ რეალურად ჩასახშობი 35-ე და 37-ე ჰარმონიკების შუაში მყოფ 36-ე ჰარმონიკის სიხშირეს.

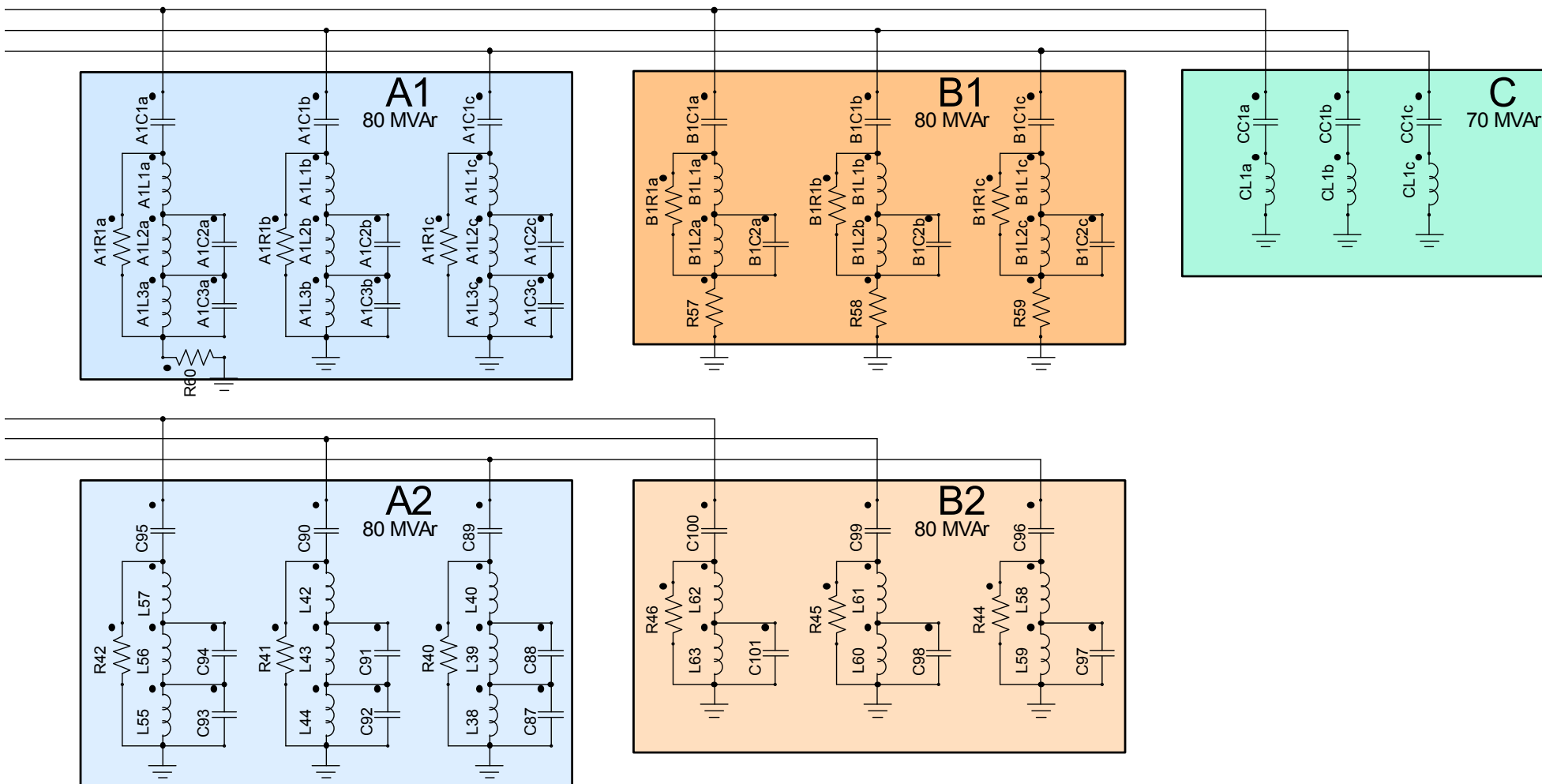


ნახ.63 DT 12/36 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი

ეს მიდგომა სავსებით გამართლებულია რადგან პასიურ ფილტრებს გააჩნიათ ჩასახშობი სიხშირული ზოლის იმდენად დიდი სიგანე, რომ კონკრეტული სიხშირის არჩევისას ხდება მეზობელი სიხშირეების ჩახშობაც. B2 ბლოკი წარმოადგენს B1-ის ანალოგიას და მის ჩართვას განსაზღვრავს მუდმივი დენის ჩანართის რეჟიმი. როგორც მოდელირებამ აჩვენა კონვერტორის 50-60% და უფრო მეტად დატვირთვისას აღნიშნული ბლოკის ჩართვა აუცილებელია როგორც ჰარმონიკული დამახინჯების, ასევე ჩანართის რეაქტიული ენერჯის უზრუნველყოფის კუთხით.

5.4.3 C ბლოკი

C ბლოკის მთავარი დანიშნულება მუდმივი დენის ჩანართის რეაქტიული ენერჯით კვებაში მონაწილეობის მიღებაა. ისევე როგორც დანარჩენი ბლოკების შემთხვევაში, მისი ჩართვაც რეჟიმით განისაზღვრება. როგორც წესი იგი საჭიროა დიდი დატვირთვებისას, როდესაც დაბვა კონვერტორის ცვლადი ძაბვის სალტებზე დაბალია. იგი მონაწილეობს მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრაციაშიც, მაგრამ არ არის გათვლილი რომელიმე კონკრეტულ სიხშირულ ზოლზე, უბრალოდ წარმოადგენს მაღალი სიხშირეებისთვის დაბალი წინაღობის არხს.

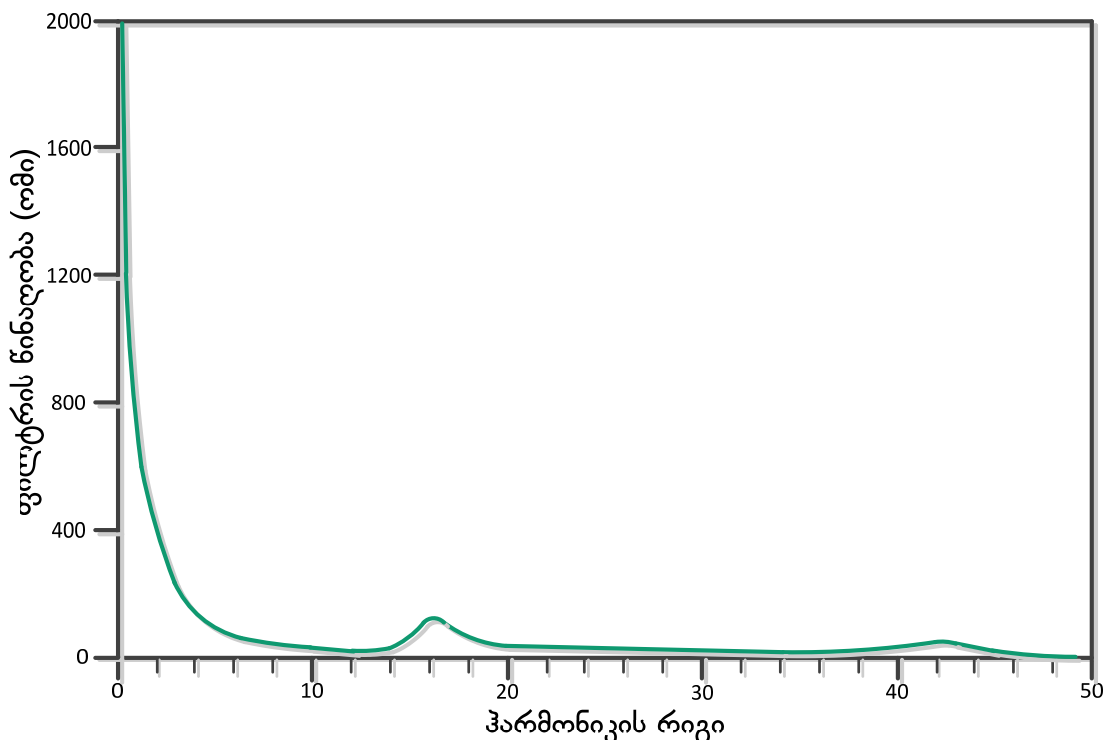


ნახ.64 ცვლადი ძაბვის ჰარმონიკული ფილტრები “ახალციხე 500”-ის სალტეზე (მოდელი ანსოფტ სიმულორერისთვის)

5.4.4 ფილტრის ბლოკების ჯამური სიხშირული მახასიათებელი

ზემოთ განხილული ფილტრის ბლოკების ერთდროული მუშაობისას ჯამური სიხშირული მახასიათებელი იღებს 65-ე ნახაზზე ნაჩვენებ სახეს. მახასიათებელიდან კარგად ჩანს, რომ გარდა რამდენიმე რიგის ჰარმონიკისა თითქმის მთელ სპექტრში ფილტრების ჯამური წინაღობა საკმაოდ დაბალია. აღნიშნული მრუდის ამოზნექილი მონაკვეთები შეესაბამება იმ რიგის ჰარმონიკებს, რომელთა წარმოქმნაც 12 პულსიანი კონვერტორის მუშაობისას თითქმის არ ხდება. აქედან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ შერჩეული ბლოკების სხვადასხვა კომბინაციით შესაძლებელია ჩანართის ყველა კონკრეტულ რეჟიმში დამახიჯების კოეფიციენტების დასაშვებ ნორმებში მოქცევა, მაგრამ აღნიშნულის შემოწმება აუცილებელია სიმპლორერის მოდელის ფილტრებთან ერთად განმეორებითი გაშვებით და გაანგარიშებით.

ნახ.64-ზე მოცემული ფილტრების ბლოკები წარმოადგენენ სიმპლორერში აგებულ მოდელს და შემდეგ თავებში ჩატარებულ გაანგარიშებებში ფილტრაცია ხდება მხოლოდ მათი გამოყენებით.



ნახ.65 2A+2B+C ფილტრების ჯამური სიხშირული მახასიათებელი

5.5 ნორმალურ რეჟიმში ქსელის დაბვების ჰარმონიკული სპექტრი ფილტრების გათვალისწინებით

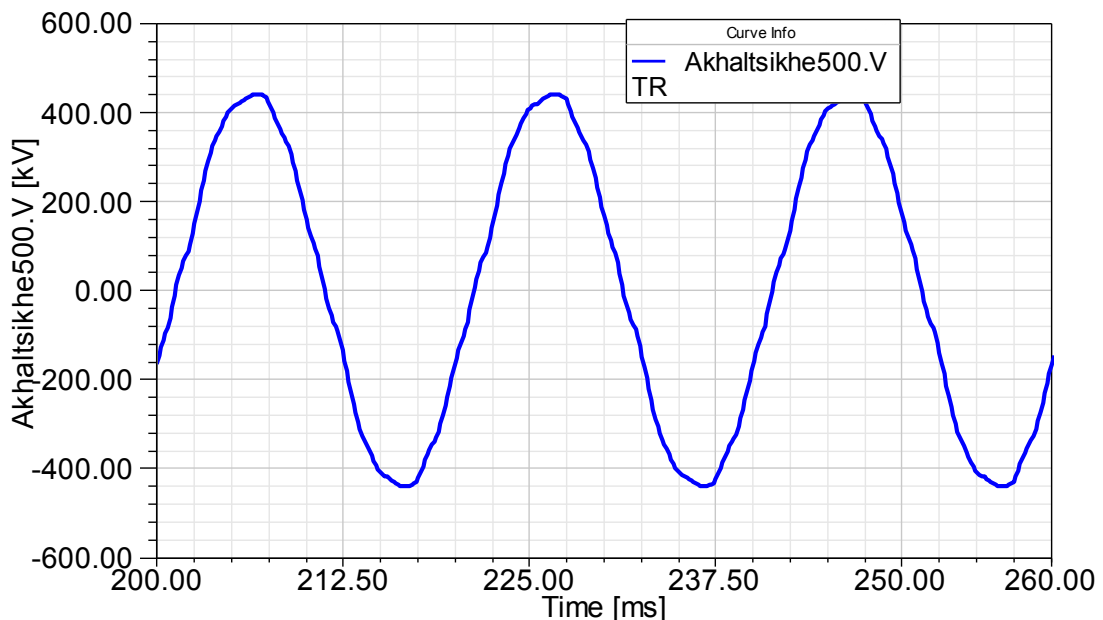
ფილტრების მოდელირების შემდეგ კვლავ ვახდენთ ქსელის დაბვების ჰარმონიკული შემადგენლობის შესწავლასა და ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების გამოთვლას.

ახალციხის ქვესაგურის 500 კვ სალტის დაბვა ფილტრების გათვალისწინებით იღებს 66-ე ნახაზზე ნაჩვენებ სახეს. მისი ჰარმონიკული სპექტრი 67-ე ნახაზზეა ნაჩვენები.

დაბვის ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ტოლია:

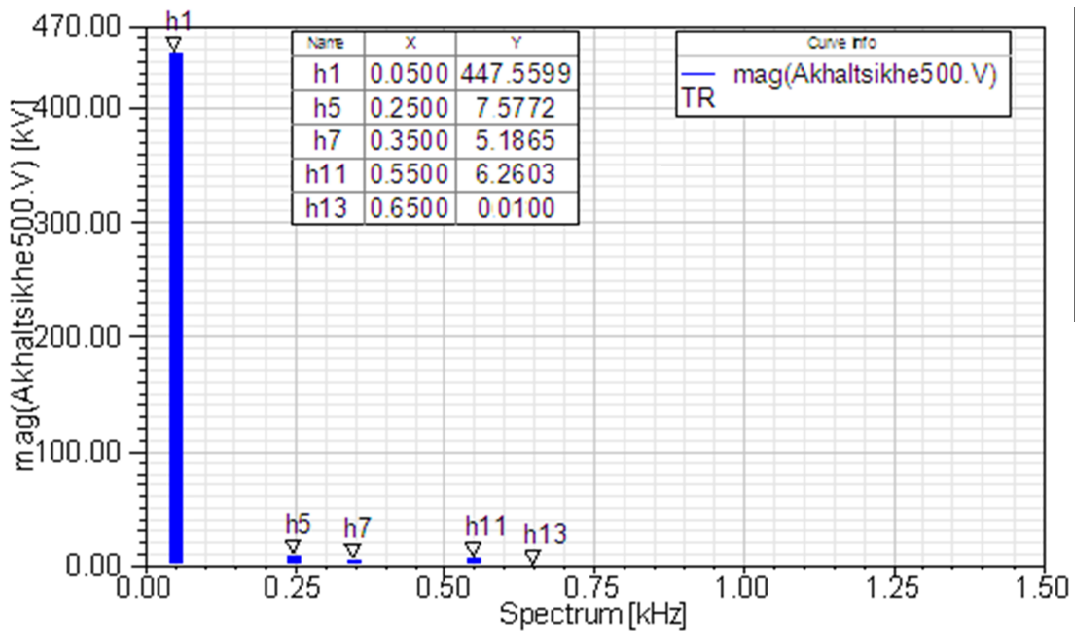
$$THD \% (V. Akhal) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{7.57^2 + 5.19^2 + 6.26^2 + 0.01^2}}{448} \times 100 = \frac{11.11}{448} \times 100 = 2.47\%$$



ნახ.66 დაბვა ქ/ს "ახალციხე 500"-ის 500 კვ – ის სალტზე

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ საქართველოს ელექტროსისტემის მაღალი დაბვის ქსელში მაქსიმალურად დასაშვები ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების კოეფიციენტის სიდიდე 2.5 - 3 % - ით განისაზღვრება. მაშასადამე, ჩვენს მიერ მიღებული სიდიდე, რომელიც ნაანგარიშებია მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში, დასაშვებია.



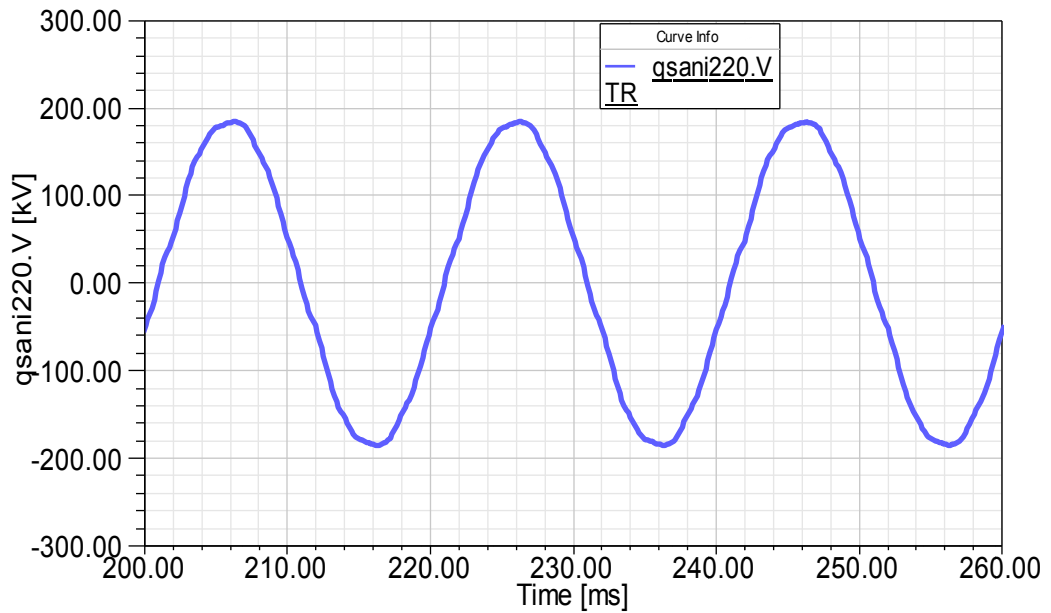
ნახ.67 ქ/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ – ის სალტის ძაბვის სპექტრი

500 კვ ძაბვის წრედში ნორმალურ რეჟიმში მაქსიმალური დამახინჯების კოეფიციენტი გვაქვს ახალციხეში (2,47%). მისგან ელექტრულად დაშორებულ ყველა კვანძში, როგორც გასმოთვლებმა გვიჩვენა, დამახინჯების კოეფიციენტები კიდევ უფრო ნაკლები სიდიდისაა. ეს იმას მიუთითებს, რომ 500 კვ ძაბვის ქსელში მაღალი რიგის ჰარმონიკებისათვის შესამჩნევი რეზონანსული კონტურები, პრაქტიკულად, არ წარმოქმნილა.

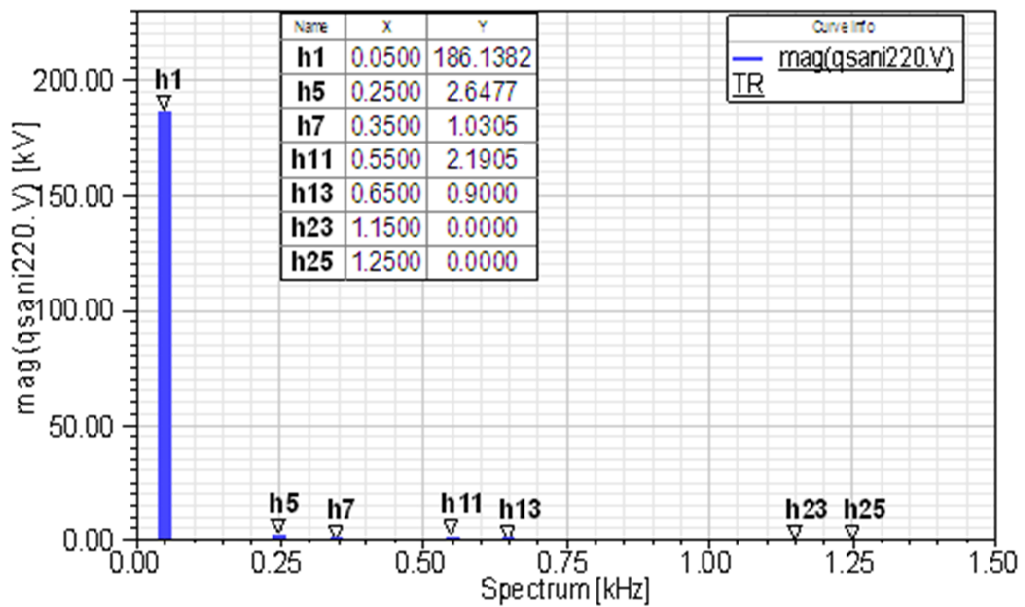
220 კვ ძაბვის ქსელის ჰარმონიკული ანალიზის გასაკეთებლად, როგორც მაგალითი, განვიხილეთ ქვესადგურ ქსანის 220 კვ სალტის ძაბვა (ნახ.68). მისი ჰარმონიკული სპექტრი ნაჩვენებია 69-ე ნახაზზე. ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი შეადგენს:

$$\begin{aligned}
 THD \% (V. Qsani) &= \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 = \\
 &= \frac{\sqrt{2.65^2 + 1.03^2 + 2.19^2 + 0.9^2}}{186.14} \times 100 = \frac{3.698}{186.14} \times 100 = 1.98\%
 \end{aligned}$$

220 კვ-ის წრედისთვის ძაბვის დამახინჯების ეს დონე დასაშვებია.

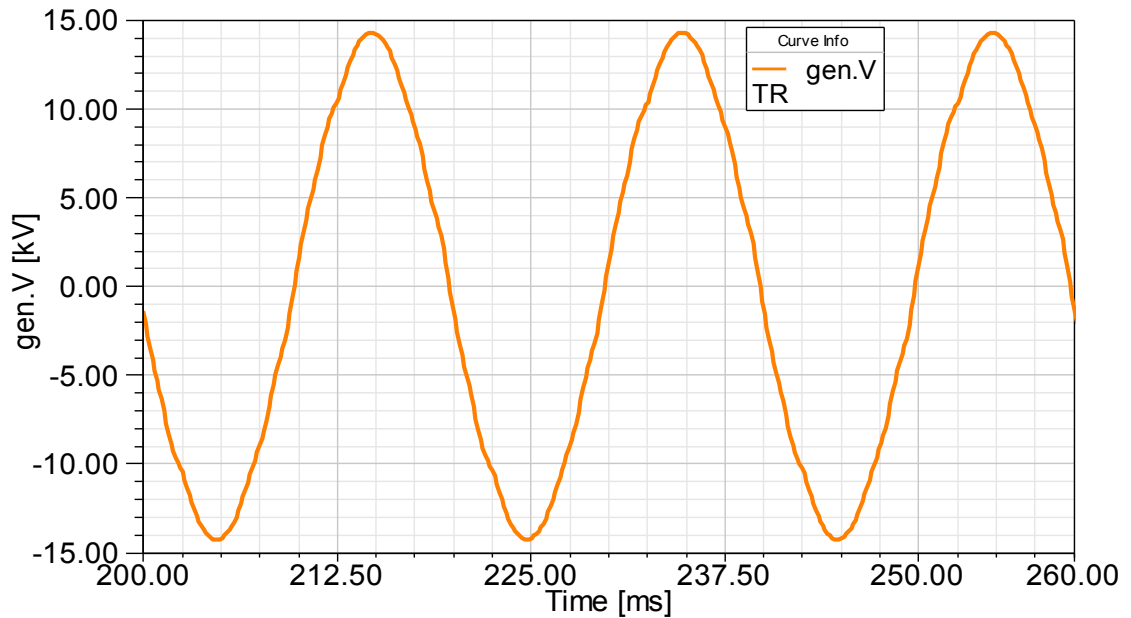


ნახ.68 დაბვა ე/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ სალტებზე

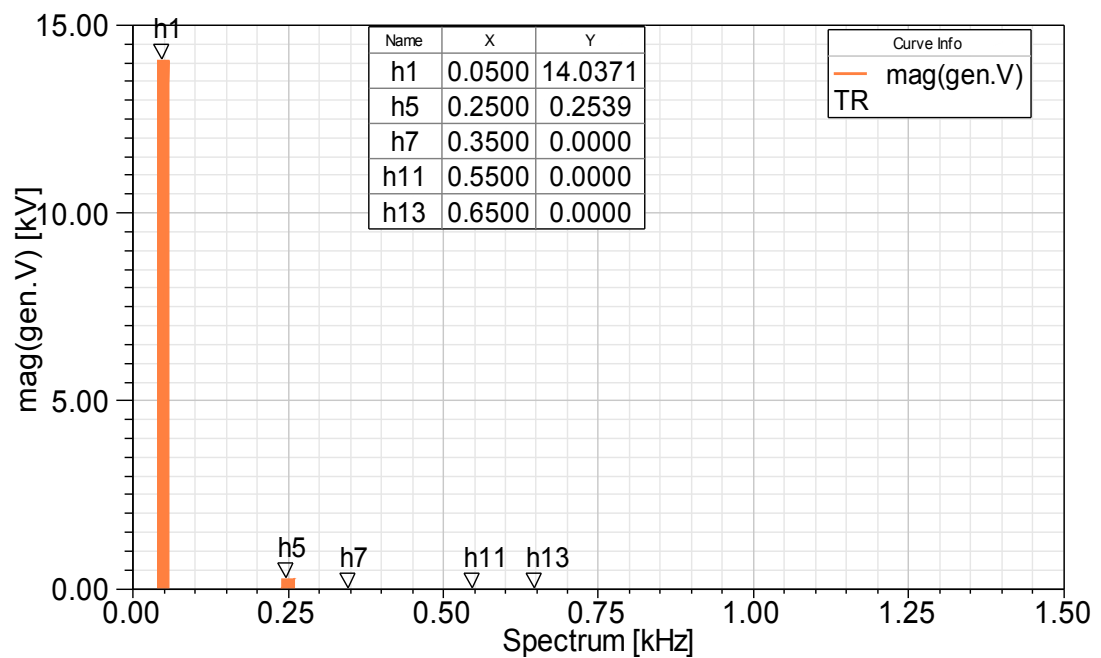


ნახ.69 ე/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ სალტის დაბვის სპექტრი

საინტერესოა აგრეთვე რა სიტუაციაა საგენერატორო სალტეებზე. მაგალითისთვის განვიხილეთ ენგურის გენერატორის დაბვა. დაბვის მრუდი წარმოდგენილია 70-ე ნახაზზე, ხოლო მისი ჰარმონიკული სპექტრი 71-ე ნახაზზე.



ნახ.70 ძაბვა ენგურჭესის საგენერატორო სალტებზე



ნახ.71 ენგურჭესის საგენერატორო სალტის ძაბვის ჰარმონიკული სპექტრი

როგორც ამ ნახაზებიდან ჩანს ჰარმონიკული სპექტრი პრაქტიკულად განულებულია, დამახინჯება გამონვეულია მხოლოდ მე-5 რიგის ჰარმონიკით. ამ კონკრეტულ შემთხვევაში ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი პრაქტიკულად წარმოადგენს ინდივიდუალური დამახინჯების კოეფიციენტს რომელიც გამონვეულია სწორედ მე-5 ჰარმონიკით:

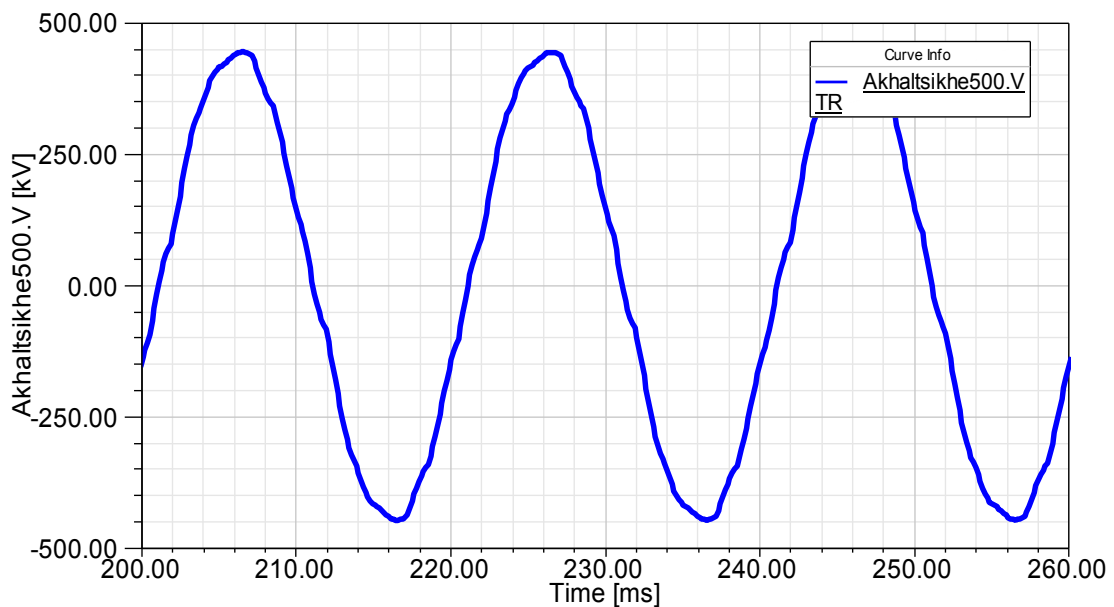
$$THD \% (V. enguri) = IHD \% (V. enguri, h5) = \frac{0.254}{14.037} = 1.81\%$$

ანუ ნორმალურ რეჟიმში, ჩანართის სრული დატვირთვისას ენგურის საგენარატორო სალტეზე დაბვის დამახინჯება ნორმას არ აღემატება.

5.6 ქსელის დაბვის ჰარმონიკული სპექტრი ფილტრების გათვალისწინებით n-1 რეჟიმში

ოდნავ გართულებულია სიტუაცია ენერგოსისტემის n-1 რეჟიმში. როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ ასეთ დროს მუდმივი დენის ჩანართის მკვებავი გადაცემის ხაზების ეკვივალენტური წინაღობა იზრდება (რადგან ამ კონკრეტულ შემთხვევაში n-1 რეჟიმში ვახდენთ ჩანართის მკვებავი ერთ-ერთი გადაცემის ხაზის “ზესტაფონი-ახალციხის” გამორთვას) და აქედან გამომდინარე ჰარმონიკული დაბვის ვარდნებიც გაიზრდება.

ფილტრების გათვალისწინებით n-1 რეჟიმში ახალციხის 500 კვ სალტეზე დაბვის მრუდი და სპექტრი მოცემულია 72-ე და ნახ.73-ე ნახაზებზე



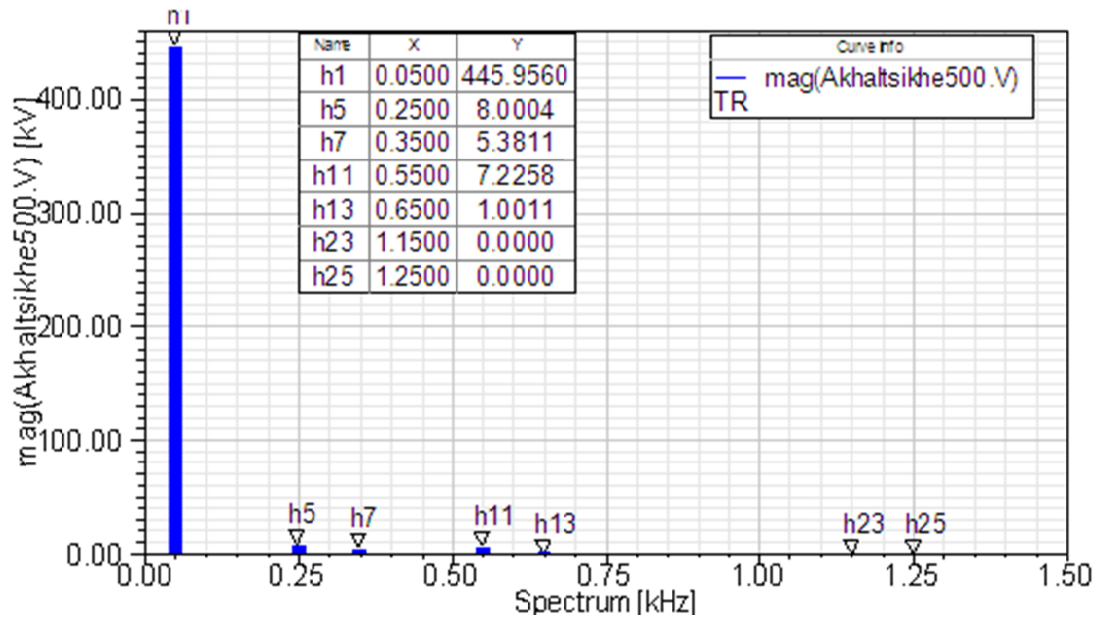
ნახ.72 დაბვა ქ/ს “ახალციხე 500“-ის 500 კვ – ის სალტეზე (n-1, ფილტრებით)

ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ახალციხის 500 კვ სალტისთვის იქნება:

$$THD \% (V. Akhal) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

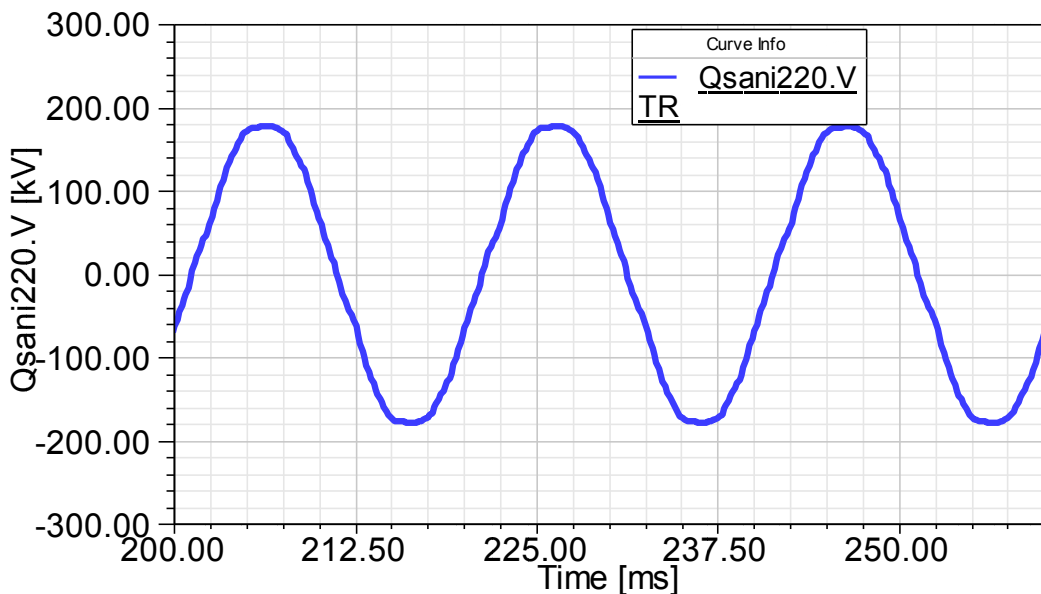
$$= \frac{\sqrt{8.0^2 + 5.38^2 + 7.23^2 + 1.0^2}}{445.96} \times 100 = \frac{12.09}{445.96} \times 100 = 2.72\%$$

ე.ი ნორმალურ რეჟიმთან შედარებით დამახინჯების კოეფიციენტი გაიზარდა დაახლოებით 0.25%-ით.



ნახ.73 ე/ს “ახალციხე 500”-ის 500 კვ-ის სალტის დაბვის სპექტრი(n-1, ფილტრებით)

ქსანის 220 კვ სალტის დაბვა 74-ე, ხოლო ჰარმონიკული სპექტრი კი 75-ე ნახაზებზეა ნაჩვენები. დამახინჯება აქაც უმნიშვნელოდაა გაზრდილი.

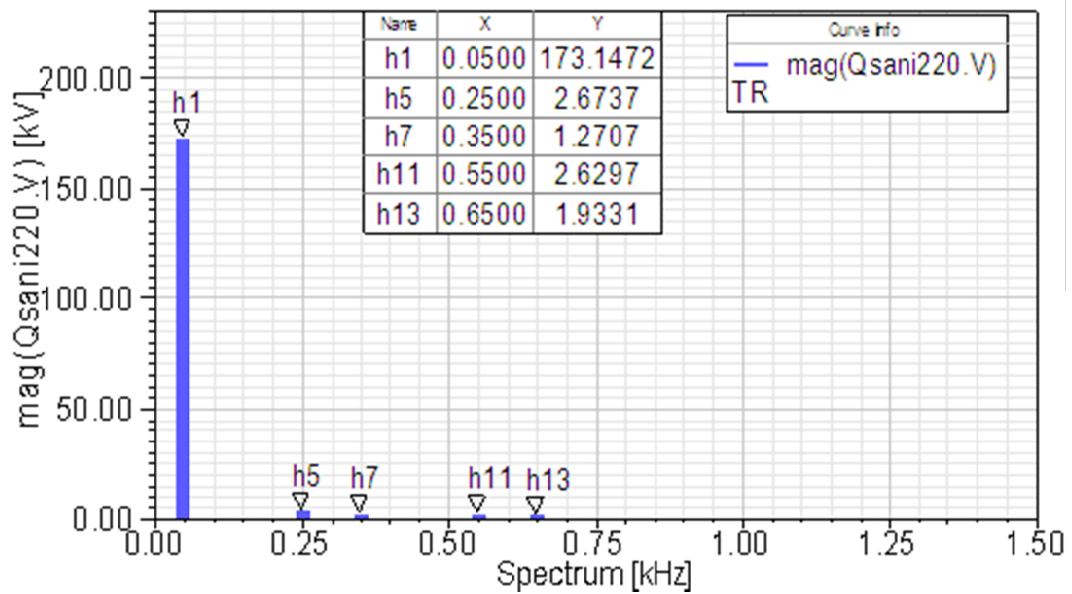


ნახ.74 დაბვა ე/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ სალტებზე

დამახინჯების კოეფიციენტი ქსანის 220 კვ სალტისთვის ტოლია:

$$THD \% (V. Qsani) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2 + h_{13}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{2.67^2 + 1.27^2 + 2.63^2 + 1.93^2}}{173.15} \times 100 = \frac{4.41}{173.15} \times 100 = 2.54\%$$



ნახ.75 ქ/ს “ქსანი 500”-ის 220 კვ სალტის ძაბვის სპექტრი (n-1, ფილტრებით)

ნორმალურ რეჟიმთან შედარებით ქსანის 220 კვ სალტეზე დამახინჯება გაზრდილია 0.56 %-ით, მაშინ როდესაც ეს ნაზრდი ახალციხის 500 კვ სალტისთვის 0.25 %-ს შეადგენს. აღნიშნული შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ნორმალურ რეჟიმში სიმძლავრის ნაკადის მიმართულება მკვეთრად განსხვავდება n-1 რეჟიმში სიმძლავრის ნაკადის მიმართულებისაგან. ნორმალურ რეჟიმში ეგზ-ები “ქსანი – მარნეული” და “მარნეული – ახალციხე” შედარებით განტვირთულია, ხოლო n-1 რეჟიმში ჩანართის დატვირთვის დიდი წილი ამ ხაზებზე მოდის, რაც შესაბამისად ზრდის ჰარმონიკული ძაბვების ვარდნას ქსანის ქვესადგურში და ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების გაზრდასაც იწვევს.

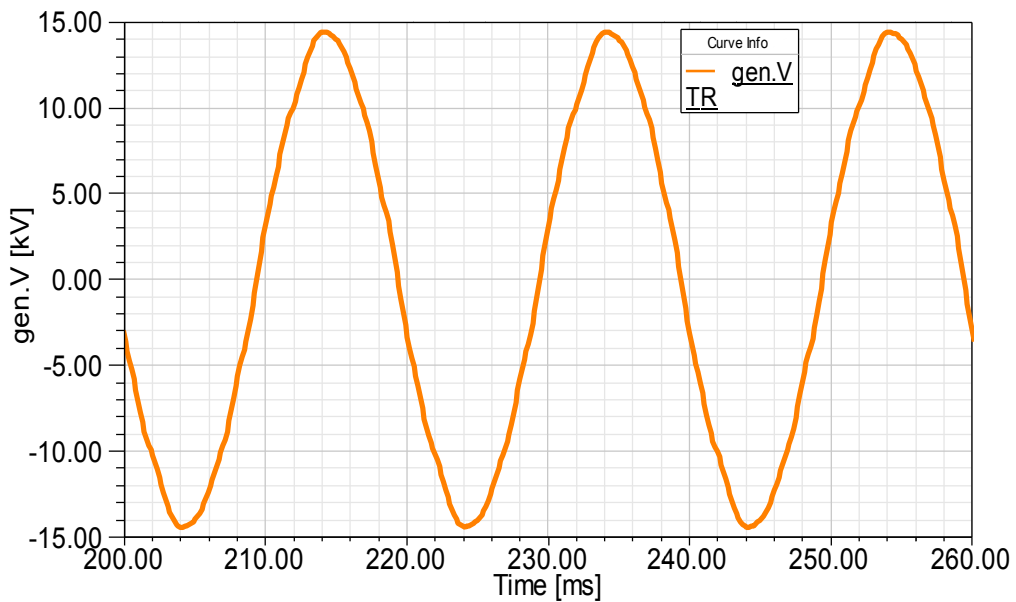
ენგურის გენერატორის ძაბვის მრუდი 76-ე ხოლო მისი ჰარმონიკული შემადგენლობა კი 77-ე ნახაზებზეა მოცემული. როგორც სპექტრიდან ჩანს n-1 რეჟიმში ენგურის საგენერატორო ძაბვაზე კვლავ

გაჩნდა მცირე ამპლიტუდის მე-7 და მე-11 რიგის ჰარმონიკები, რაც აიხსნება რეჟიმის დამძიმებით.

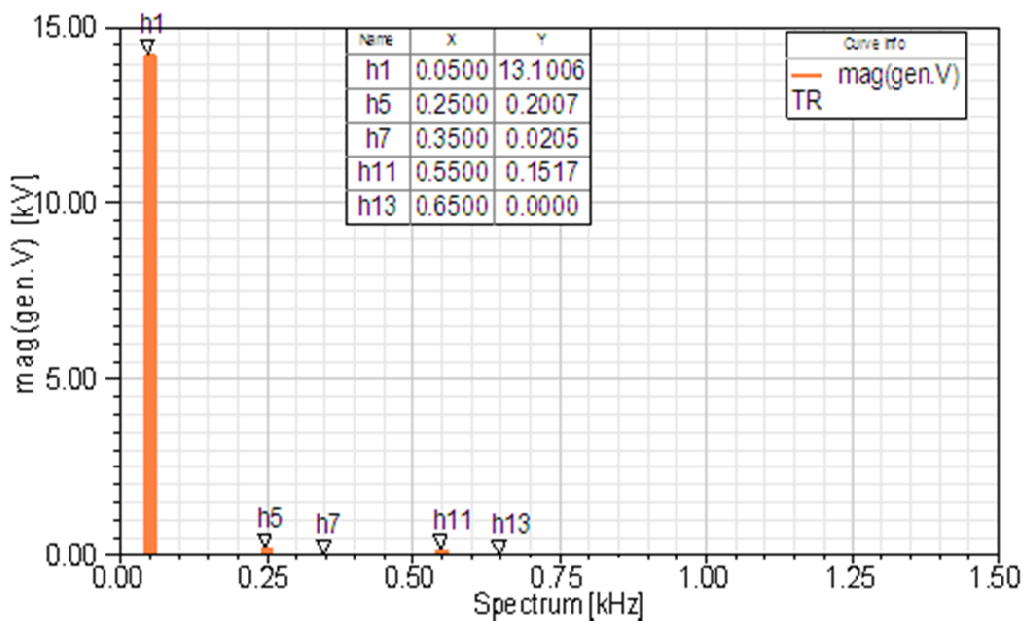
ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი ენგურის საგენერატორო სალტისთვის იქნება:

$$THD \% (V. Eng.) = \frac{\sqrt{h_5^2 + h_7^2 + h_{11}^2}}{h_1} \times 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{0.2^2 + 0.021^2 + 0.152^2}}{13.1} \times 100 = \frac{0.251}{13.1} \times 100 = 1.93\%$$



ნახ.76 ძაბვა ენგურის საგენერატორო სალტზე (n-1, ფილტრებით)



ნახ.77 ენგურის გენერატორის ძაბვის სპექტრი (n-1, ფილტრებით)

როგორც გაანგარიშებამ აჩვენა ნორმალურ რეჟიმთან შედარებით n-1 რეჟიმში ენგურის საგენერატორო სალტეზე ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი იზრდება 0.12%-ით მაგრამ არ სცდება დასაშვებ ზღვარს.

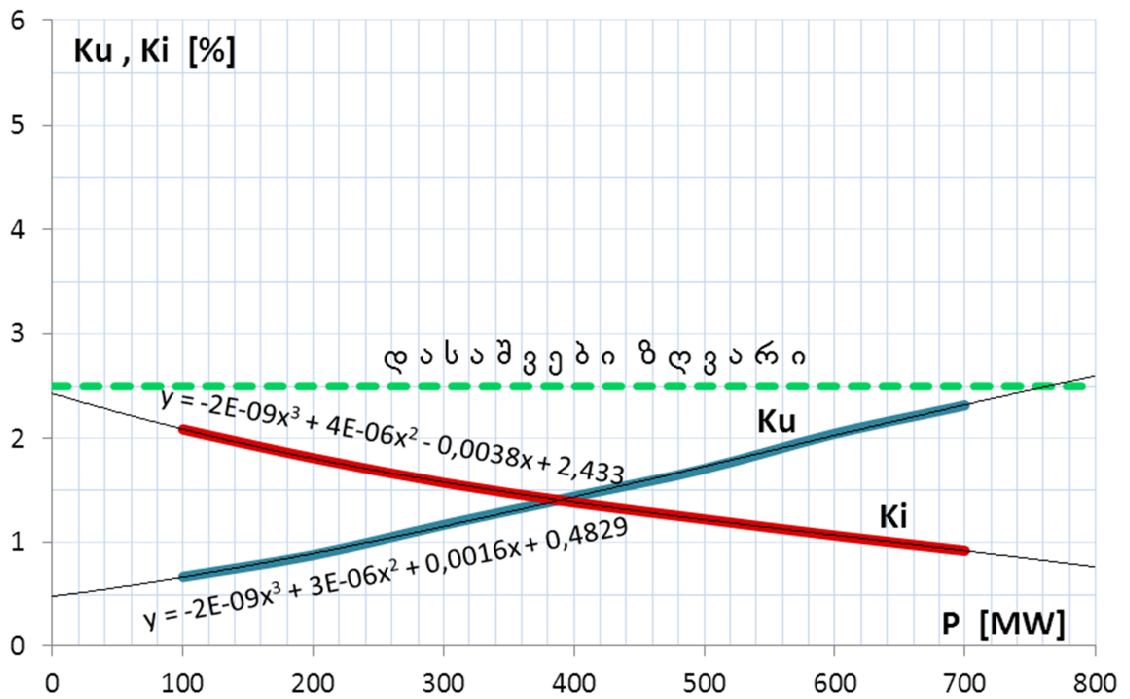
5.7 ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება მუდმივი დენის ჩანართის დატვირთვაზე ფილტრების გათვალისწინებით

კვლევის ბოლო ეტაპზე შევამოწმეთ შერჩეული ფილტრების ეფექტურობა გადასაცემი სიმძლავრის მთელ დიაპაზონში, რადგან თეორიულად შესაძლებელია რომელიმე კონკრეტულ რეჟიმში ქსელის კონკრეტულ უბნებში რეზონანსული კონტურების წარმოქმნა და დამახინჯების კოეფიციენტების დასაშვები ზღვრებიდან გამოსვლა.

ამისათვის როგორ უკვე ზემოთ ფილტრების გარეშე გავაკეთეთ, კვლავ ვზრდით ჩანართის დატვირთვის 100 მგვტ-იანი ბიჯით 0-დან 700 მგვტ-მდე და თითოეულ ბიჯზე ახალციხის ქვესადგურის 500 კვ ძაბვის სალტისთვის ვახდენთ დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტების გამოთვლას.

ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება ჩანართით გადაცემულ სიმძლავრესთან და ამ დამოკიდებულების ამსახველი მატემატიკური ფუნქციები ნაჩვენებია 78-ე ნახაზზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს ჩანართის დატვირთვის მთელ დიაპაზონში დენისა და ძაბვის დამახინჯების კოეფიციენტები არ აღემატება საქართველოს ელექტროსისტემის მაღალი ძაბვის ქსელისთვის დასაშვებ ნორმას. აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ რომ ჩვენს მიერ, პოლიგონის მეთოდით და კომპიუტერული მაქსიმიზაციით, შერჩეული TT 3/12/24, DT 12/36 და C ტიპის ფილტრები უზრუნველყოფენ ქსელში ძაბვის დამახინჯების დასაშვები დონის შენარჩუნებას მუდმივი დენის ჩანართის დატვირთვის მთელ დიაპაზონში და აგრეთვე უზრუნველყოფენ ჩანართს საჭირო რეაქტიული სიმძლავრით, რადგან მათ მიერ 50 ჰერცზე გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე

აკმაყოფილებს ასეთი ტიპის ქვესადგურების პრაქტიკული გამოცდილებიდან გამომდინარე მოთხოვნას.



ნახ.78 დამახინჯების კოეფიციენტების დამოკიდებულება დატვირთვაზე

დასკვნა

1. გამოკვლევულ იქნა არასინუსოიდურობის ხარისხის დამოკიდებულება ჩანართით გადასაცემ სიმძლავრეზე ქსელის პარამეტრების გარეშე და ამ პარამეტრების გათვალისწინებით;
2. შექმნილია საქართველოს ელექტროსისტემის მაღალი დაბვის ქსელისა და მუდმივი დენის ჩანართის სპეციალური კომპიუტერული მოდელები “Ansoft Simplorer”–სთვის, რაც საშუალებას იძლევა ელექტროსისტემის ნებისმიერ რეჟიმში ჩატარდეს ჰარმონიკული ანალიზი.
3. დადგინდა, რომ ახალციხის კონვერტორული ქვესადგურის 700 მგვტ სიმძლავრით დატვირთვისას, ცვლადი დაბვის ფილტრების ინსტალაციამდე დაბვის მაქსიმალური ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტი აღწევს 5.57%-ს (ახალციხის 500 კვ დაბვის სალტე);
4. შედგენილია დამახინჯების კოეფიციენტებისა და ჰარმონიკული მდგენელების კრებსითი ცხრილები 500 კვ დაბვის სხვადასხვა კვანძებისთვის;
5. განხილული იქნა ენეგროსისტემის n-1 რეჟიმი, რამაც აჩვენა, რომ ახალციხის 500 კვ დაბვის სალტეზე დაბვის დამახინჯების კოეფიციენტი გაიზარდა 6.59%-მდე;
6. პრაქტიკულად არც ერთ რეჟიმში მაღალი დაბვის ქსელში შესამჩნევი რეზონანსული კონტურების წარმოქმნა არ დაფიქსირებულა;
7. შესწავლილ იქნა ზოგიერთი არაკანონიკური ჰარმონიკების წარმოქმნის საკითხი მუდმივი დენის ჩანართის მკვებავი სამფაზა სისტემის ასიმეტრიის დროს;
8. კვლევებითა და ექსპერიმენტებით მიღებული შედეგების საფუძველზე პოლიგონის მეთოდით და კომპიუტერული მაქსიმიზაციის გამოყენებით შერჩეულ იქნა ცვლადი დაბვის ფილტრები ახალციხის კონვერტორული ქვესადგურისთვის;

9. ცვლადი ძაბვის ფილტრების მოდელირების შემდეგ ჩატარდა განმეორებითი გაანგარიშება და ახალცხის კვანძში ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტმა შეადგინა ნორმალურ რეჟიმში 2.47%, ხოლო n-1 რეჟიმში 2.72%, რაც საქართველოს ქსელის კოდით დასაშვებ დონეს წარმოადგენს;
10. შერჩეული ცვლადი ძაბვის ფილტრები უზრუნველყოფენ 500 კვ ძაბვის ყველა კვანძში დამახინჯების კოეფიციენტების დასაშვებ დონემდე შემცირებას და ახდენენ კონვერტორული ქვესადგურის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას საჭირო დონეზე.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Power Systems Harmonics, George J. Wakileh, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 2001;
2. The control of VSC-HVDC and its use for large industrial power systems, Department of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Goteborg, Sweden 2003;
3. New in HVDC Converters , University of Manitoba, 2006;
4. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation, Neville Watson and Jos Arrillaga, The Institution of Engineering and Technology London , United Kingdom 2003;
5. A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems, Lidong Zhang, Lars Dofnas, ABB, Sweden 2006;
6. The Illustrated Dictionary of Electronics, Stan Gibilisco, McGraw-Hill, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico, City, Milan, New Delhi, San Juan, SeoulSingapore, Sydney, Toronto 2001.
7. Power System Stability and Control, Prabha Kundur, McGraw-Hill Inc, Madrid, London 1994;
8. PSS/E 31.1 (Power System Simulation for Engineering) Documentation; PTI – Software Solutions, 2007;
9. Handbook of Power System Engineering, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 2007;
10. Modern Power System Analysis, D. P. Kothari, I. J. Nagrath, New Delhi 2009;
11. HVDC and FACTS Controllers, Vijay K. Sood, Kluwer Academic Publishers, New York 2004;
12. Dynamic Performance of a B2B HVDC Station Based on Voltage Source Converters, Mohamed Khatir, Samir Hadjeri, Journal of Electrical Engineering, VOL. 61, NO. 1, 2010, 29–36;

13. Power Systems, Leonard L. Grigsby, Taylor & Francis group 2006;
14. Modern Control and Protection System for HVDC, Torbjörn Karlsson, Mats Hyttinen, Lars Carlsson and Hans Björklund, ABB Power Systems, S-771 ABB Power Systems, S-771 80 Ludvika, Sweden 2007;
15. Electric Power Substations Engineering, John D. McDonald, Taylor & Francis group 2006;
16. AC Power Systems Handbook, Jerry C. Whitaker, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2007;
17. High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange, Siemens AG, Energy Sector, Freyeslebenstrasse 1 91058 Erlangen, Germany 2009;
18. Georgia – Turkey Back-to-Back, “Black Sea Regional Transmission Project” Markus Åkerberg, Lead Engineer, Power Systems, ABB Ludvika, Sweden 2010;
19. VSC-HVDC for Industrial Power Systems, Cuiqing Du, Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden 2007;
20. Power Electronics Handbook, Fraidoun Mazda, Newnes, An imprint of Elsevier Science, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 200 Wheeler Road, Burlington MA 0 1803, Third edition 1997;
21. Power Electronic Control in Electrical Systems, E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya – Lara and T. J. E. Miller, Oxford 2002;
22. Power Electronics Handbook, Muhammad H. Rashid, University of West Florida, Pensacola, Florida 2001;
23. High Frequency and Microwave Engineering, E. da Silva, The Open University, Butterworth–Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041 A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, First published 2001;

24. HVDC Transmission, Dennis A. Woodford, Manitoba HVDC Research Centre
400-1619 Pembina Highway Winnipeg, Manitoba, R3T 3Y6 Canada 1998;
25. Power System Protection, P.M. Anderson, The Institute of Electrical and
Electronics Engineers, New York 1999;
26. Simulation of Wind-Power Plants combining ATP/ATPDesigner and Simplorer,
Michael Igel, Stefan Winterheimer Hochschule für Technik und Wirtschaft des
Saarlandes, Germany 2007;
27. Interconnected Power System Dynamics Tutorial, J. Bucciero, M. Terbrueggen,
Longmont, Colorado 1997;
28. მუდმივი დენის ჩანართი და გადადინების მართვა, გ.არზიანი,
ჟურნალი "ენერჯია", №3(47), 2008;
29. სიმძლავრის გამცემ სისტემაში არასინუსოიდურობის ხარისხის
გამოკვლევა მუდმივი დენის ჩანართით ექსპორტირებულ
სიმძლავრესთან დამოკიდებულებაში, გ.არზიანი, ჟურნალი "ენერჯია",
№1(57), 2011;
30. საქართველოს ელექტროსისტემაში არასინუსოიდურობის ხარისხის
გამოკვლევა თურქეთში 1000 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტისას,
გ.არზიანი, ჟურნალი "ენერჯია", №1(61), 2012.