

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი ხაჩიძე

მუდმივი დენის ჩანართისა და სინქრონული კომპენსატორების
ენერგოსისტემასთან ერთობლივი მუშაობის რეჟიმების კვლევა

სადოქტორო პროგრამა: “ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია”

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2017 წელი

საავტორო უფლება ©, 2017- წელი, გიორგი ხაჩიძე

თბილისი

2017 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით გიორგი ხაჩიძე მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „მუდმივი დენის ჩანართისა და სინქრონული კომპენსატორების ენერგოსისტემასთან ერთობლივი მუშაობის რეჟიმების კვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2017 წელი

ხელმძღვანელი:

პროფესორი დემურ კობრეიძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2017 წელი

ავტორი: გიორგი ხაჩიძე
დასახელება: მუდმივი დენის ჩანართისა და სინქრონული კომპესატორების ენერგოსისტემასთან ერთობლივი მუშაობის რეჟიმების კვლევა
ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის
აკადემიური ხარისხი: აკადემიური დოქტორი
სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2017

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 იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

საქართველოს ელექტროსისტემის პერსპექტიული განვითარების გეგმის შესაბამისად თურქეთში განხორციელდა ასეულობით მგვტ სიმძლავრის ექსპორტი. ამასთან, საქართველოსა და თურქეთის ელექტროსისტემები ერთმანეთს დაუკავშირდნენ ასინქრონულად, მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით. შესაძლებელი გახდა 700 მგვტ სიმძლავრის ექსპორტი ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართიდან.

ასეთი კავშირი, როგორც საქართველოს, ისე თურქეთის ელექტროსისტემებში იწვევს ძაბვის ფორმის დამახინჯებას, რამდენადაც კონვერტორული ბლოკები წარმოადგენენ არაწრფივ მომხმარებლებს. ძაბვის დამახინჯება თავის მხრივ ორივე სისტემაში ქმნის რიგ პრობლემებს (ელენერჯის ხარისხის გაუარესება, გენერატორების და ტრანსფორმატორების დამატებითი გახურება, იზოლაციის ნაადრევი დაბერება, გაზრდილი დანაკარგები და ა.შ.) და აუცილებელია შეფასდეს არასინუსოიდურობის ხარისხი და საჭიროების შემთხვევაში გატარდეს შესაბამისი ღონისძიებები. ნაშრომში ჩატარებულია ჰარმონიკული ანალიზი საქართველოს ელექტრო სისტემისთვის ახალციხის მუდმივი დენის ჩანართით 700 მეგავატ სიმძლავრის ექსპორტის პირობებში.

ნაშრომის პირველ თავში განხილულია HVDC ტექნოლოგია, კონვერტორების კლასიფიკაცია, მათი გამოყენების სფერო და დადებითი და უარყოფითი მხარეები. ზოგადად არის ასევე განხილული HVDC სისტემით განპირობებული ეკოლოგიური ფაქტორები.

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

ასევე განხილულია IGBT ტიპის ველით მართვადი ტრანზისტორების ბაზაზე აგებული მუდმივი დენის ჩანართი. შედარებულია LCC ტიპის HVDC და VSC ტიპის HVDC სისტემები IGBT ტიპის მუდმივი დენის ჩანართის სისტემა. ასევე დამუშავებულია ზეგამტარი მანქანური ტიპის ტრანსფორმატორების ბაზაზე აგებული მუდმივი დენის ჩანართი.

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

მესამე თავში გამოკვლეულია გარდამქმნელის მუშაობა გამართვისა და ინვერსირების რეჟიმში. მოყვანილია ორბოგიანი გარდამქმნელის ეკვივალენტური სქემა და ახსნილია ტრანსფორმატორის მეორეული, ვარსკვლავად და სამკუთხედად შეერთებული გრაგნილების მუშაობის რეჟიმი. ეკვივალენტური სქემა შედგენილია ორი ორბოგიანი ტრანსფორმატორისთვის, რომლის ანალიზის შედეგები შეიძლება გავრცელდეს სქემაზე ერთი სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორით.

ამავე თავში გამოკვლეულია გამართველის მუშაობა 4-5 რეჟიმში და ახსნილია ვენტილების მუშაობის თანმიმდევრობა. გაანალიზებულია ორბოგიანი გარდამქმნელის მუშაობის რეჟიმი, როდესაც ორივე ბოგაში ერთ დროულად არ ხდება დენის კომუტაცია.

ასევე ახსნილია ინვერტორის მუშაობა 4-5 რეჟიმში და გამოყვანილია ჩაქრობის 8 კუთხის გამოსათვლელი ფორმულები ინვერტორის 4-5 რეჟიმში მუშაობისას.

განხილულია მთავარი ტრანსფორმატორის დენები და ძაბვები, ცვლადი დენი და სიმძლავრე გარდამქმნელის შესავალზე. გამოკვლეულია ტრანსფორმატორის ვარსკვლავად და სამკუთხედად შეერთებული მეორადი გრაგნილის დენის მნიშვნელობები. მოყვანილია ორბოგიანი გარდამქმნელის სქემა და ახსნილია 12-ფაზა გარდამქმნელის შემთხვევაში სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკები როგორ იკვრებიან სქემის შიგნით.

ასევე ჩატარებულია გარდამქმნელის შესავალზე სიმძლავრის ანალიზი. განხილულია შემთხვევა, როდესაც დატვირთვის დენის გაზრდასთან ერთად მცირდება უმაღლესი ჰარმონიკების ფარდობითი მნიშვნელობა შემავალ დენში და ამის გამო $I(1)/I$ უახლოვდება 1-ს. ასე მაგალითად ორბოგიანი გარდამქმნელისათვის, როცა $\alpha = 0$ და $\gamma = 30^\circ$ ფარდობა $I(1)/I = 0.982$.

გარდამქმნელის სიმძლავრის კოეფიციენტში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს $\cos\gamma(1)$.

მეოთხე თავში განხილულია სინქრონული კომპენსატორის მუშაობის რეჟიმები. მოყვანილია სინქრონული კომპენსატორის ვექტორული დიაგრამები და აქტიური და რეაქტიური სიმძლავრეების თანაფარდობის მრუდეები. ჩატარებულია კომპენსატორში გარდამავალი რეჟიმების ანალიზი გორევ-პარკის განტოლებების საფუძველზე. მიღებულია დენების მიყისი მნიშვნელობების გამოსახულებები. კომპენსატორის ბრუნვის სიხშირის მუდმივი მნიშვნელობებისათვის განტოლებები ამოხსნილია ოპერატორული მეთოდით მანქანის ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით, მოყვანილია დენების შესაბამისი მრუდეები.

მეხუთე თავში განხილულია მუდმივი დენის გადაცემის ხაზში დენის ჰარმონიკების შემცირების ხერხები. მოყვანილია ქვესადგურის გამოსავლი მოწყობილობის ფილტრების სქემები, რომლითაც შეიძლება დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემცირება.

ამავე თავში განხილულია რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შესაძლო ვარიანტები. ნაჩვენებია სქემები და მოყვანილია ფორმულები სიმძლავრის კომპენსაციასთან დაკავშირებით, სადაც გამართველის რეჟიმში

გარდამქმნელი მუშაობს პრაქტიკულად მუდმივი α კუთხის დროს, ხოლო ინვერტორულ რეჟიმში მუდმივი δ კუთხით.

ახალციხის ქვესადგურის მაგალითზე გამოკვლევულია მუდმივი დენის ჩანართით გამოწვეული დამახინჯების რამდენიმე კოეფიციენტი. ასევე ნაჩვენებია სპეციალურ პროგრამაში დიაგრამები, რომელიც რეალურად ასახავს ჰარმონიკების შემცირების ხერხებს.

Abstract

In Georgian and Turkish power systems have connected to each other in parallel asynchronous operation through the b2b station. It was possible Georgia was exported 700 MW power through Akhaltsikhe b2b.

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 of b2b station are created.

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.

There is also a constant power supplement built on the basis of the IGBT type driven transistors. Compared to LCC type HVDC and VSC type HVDC systems. The IGBT type constant power tap system is included. HVDC is built on the basis of superconducting machine type transformers.

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 the third chapter, it has been investigated the work of converter in the regime of inversion and arrangement. It has been cited equivalent scheme of double-bridge converter and It has been explained regime of a second, starry and triangular connected scrolls. Equivalent Scheme has been composed for the two double – bridge transformer, tank. Which has results of analysis and it is possible to spread on the scheme for the one three-scroll transformer tank.

On the same chapter, it has been investigated the work of rectifier in the 4-5 regime and has been explained sequence of ventiles work. It has been analysed

the regime of double – bridge converter, when it does not happen current commutation simultaneously in the double bridge.

Also it has been explained the work of inverter in the 4-5 regime and has been solved calculating formulas of the angle of switching off in the 4-5 regime of inverter work.

In the fourth chapter, it has been examined. The main currents of transformer tank, and strains, alternating current and capacity of converter. It has been investigated the meanings of star, a second and triangular connected scrolls. Current.. It has been cited double-bridge converter scheme and has been explained 12 phases, in the case of converter, different numbers of harmonics how are they connecting inside the scheme.

In the same chapter, it has been carried out capacity analysis on the opening of converter. It has been examined the occasion, when loading current with grouping, it shortens relative meaning of high harmonics in the input current and that is why $I(1)/I$ approaches to 1. For example for the double-bridge converter, when $\alpha=0$ and $\gamma=30^\circ$ ratio $I(1)/I = 0.982$.

Cosy (1) carries out the important role in the coefficient of converter it has been examined the shortening ways of current harmonics in the given line of substation outlet furniture, It may be shorten high harmonics of current.

The fourth chapter deals with working modes of synchronous compensator. Vector diagrams of simultaneous compensator and curvature of active and reactive capacities are given. Analysis of transition regimes in the compensator is based on the Gorev-Park Equations. The images of the denominator values have been obtained. The equations have been solved for the constant values of the frequency rotation of the compensator, with the operative method taking into account the parameters of the car, the corresponding currents of the currents are given.

The fifth chapter discusses the ways of decreasing power harmonics in the permanent power transmission line. The circuits of the sub-station device filter filters are designed to reduce the high order harmonics.

In the same chapter it has been examined possible versions of compensation of reactive capacity. It has been shown and cited schemes and formulas according capacity compensation, where in the regime of rectifier converter works practically at the time of constant α angle and by the constant δ angle in the inverter regime.

At the end of the work, with the example of the Akhaltsikhe substation have been researched several coefficients of distortion caused by the constant power insert. There are also graphs in the special program that really reflect the ways of reducing harmonics.

სარჩევი

შესავალი-----	19
თავი I მუდმივი დენის გადაცემის პრინციპული სქემები და HVDC ტექნოლოგია-----	22
1.1. ზოგადი ცნობები-----	22
1.2. მუდმივი დენის ელექტროგადაცემა-----	24
1.3 მდგ-ის გამარტივებული სქემები და მოქმედების პრინციპი-----	25
1.4. გარდამქმნელი ქვესადგურების ელექტრული ვენტილები-----	27
1.5. გარდამქმნელი ქვესადგურის ძირითადი აგრეგატი - ვენტილური ბოგა-----	28
1.6. ბოგების კასკადური ჩართვა გადამცემი ხაზის აგებისას-----	29
1.7. მდგ-ის სქემები უნიპოლარული და ბიპოლარული ხაზებით-----	31
1.8. მდგ შუალედური ქვესადგურებით-----	34
1.9. მდგ-ისა და ცვლადი დენის გადაცემის შედარება-----	36
1.10 HVDC კონვერტორების გამოყენების სფერო-----	38
თავი II მუდმივი დენის ჩანართის მოქმედების პრინციპი და მის მიერ გენერირებული ჰარმონიკები-----	40
2.1. მუდმივი დენის ჩანართის დადებითი მხარეები-----	40
2.2. 12-პულსიანი ვენტილური ჯგუფი და შესაბამისი ჰარმონიკები-----	40
2.3. კონვერტორის მოქმედების პრინციპი-----	42
2.4. კონვერტორის ხიდის კუთხეები-----	44

2.5.	მუდმივი დენის ჩანართი მაგნიტურ ველიანი ზეგამტარაი ტრანსფორმატორებით-----	45
2.6.	მოკლე შერთვის სიმძლავრის ინდექსი-----	47
2.7.	IGBT ტიპის ტრანზისტორებიანი გარდამქმნელების გამოყენება მუდმივი დენის ჩანართის სქემებში-----	48
თავი III	ორბოგიანი გარდამქმნელის მუშაობა გამართვისა და ინვერსირების რეჟიმში. მთავარი ტრანსფორმატორების დენები და ძაბვები. ცვლადი დენი და სიმძლავრე გარდამქმნელის შესასვლელზე-----	52
3.1.	ორბოგიანი გარდამქმნელის ეკვივალენტური სქემა-----	53
3.2.	გარდამქმნელის მუშაობა 4 – 5 რეჟიმში-----	57
3.3.	ინვერტორის მუშაობა 4-5 რეჟიმში-----	59
3.4.	ტრანსფორმატორის ვარსკვლავად შეერთებული მეორეული გრაგნილის დენი-----	60
3.5.	ტრანსფორმატორის სამკუთხედად შეერთებული მეორადი გრაგნილის დენი-----	60
3.6.	ცვლადი დენი ორბოგიანი გარდამქმნელის შესავალზე-----	63
3.7.	ტრანსფორმატორის გრაგნილების ძაბვა ერთბოგიანი გარდამქმნელისთვის-----	64
3.8.	გარდამქმნელის შესავალზე სიმძლავრე. სიმძლავრის კოეფიციენტი-----	66
თავი IV	-----	69
4.1.	სინქრონული კომპენსატორები-----	69
4.2.	სინქრონული კომპენსატორის ფუნქციები. თეორია-----	73
4.3.	სინქრონული კომპენსატორის ჩართვის გარდამავალი პროცესი-----	81

თავი V	უმაღლესი რიგის ჰარმონიკების შემცირება მდგ - ის მოწყობილობებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია----	95
5.1.	ფილტრების შერჩევის ლოგიკა-----	95
5.2.	HVDC სისტემის მიერ გენერირებული მაღალი რიგის დენის ჰარმონიკების გავლენა და მისი შემცირების ხერხები-----	97
5.3.	ქ/ს ახალციხის კონვერტორის ცვალადი ძაბვის ფილტრები---	100
5.3.1.	TT 3/12/24 ფილტრი-----	100
5.3.2.	DT 12/36 ფილტრი-----	101
5.3.3.	C ბლოკი-----	102
5.4.	რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია-----	103

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.	LCC HVDC და VSC HVDC სისტემების შედარება-----	51
ცხრილი 2.	ჩაქრობის δ კუთხის გამოსათვლელი ფორმულები ინვერტორის 4-5 რეჟიმში მუშაობისას-----	59
ცხრილი 3.	სტატორის დენისა და აგზნების ძაბვის დამოკიდებულება დროზე-----	77
ცხრილი 4.	დომინანტური სიხშირეები ცვლად და მუდმივ დენში, ასევე მათი ჰარმონიკების ურთიერთქმედება-----	97
ცხრილი 5.	ჰარმონიკების გავლენა 500კვ-ში-----	99

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1	მდგ - ის სქემა ქ/ს1 და ქ/ს2 - გარდამქმნელი ქვესადგურები, გ - გენერატორი, დ - დატვირთვა-----	26
ნახ. 2	6-პულსიანი (ერთბოგიანი) გამმართველის სქემა-----	29
ნახ. 3	ბოგების კასკადური -----	30
ნახ. 4	სქემა (ა) უნიპოლარული და (ბ) ბიპოლარული ხაზით-----	32
ნახ. 5	შუალედური ქვესადგურების მიმდევრობითი ჩართვა. გამ- გამმართველი, ი- ინვერტორი, 1- მშუნტავი ვენტილი, 2- მშუნტავი აპარტი-----	35
ნახ. 6	შუალედური ქვესადგურების პარალელური ჩართვა. მდა- მუდმივი დენის ამომრთველი, გამ - გამმართველი, ი - ინვენტორი-----	35
ნახ. 7	ცვლადი და მუდმივი დენის ხაზების შედარება-----	38
ნახ. 8	ოთხმაგი ვენტილის სტრუქტურა-----	41
ნახ. 9	6 - პულსიანი ხიდი გამართვისა და ინვერტირების რეჟიმი-----	43
ნახ. 10	კომუტაციური პროცესები მუდმივი დენის ჩანართში-----	44
ნახ. 11	მუდმივი დენის ჩანართი მაგნიტურველიანი ტრანსფორმატორებით: B-გარდამქმნელი; N-ინვერტორი; P-რეაქტორი-----	46
ნახ. 12	IGBT ტრანზისტორების შემცველი გარდამქმნელების სქემა-----	49
ნახ. 13	HVDC კონვერტორის განვითარება-----	50
ნახ. 14	გარდამქმნელის საანგარიშო სქემა-----	53
ნახ. 15. ა)	HVDC სისტემით გადაცემის პრინციპი. ცვლადი და მუდმივი დენები-----	55
ნახ. 15. ბ)	HVDC სისტემით გადაცემის პრინციპი.	

	ცვლადი და მუდმივი დენები-----	56
ნახ. 16	კონვერტორული ტრანსფორმატორის ძაბვები-----	56
ნახ. 17	TFR-ის პროგრამა ერთფაზა მოკლე შრთვის დენების ანალიზის ოსცილოგრამები-----	62
ნახ. 18	ორბოგიანი გარდამქმნელის შესავალზე დენი-----	63
ნახ. 19	ვარსკვლავად შეერთებული მეორეული გრაგნილის ფაზური ძაბვის განსაზღვრა-----	65
ნახ. 20	12- პულსიანი ვენტილის ძაბვები-----	65
ნახ. 21	გარდამქმნელის შესავალზე სიმძლავრის საანგარიშოდ $(X > 0)$ -----	68
ნახ. 22	სინქრონული კომპესატორის როტორი-----	70
ნახ. 23	სინქრონული კომპესატორის სტატორი-----	70
ნახ. 24	სინქრონული კომპენსატორის ვექტორული დიაგრამები ა - უქმი სვლის რეჟიმში, ბ - გადააგზნების რეჟიმში, გ - მცირედ აგზნების რეჟიმში-----	71
ნახ. 25 ა), ბ)	სინქრონული კომპესატორის თეორია-----	73
ნახ. 25 გ), დ)	სინქრონული კომპესატორის თეორია-----	74
ნახ. 26	სინქრონული გენერატორების რამოდენიმე შესაძლებლობების მრუდი-----	75
ნახ. 27	უქმსვლაზე გაჯერება და მოკლეშრთვის მახასიათებელი-----	76
ნახ. 28	სტატორის დენი და აგზნების ძაბვა დამოკიდებული დროზე-----	78
ნახ. 29	მიწასთან მოკლეშრთვის დენის შეზღუდვა დროზე დამოკიდებულებით-----	79
ნახ. 30	სინქრონიზაციის დასაშვები კრიტერიუმები-----	80
ნახ. 31	მანქანის ვექტორული დიაგრამა-----	83

ნახ. 32	ფაზური დენის აპერიოდული მდგენელი-----	94
ნახ. 33	დამოკიდებულება $i_a = f(t)$ სხვადასხვა კუთხეების ჩართვის შემთხვევაში-----	94
ნახ. 34	სისტემის წინაღობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა-----	95
ნახ. 35	12-პულსიანი ხიდის დენის ჰარმონიკები-----	96
ნახ. 36	ფილტრების სქემები-----	98
ნახ. 37	TT 3/12/24 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი-----	101
ნახ. 38	DT 12/36 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი-----	102
ნახ. 39	რეაქტიული სიმძლავრის საანგარიშო სქემა (გარდამქნელი ქვესადგურის სალტებზე)-----	103
ნახ. 40	დამოკიდებულების მრუდები ერთ ბოგიანი გამმართველისთვის-----	104
ნახ. 41	კონდესატორული ფილტრები დენების განაწილება-----	105
ნახ. 42	კონდესატორთა ბატარეის მიმდევრობითი ჩართვის სქემები-----	106

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

ე.გ.ხ - ელექტროგადაცემის ხაზი

მშ - მოკლე შერთვა

A – Ampere (amperi)

AC – Alternating Current (ცვლადი დენი)

B2B - Back to Back station (მუდმივი დენის ჩანართი)

D - Diode (დიოდი)

DC - Direct Current (მუდმივი დენი)

ESCR - Effective Short Circuit Ratio (ეფექტური მოკლე შერთვის დონე)

h - harmonic (ჰარმონიკა)

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

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)

kV – kilovolt (კილოვოლტი)

kHz - kilohertz (კილოჰერცი)

LCC – line-commutated converters (ხაზით კომუტირებადი კონვერტორი)

mag - magnitude (ამპლიტუდა)

MW - Megawatt (მეგავატი)

PWM - Pulse-Width Modulation (განივ-იმპულსური მოდულაცია)

S - Second (წამი)

SVC - Static Var Compensator (რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური კომპენსატორები)

T - Transformer (ტრანსფორმატორი)

THD – Total Harmonic Distortion (ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება)

D_{tot} - total voltage distortion (ძაბვის საერთო დამახინჯება)

D_{eff} - total effective distortion (დამახინჯების ზოგადი ეფექტი)

TIF - Telephone Interference Factor (სატელეფონო ფაქტორის ხელშეშლა)

VSC – Voltage Source Converter (ძაბვის წყაროს კონვერტორი)

მადლიერება

მადლობას ვუხდით ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფესორ დემურ კობრეიძეს, დისერტაციაზე მუშაობის პერიოდში გაწეული სამეცნიერო და პედაგოგიური შრომისთვის.

შესავალი

მძლავრი ენერგეტიკული სისტემების დაკავშირება ხდება მუდმივი ან ცვლადი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზებით. როდესაც საჭიროა ასინქრონული კავშირის განხორციელება. (სხვადასხვა სიხშირის სისტემების დაკავშირება და ა.შ.) მიზანშეწონილია მუდმივი დენის ჩანართის გამოყენება. მუდმივი დენის ჩანართი შეიცავს გამმართველ-ინვერტორულ ქვესადგურს, რომლებიც დაკავშირებულია უშუალოდ რეაქტორის საშუალებით.

მუდმივი დენის ჩანართის (მდჩ) ფუნქციას წარმოადგენს ორი სხვადასხვა სისტემის ერთმანეთისგან დამოუკიდებელი მართვა და ასევე სხვადასხვა პარამეტრებზე მუშაობის საშუალება. შეიძლება მუდმივი დენის ჩანართის საშუალებით ერთმანეთს დაუკავშირდეს ერთნაერი სიხშირის ელექტროსისტემები მათი ურთიერთ გავლენის შემცირების მიზნით ავარიულ რეჟიმში. ჩვენს შემთხვევაში განხილულია ეს უკანასკნელი შემთხვევა. ჩანართის პარამეტრების ოპტიმალური შერჩევა უზრუნველყოფს სისტემების მდგრად მუშაობას, როგორც დამყარებულ, ისე არასტაციონარულ რეჟიმებში. ჩანართის პარამეტრების გაანგარიშება და ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შევირჩიოთ მუშაობის საჭირო რეჟიმები.

წინამდებარე ნაშრომში განხილულია მდჩ-ის ძირითადი ელემენტების მუშაობის დამყარებული (სტაციონარული) და არასტაციონარული რეჟიმები. განხილულია ერთ ბოგიანი და ორ ბოგიანი გარდამქმნელები (6 ფაზა და 12 ფაზა კასკადური - ბოგური სქემები). განხილულია გამართვის და ინვერტირების რეჟიმები. მოყვანილია ფორმულები ძაბვების, დენების, კომუტაციის კუთხეების და გარე მახასიათებლების გამოსათვლელად. განხილულია ძაბვების და დენების ჰარმონიკებისა და რხევითი პროცესების ზოგიერთი საკითხი მუდმივი დენის საჰაერო და საკაბელო ხაზების ძირითადი პარამეტრები განსაზღვრულია ცალკე.

მდრ-ის გამმართველი და ინვერტორული ქვესადგურების ელექტრომაგნიტური პროცესების ზუსტი ანალიზი აუცილებელია აღნიშნული მოწყობილობის გამართული ექსპლუატაციისთვის.

მდრ-ის მოწყობილობის სისტემასთან ორგანულადაა დაკავშირებული სინქრონული კომპესატორები, რომლის დანიშნულებაა ეფექტური მოკლე შერთვის დონის გაუმჯობესება, ძაბვის დამატებითი რეგულირება და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია. მდრ-ის და სინქრონული კომპენსატორის ენერგოსისტემასთან ერთობლივი მუშაობის საკითხები არის აქტუალური და ჩატარებული ანალიზი არის ძალიან მნიშვნელოვანი ანალოგიური დანადგარების გამოყენებისას.

გარდა მანქანური კომპესატორებისა გამოყენებულია სტატიკური კომპესატორი - კონდესატორებისა და რეზისტორების ბაზაზე.

ჩატარებული ჰარმონიკული ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შერჩეულ იქნეს მოწყობილობის ოპტიმალური პარამეტრები და ცალკეული ჰარმონიკების კუთრი წილი ქსელის პარამეტრებზე.

მუდმივი დენის ჩანართის მათემატიკური მოდელირება ჩატარებულია მისი სტატიკური და დინამიკური რეჟიმების კვლევის მიზნით. დისერტაციაში დასმული საკითხები გადაწყვეტილია გარდამქმნელი მოწყობილობების დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის გზით. გამოყენებულია კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდი სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობებისათვის.

ნაშრომში გამოყენებულია საინჟინრო გამოთვლების მეთოდები. საკითხები გადაჭრილია ელექტრული ქსელების, ელექტრული მანქანების, მათემატიკური ანალიზისა და კომპიუტერული მოდელირების თეორიათა გამოყენებით. მუდმივი დენის ჩანართის კვლევისათვის გამოყენებულია ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი, სიდიდეთა როგორც მყისი ისე საშუალო მნიშვნელობებისათვის. განტოლებების საშუალებით ხდება

სტატიკური და დინამიკური რეჟიმების კვლევა და მდგ-ის ძირითადი მახასიათებლების გაანგარიშება.

დამუშავდა მუდმივი დენის ჩანართის დამყარებული და გარდამავალი რეჟიმების მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ სახასიათო რეჟიმები.

გაანგარიშებათა საფუძველზე შეიძლება შეირჩეს სქემის ელემენტების პარამეტრები, როგორც სტატიკური გარდამქმნელების, ასევე სინქრონული კომპესატორებისა და სტატიკური მფილტრავ-მაკომპენსირებელი კონდესატორთა ბატარეის ნაწილში.

მუდმივი დენის ჩანართის კვლევისათვის გამოყენებული ცვლადთა გარდაქმნის მეთოდი საშუალებას გვაძლევს ჩატარდეს სხვადასხვა ვენტილურ-ელექტრომაგნიტური სისტემების ყოველმხრივი ანალიზი ცვლადთა მყისი და საშუალო მნიშვნელობებისათვის მოწყობილობათა ოპტიმალური პარამეტრების შესარჩევად. ნაშრომში განხილულ ჩანართის სქემურ ვარიანტს ელექტრომანქანური ტიპის გამმრთველისა და ინვერტორის გამოყენებით და ზეგამტარი გრაგნილებით აქვს დიდი პერსპექტივა ახალი ტიპის ელექტროენერგეტიკული სისტემების შექმნისას.

თავი I

მუდმივი დენის გადაცემის პრინციპული სქემები და HVDC ტექნოლოგია

1.1 ზოგადი ცნობები

თავდაპირველად ელექტროენერჯის გადასაცემად გამოიყენებოდა მუდმივი დენი. შემდგომში ტრანსფორმატორების გამოყენების შესაძლებლობამ უფრო მიმზიდველი გახადა 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, კომპანი ASEA (Allmana Svenska Electriska Aktiebolaged) – 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 ექპერიმენტალური 200 კვ მუდმივი ძაბვის ხაზი “მოსკოვი - კაშირა”, სიგრძით 116 კმ. ხოლო პირველი კომერციული პროექტი გაეშვა 1954 წელს, 98 კმ სიგრძის წყალქვეშა კაბელით დენის მიწით 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.

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

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 სადენები 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

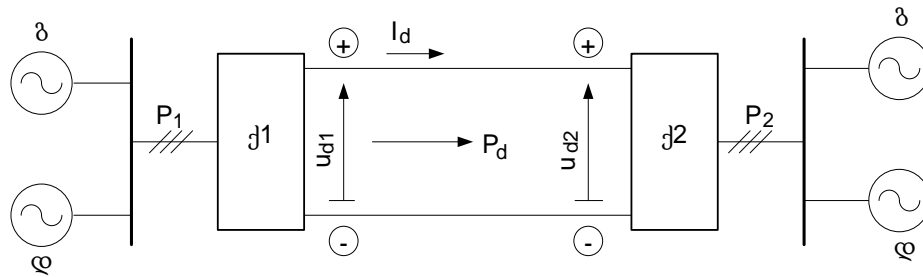
ნაწილებს შორის ელენერგიის მიმოცვლის მიზნით ცვლადი ძაბვით კავშირის განხორციელება ფიზიკურად შეუძლებელია. თუ ამ ნაწილებს შორის დავაყენებთ მუდმივი დენის კონვერტორულ ქვესადგურებს, მაშინ უკვე შესაძლებელი ხდება მათ შორის სასურველი სიდიდის სიმძლავრის მიმოცვლის განხორციელება, მიუხედავად მათი ასინქრონული მუშაობისა.

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 მდგ-ის გამარტივებული სქემები და მოქმედების პრინციპი.

აქამდე აგებული მდგ გამოიყენება ერთი გეოგრაფიული პუნქტიდან მეორეში ენერგიის გადასაცემად. ასეთი გადაცემა შეიცავს ორ გარდამქმნელ ქვესადგურს ქ/ს1 და ქ/ს2 და მათი შემაერთებული მუდმივი დენის ხაზს (ნახ. 1). ხაზი შეიძლება იყოს საჰაერო, საკაბელო ან საჰაერო და საკაბელო (კომბირინირებული).

ნახაზი 1-ზე ცვლადი დენის ენერგო სისტემა პირობითად გამოსახულია გ-გენერატორით, ხოლო ენერგიის ყველა მომხმარებელი კი დ-ს სახით.



ნახ. 1 მდგ - ის სქემა ქ/ს1 და ქ/ს2 - გარდამქმნელი ქვესადგურები, გ - გენერატორი, დ - დატვირთვა

დავუშვათ, ელექტრო ენერგია გადაეცემა ქ/ს1 ქვესადგურიდან ქ/ს2 ქვესადგურის მიმართულებით. ქ/ს1 მუშაობს გამმართველის რეჟიმში ხოლო ქ/ს2 - ინვერტორის რეჟიმში.

ქ/ს1 ცვლადი დენის სისტემიდან იღებს P_1 აქტიურ სიმძლავრეს და გარდამქმნის მას P_{d1} სიმძლავრედ, რომელიც ხაზში სიმძლავრის დანაკარგების გამოკლებით მიეწოდება ქ2 ქვესადგურს, ქ2-ში მუდმივი დენის სიმძლავრე P_{d2} გარდამქმნებზე ცვლადი დენის აქტიურ P სიმძლავრეში და მიეწოდება მიმღები ენერგოსისტემის მომხმარებლებს.

სიმძლავრის დანაკარგებს აქვთ სახე:

$$\text{ქ/ს1 - ზე} \dots p_1 = P_1 - P_{d1}$$

$$\text{ხაზში} \dots p_b = P_{d1} - P_{d2}$$

$$\text{ქ/ს2 - ზე} \dots p_2 = P_{d2} - P_2$$

თანამედროვე მდგ-ზე სიმძლავრის დანაკარგის ერთ ქვესადგურზე შეადგენს 1,5 -2% , დანაკარგი ხაზში მისი სიგრძის მიხედვით საშუალოდ შეადგენს 10% - ს.

მაგალითად მდგ ვოლგოგრადი - დონბასი ხაზში დანაკარგები შეადგენს დაახლოებით 3,2%, ხაზის სიგრძეა 500 კმ, ხოლო მდგ ეკიბასტუზ - ცენტრი სიგრძით 2500 კმ დანაკარგები არის დაახლოებით 10%.

მუდმივი დენის ხაზის ბოლოებზე ძაბვების დონეების რეგულირებით შეიძლება შევცვალოთ I_d დენი ხაზში და შესაბამისად გადაეცემული სიმძლავრე. განვიხილოთ ერთი მაგალითი: $U_{d1} = 100$ კვ, სიმძლავრის დანაკარგი და ძაბვის ვარდნა ხაზში ნომინალური დენის ძალის შემთხვევაში (I_{dN}) შეადგენს 7% მაშინ

$$I_{dN} = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_b} = \frac{100 \text{ კვ} - 93 \text{ კვ}}{R_b}$$

ამ გამოსახულებიდან ნათლად ჩანს ხაზის ბოლოებზე ძაბვის უმნიშვნელო ცვლილებით როგორ მიიღწევა დენის ძალის შეცვლა ფართო საზღვრებში. ასე მაგალითად თუ დენი ნომინალური მნიშვნელობიდან I_{dN} ნულამდე შემცირდება გამმართველ ქვესადგურზე ძაბვის შემცირებით 100 დან 93 კვ-მდე ან ინვერტორული ქვესადგურის შემხვედრი ძაბვის მომატებით 93 დან 100 კვ- მდე.

მდგ - ის სქემა საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ სიმძლავრის ნაკადის მიმართულების შეცვლა (რევერსი) ამისათვის საჭიროა ორივე ქვესადგურზე მოხდეს მუშაობის რეჟიმის შეცვლა. ერთ-ერთი ქვესადგური გამართვის რეჟიმიდან გადადის ინვერტირების რეჟიმში, ხოლო მეორე პირიქით ინვერტირების რეჟიმიდან გამართვის რეჟიმში გარდა აღნიშნულისა საჭიროა გამმართული ძაბვა მეტი იყოს ინვერტორის შემხვედრი მიმართულების ძაბვაზე ხაზში ძაბვის ვარდნის სიდიდით.

1-4. გარდამქმნელი ქვესადგურების ელექტრული ვენტილები

დენის ერთი სახიდან მეორეში გარდაქმნისათვის აუცილებელია არაწრფივი ელემენტის გამოყენება. ასეთ ელემენტს წარმოადგენს ელექტრული ვენტილი, რომლის წინააღობა მკვეთრად

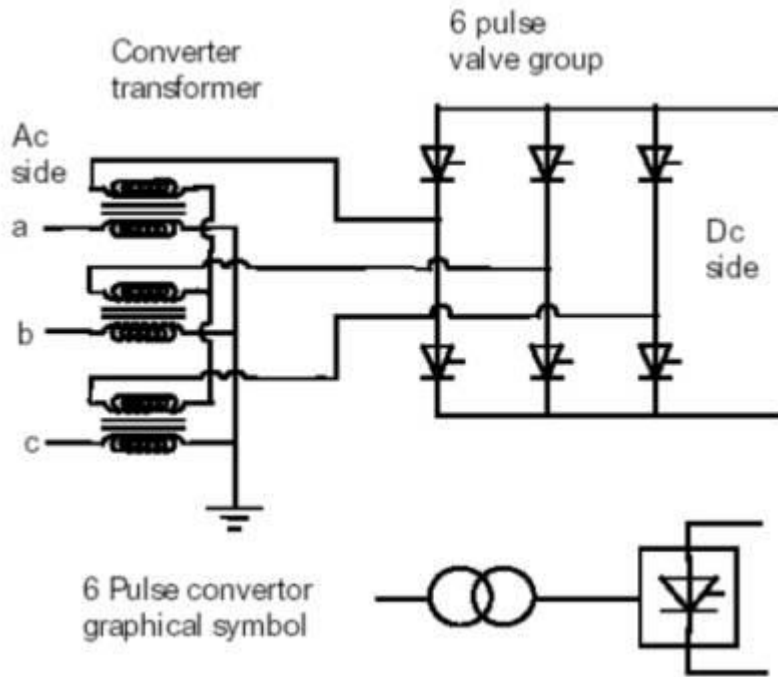
იცვლება დენის მიმართულების მიხედვით. პირდაპირი მიმართულებით ვენტის წინაღობა უმნიშვნელოა, ხოლო უკუ მიმართულებით პრაქტიკულად უსასრულოდ დიდია.

გარდაქმნილი ქვესადგურების ვენტილებს უნდა გააჩნდეთ მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტი. ამ მოთხოვნებს აკმაყოფილებს ვანტილების ორი სახეობა - იონური ვერცხლისწყლის კათოდით (ვერცხლისწყლიანი ვენტილები) და ნახევრადგამტარიანი. ადრე აგებულ მდგ -ში იყენებდნენ იონურ ვენტილებს, ხოლო შემდეგ დაიწყო ნახევრადგამტარიანი მართული ვენტილების - ტირისტორების გამოყენება. ამჟამად სერიულად გამოდის მძლავრი ნახევრადგამტარიანი ვენტილები მაღალი პარამეტრებით. (უკუ ძაბვით 6 კვ და პირდაპირი დენით 5 კა) მათი მიმდევრობით - პარალელური ჩართვით შეიძლება ავაგოთ მძლავრი ნახევრად გამტარიანი ბლოკები გარდამქმნილი ქვესადგურებისათვის.

1-5. გარდაქმნილი ქვესადგურის ძირითადი

აგრეგატი - ვენტილური ბოგა.

სამფაზიანი ცვლადი დენის მუდამივ დენად გარდასაქმნელად და პირიქით მუდმივი დენის ცვლად დენად გარდაქმნისათვის გამოიყენება მრავალი სქემა. ეს სქემები განსხვავდება ერთმანეთისაგან ვენტილების შეერთების ხერხით, ტრანსფორმარორის მეორეული გრაგნილების შესრულებით, ვენტილების ტრანსფორმატორთან მიერთების სქემით. ყველაზე მაღალი ტექნიკურ - ეკონომიკური მაჩვენებლები გააჩნია სამფაზა ბოგურ სქემას (ლარიონოვის სქემა) შემდგომში ამ სქემას ვუწოდებთ ერთბოგიან სქემას, ხოლო შესაბამის გარდაქმნელს „ერთბოგიან გამმართველს“ ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია ერთბოგიანი გარდაქმნელის სქემა.



ნახ. 2. 6-პულსიანი (ერთბოგიანი) გამმართველის სქემა

ბოგას თითოეულ მხარში შეიძლება ჩართული იყოს ერთი ან რამდენიმე ვენტილური ბლოკი. ბოგას ძაბვის გასაზრდელად გამოიყენება ვენტილების მიმდევრობითი შეერთება, ხოლო დიდი დენის და სიმძლავრის მისაღებად მათი პარარელური ჩართვა.

ამჟამად ექსპლუატაციაში მყოფი მდგ-ში გამოყენებული ვენტალურ ბოგებს აქვს შემდეგი პარამეტრები:

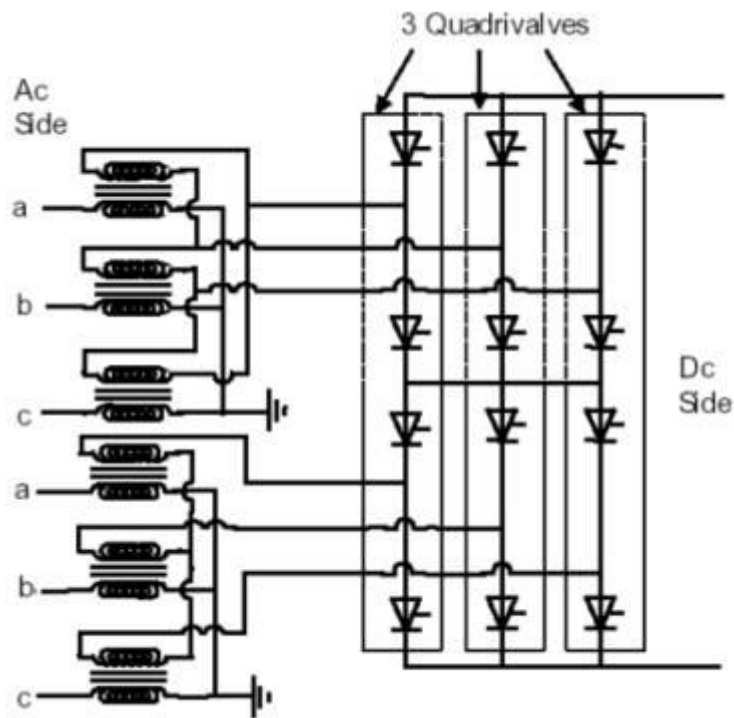
- გადაცემა ვილგოგრადი - დონბსი . . . 100 კვ, 90 მგვტ;
- გადაცემა ახალზელანდიაში 125 კვ, 150 მგვტ;
- გადაცემა ა.შ.შ. 133 კვ, 240 მგვტ.

1-6. ბოგების კასკადური ჩართვა გადამცემი ხაზის აგებისას,

ფერად ლითონზე დანახარჯების შემცირების მიზნით ზრდიან ხაზის ნომინალურ ძაბვას. ამის მიღწევა შეიძლება გარდამქმნელი ბოგას ძაბვის გაზრდით და ბოგების მიმდევრობით - კასკადური ჩართვით.

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია ბოგების კასკადური ჩართვა მუდმივი დენის მხარეს, კასკადური ჩართვა საშვალეზას იძლევა გარდამქმნელი ქვესადგურის 12- ფაზა რეჟიმში სამუშაოდ. ამ მიზანით იყენებენ სხვადასხვა შეერთების ჯგუფის მქონე ტრანსფორმატორებს.

ტრანსფორმატორების ნახევარის მეორეული გრაგნილები შეერთებულია ვარსკვლავად, ხოლო მეორე ნახევარი სამკუთხედად. გამოსული გამართული ძაბვა ამ შემთხვევაში უფრო გასწორებულია ვიდრე ცალკეული ბოგას ძაბვა, ხლო ინვერტორში ცვლადი დენი ახლოსაა სინუსოიდურთან. ტრანსფორმატორების მეორეული ძაბვები ერთმანეთის მიმართ 30° კუთხით არიან დაძრული. ასეთ სქემას უწოდებენ 12-ფაზა კასკადურ ბოგურ ან ორ ბოგა სქემას.



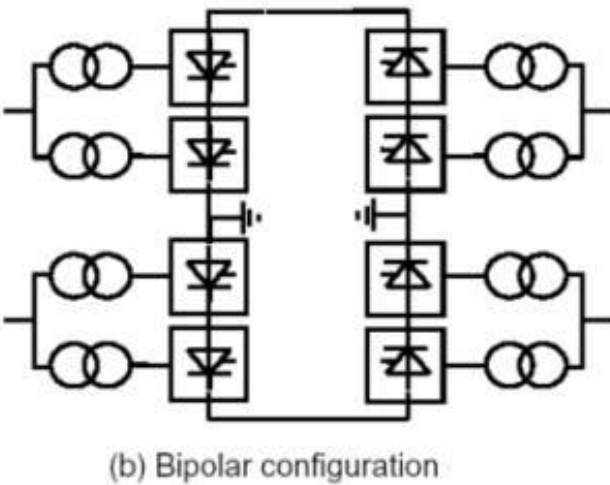
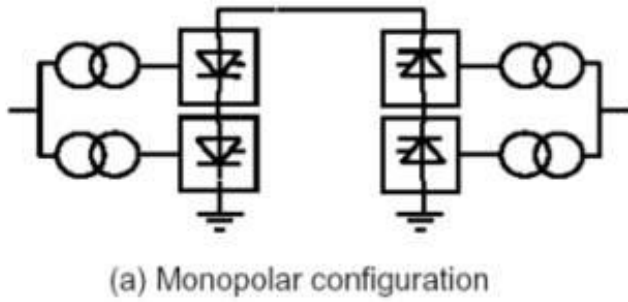
ნახ. 3. ბოგების კასკადური ჩართვა

1-7. მდგ-ის სქემები უნიპოლარული და ბიპოლარული ხაზებით

მუდმივი დენის გადაცემების განხორციელება შესაძლებელია უნიპოლარული და ბიპოლარული მუდმივი დენის ხაზებით.

ნაზ. 4 -ზე ნაჩვენებია მდგ-ის სქემა უნიპოლარული ხაზით. ხაზს გააჩნია ერთი პოლუსი - ეს არის ერთძარღვიანი მიწისქვეშა ან წყალქვეშა კაბელი ან საჰაერო ხაზის ერთი სადენი (ცალკეული ან გახლეჩილი). მეორე სადენის სახით გამოყენებულია დედემიწის ზედაპირი ან წყალი (ზღვა, სრუტე). თითოეული ქვესადგურის მეორე პოლუსი მიერთებულია. მუშა ჩამამიწებელთან, რომელიც წარმოადგენს ელექტროდს რომელიც ჩაფლულია მიწაში (ზღვის სანაპიროსთან). ჩამამიწებლები გაანგარიშებულია გადაცემის მუდმივ დენზე. მიწის ან ზღვის გამოყენება დენგამტარად ამცირებს ხაზის მშენებლობის ხარჯებს და ამცირებს ენერჯის დანაკარგს.

ამ სქემის გამოყენება მიზანშეწონილია მაშინ, როდესაც რაიმე ორ პუნქტს შორის საჭიროა უნიპოლარულ ხაზიანი მდგ-ს განხორციელება. მდგ-ს გააჩნია ორი ნახევარჯაჭვი (ნახევარწრედი) ნახევარჯაჭვში შედის ხაზის ერთი პოლუსი და თითოეულ ქვესადგურში მისი ერთი ნახევარი ამ პოლუსსა და ჩამიწებულ შუა წერტილს შორის. ერთ ნახევარჯაჭვში ავარიის შემთხვევაში (მაგალითად მოკლედშერთვა ხაზის პოლუსზე) მეორე ნახევარჯაჭვი აგრძელებს ნორმალურად მუშაობას, როგორც უნიპოლარული გადაცემა მუდმივი დენი ჩამამიწებლიდან გაედინება ყველა მიმართულებით და ამის გამო დენისადმი წინაღობა უმნიშვნელო სიდიდისაა.



ნახ. 4. სქემა (ა) უნიპოლარული და (ბ) ბიპოლარული ხაზით

მხედველობაში მიიღება დანაკარგები მხოლოდ ჩამამიწებელ ხაზებში, რომლებიც მიდიან ქვესადგურიდან მუშა ჩამამიწებელში. დენის გადინებაზე წინაღობა 0,05 - 0,15 ომის რიგისაა. მიწის უკუსადენად გამოყენებას აქვს უარყოფითი მხარეც. ეს იწვევს მიწისქვეშა ნაგებობების კოროზიას და მათ რღვევას გარდა ამისა იწვევს კაბელების გარსაცმისა და მილსადენების კოროზიას ელექტროლიზის გამო. დადგენილია რომ 1000 ა დენის შემთხვევასი საშიშ ზონას წარმოადგენს ჩამამიწებლიდან 5 კმ.

დენის დაბრუნებით მიწის საშუალებით. შუა წერტილების ჩამიწების გამო თითოეული ნახევარჯაჭვი მუშაობს ერთმანეთისაგან დამოუკუდებლად. ამ გადაცემის ძირითად უპირატესობას წარმოადგენს მიწაში დენის არ არსებობა

ნახევარჯაჭვების ერთნაირი დენებით მუშაობისას. ამის გამო მცირე ალბათობა მიწისქვეშა ნაგებობების კოროზიით დაზიანებისა: (მიკრო სადენები, კაბელები და ა.შ.). საჭიროა ჩამამიწებლების ნაკლები რაოდენობა.

თანამედროვე მდგ აგებულია ბიპოლარული ხაზებით (გადაცემები ვილგოგრადი - დონბასი, შვედეთი - დანია, ახალზელანდიაში, წყნარი ოკეანისა აშშ - ში.)

მდგ უნიპოლარული ხაზებით გამოიყენება შედარებით დაბალი ძაბვისა და მცირე სიმძლავრეების შემთხვევაში.

მდგ ბიპოლარული ხაზით ძაბვაზე ± 100 კვ ეკონომიკურად ხელსაყრელია უნიპოლურ ხაზიანი მდგ აგება 200 კვ ძაბვაზე. ხაზი ამ შემთხვევაში იაფია სადენების ნაკლები რიცხვისა და საყრდენების შემსუბუქების ხარჯზე. ასეთი გადაწყვეტა განხორციელდა გადაცემაზე კუნძული სარდინია - იტალია. აგებული უნიპოლარული გადაიცემა ძაბვით 200 კვ და არა ბიპოლარული ძაბვით ± 100 კვ მიწის მიმართ.

ამრიგად ბიპოლარული გადაცემის გამოყენება მიზანშეწონილია შედარებით მაღალი ძაბვებისა და დიდი სიმძლავრეების გადაცემის შემთხვევაში, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 5-ზე.

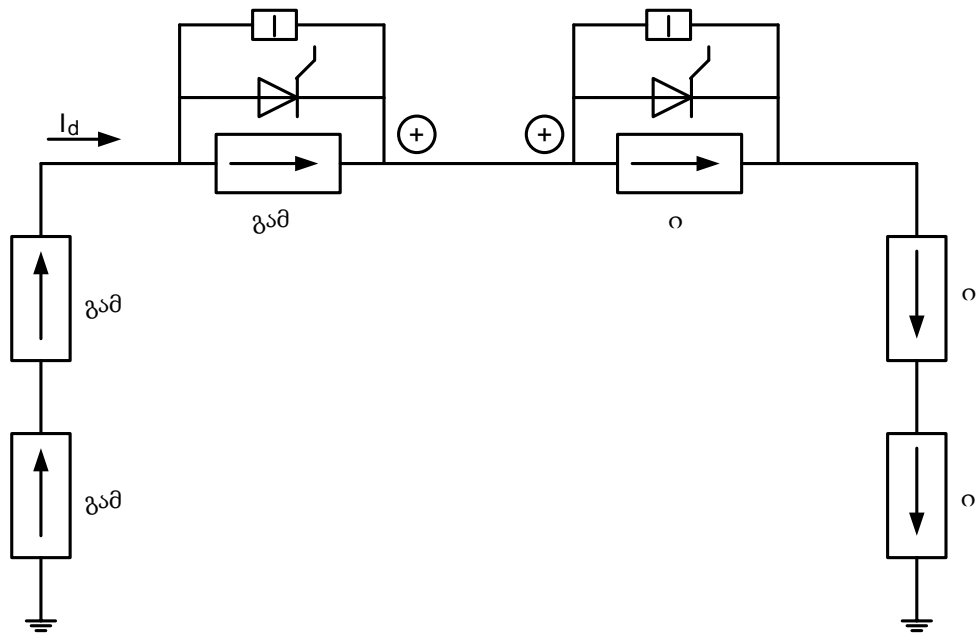
ცალკე უნდა განვიხილოთ მდგ-ის დაცვა ხაზზე მოკლე შერთვის ან სხვა ავარიული სიტუაციების შემთხვევაში, როდესაც აუცილებელია მუდმივი დენის წყაროს (გამმართველი ქვესადგურის) გამორთვა ამ შემთხვევაში იყენებენ გამმართველი ქვესადგურის მართულ ვენტილებს. ხაზში დენის შეწყვეტისათვის საჭიროა გამმართველის ჩაკეტვა, რაც მიიღწევა ვენტილების მართვის იმპულსების შეწყვეტით. ეს გამორიცხავს მუდმივი დენის ამომრთველების გამოყენებას. მართული ვენტილები ასრულებენ ამომრთველების მოვალეობას მუდმივი დენის ხაზის მხარეს.

ბიპოლარულ ხაზიანი მუდმივი დენის გადამცემებს გააჩნიათ ერთმანეთისაგან განცალკევებული დაცვები ნახევარჯაჭვების მიხედვით ერთი ნახევარჯაჭვის დაზიანებისას მუშაობას აგრძელებს მეორე განხილული რეზერვის ავტომატური ჩართვის სქემა (რაჩ). გარკვეული პაუზის შემდეგ მართვის იმპულსები მიეწოდება ვენტილებს და მოხდება გამმართველის ამუშავება. ამ შემთხვევაში გამორიცხულია ოპერაციები მაღალი ძაბვის ამომრთველებზე, რაც წარმოადგენს ამ სისტემის დადებით მხარეს.

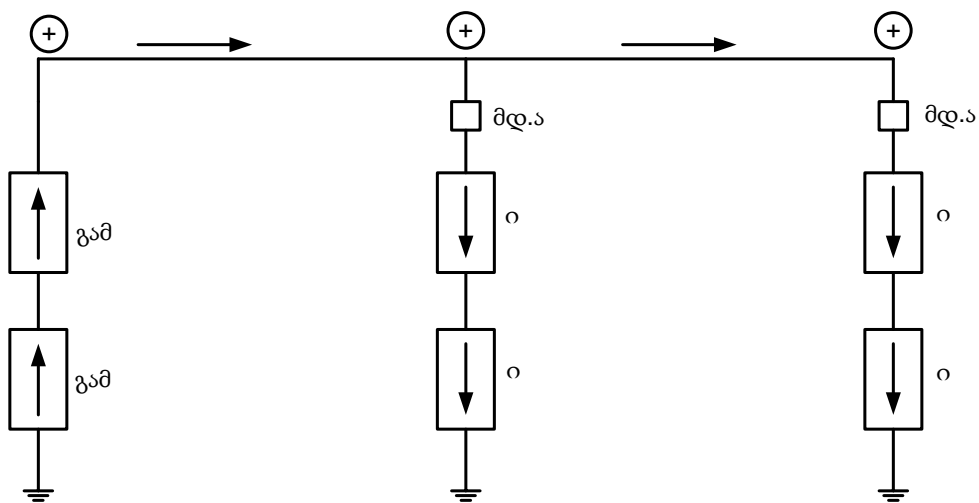
1-8 მდგ შუალედური ქვესადგურებით

მდგ-ის სქემაში შუალედური ქვესადგურები შეიძლება ჩართული იყოს მიმდევრობით ან პარალელურად.

ნახ. 5-ზე ნაჩვენებია შუალედური ქვესადგურების მიმდევრობითი ჩართვა, ხოლო ნახ. 6-ზე პარალელური ჩართვა. შუალედური ქვესადგური შეიძლება მუშაობდეს გამართვის ან ინვერსირების რეჟიმში. პირველ შემთხვევაში ხაზში შედის დამატებითი ენერგია, ხოლო მეორე შემთხვევაში ხდება სიმძლავრის ართმევა მუდმივი დენის ხაზიდან ადგილობრივ სისტემაში. მიმდევრობითი ჩართვის უარყოფითი მხარეა ქვესადგურების მუშაობის ერთმანეთზე დამოკიდებულება.



ნახ. 5. შუალედური ქვესადგურების მიმდევრობითი ჩართვა.
 გამ- გამმართველი, ო- ინვერტორი, 1- მშუნტავი ვენტილი, 2- მშუნტავი აპარტი



ნახ. 6. შუალედური ქვესადგურების პარალელური ჩართვა.
 მდ.ა- მუდმივი დენის ამომრთველი, გამ - გამმართველი, ო- ინვერტორი

პარალელური ჩართვისას სქემა უფრო მოქნილია. იგი საშუალებას იძლევა უფრო მარტივად ვარეგულიროთ სიმძლავრის ნაკადი შუალედურ პუნქტებში.

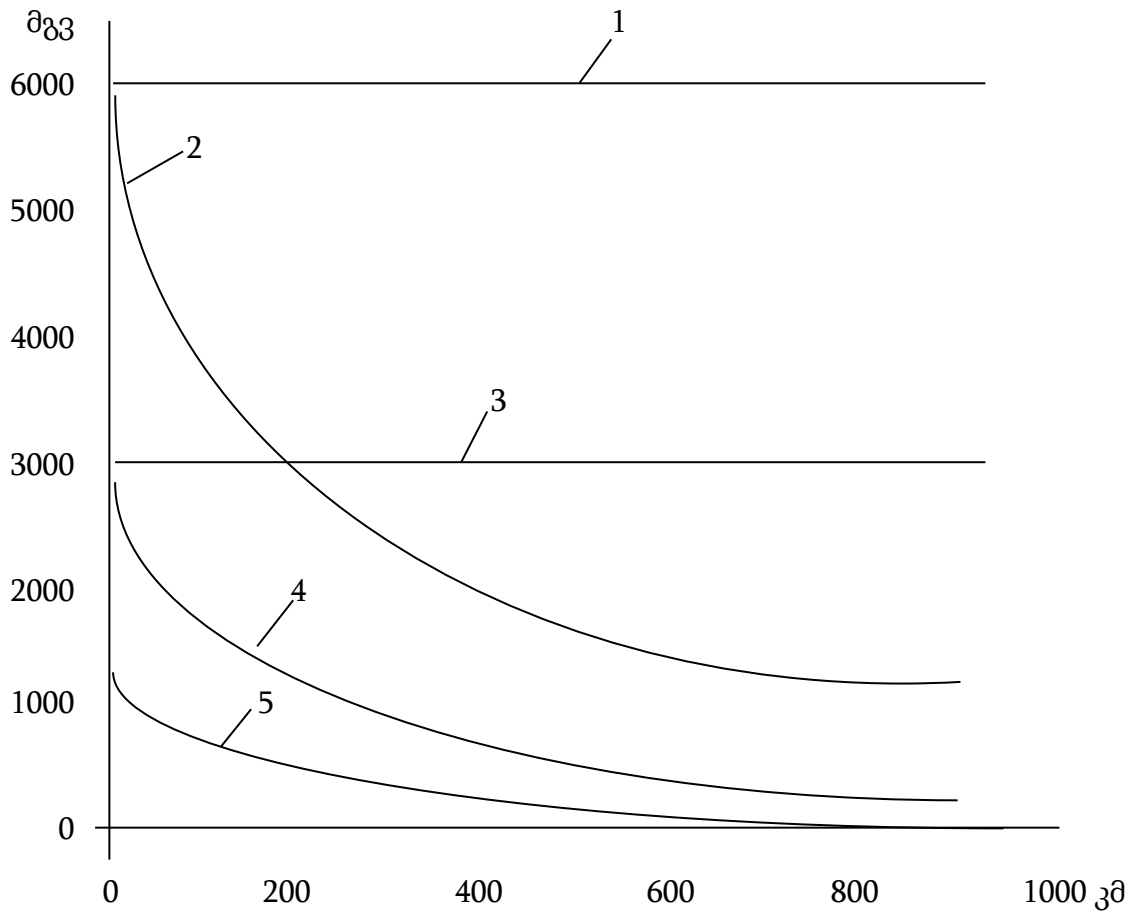
1-9 მდგ-ისა და ცვლადი დენის გადაცემის შედარება.

მდგ-ის უპირატესობა ცვლადი დენის გადაცემასთან შედარებით ეხება ძირითადად ხაზის ნაწილს. შევადაროთ ერთმანეთს მუდმივი დენისა და ცვლადი დენის საკაბელო ხაზები. კაბელის იზოლაციის მუშაობის რეჟიმი მუდმივი დენის შემთხვევაში უფრო მსუბუქია ცვლადი დენის შემთხვევასთან შედარებით. პირველ შემთხვევაში ნაკლებია სიმძლავრის დანაკარგი. ცვლადი დენის კაბელისათვის ქაღალდი-ზეთის იზოლაციის შემთხვევაში ელექტრული ველის დასაშვები დამაბულობა შეადგენს 5-6 კვ/მმ, ხოლო მუდმივი დენის კაბელისათვის 30 – 40 კვ /მმ. ამიტომ ცხადია ცვლადი დენის კაბელი 35 კვ ძაბვაზე შეიძლება გამოვიყენოთ მუდმივი დენის საკაბელო ხაზში ძაბვით 200 კვ. შესაბამისად ცვლადი დენის საკაბრლო ხაზის გადაყვანა მუდმივ ძაბვაზე ზრდის ხაზის გამტარუნარიანობას რამდენიმეჯერ. ერთნაირი გადასაცემი სიმძლავრეების შემთხვევაში მუდმივი დენის საკაბელო ხაზი უფრო იაფია. ცვლადი დენის საკაბელო ხაზთან შედარებით.

მუდმივი დენის საკაბელო ხაზის ნაკლები ღირებულების გამო ხელსაყრელი ხდება ენერჯის გადაცემა ცვლადი დენის საკაბელო ხაზის ნაცვლად მდგ საკაბელო ხაზით უკვე 30- 40 კმ სიგემის ხაზის შემთხვევაშიც. საკაბელო ხაზების გამოყენება ხელსაყრელია იქ სადაც ძნელია საჰაერო ხაზების მშენებლობა: წყლის დიდი სივრცეების გადაკვეთისას (ზღვები, სრუტეები), მთაგორიანი რელიეფი, დიდ ქალაქებში სიმძლავრის ღრმად შეყვანის შემთხვევაში. მუდმივი დენის გამოყენება საჰაერო ხაზებს ანიჭებს შემდეგ უპირატესობებს: მუდმივი დენის გადამცემი ხაზის გამტარუნარიანობა არ არის დამოკიდებული ხაზის სიგრძეზე. ცვლადი დენის შემთხვევაში ხაზის გამტარუნარიანობა მცირდება

ხაზის სიგრძის გაზრდასთან ერთად. ცვლადი დენით დიდი სიმძლავრეების გადაცემისას შორეულ გადაცემებში იყენებენ ძვირადღირებულ გრძივი კომპენსაციის კონდენსატორებს მუდმივი დენის გადამცემ ხაზებში შიგა (კომუტაციური) გადამეტაბვების ჯერადობა დაბალია და მათი შეზღუდვა უფრო იოლია. საჰაერო შუალედების გამრღვევი ძაბვები $\sqrt{2}$ - ჯერ მაღალია ვიდრე ცვლადი ძაბვის შემთხვევაში (მოქმედ მნიშვნელობასთან შეფარდებით), ვინაიდან ცვლადი ძაბვის შემთხვევაში საჰაერო შუალედის გარღვევა ხდება სინუსოიდის ამპლიტუდური მნიშვნელობისას. ამრიგად მუდმივი ძაბვის შემთხვევაში შეიძლება გამოვიყენოთ ძაბვის უფრო მაღალი დონეები (იზოლაციის იგივე დონის შემთხვევაში). შედეგად მუდმივი დენისა ხაზის მშენებლობის ღირებულება და ენერჯის დანაკარგები მასში უფრო დაბალია ვიდრე ასეთივე ცვლადი დენის ხაზისათვის. მუდმივი დენის შემთხვევაში სამი სადენის ნაცვლად გამოიყენება ორი სადენი. საყრდენების კონსტრუქცია უფრო მარტივია და საჭიროა იზოლატორების გირლანდების ნაკლები რაოდენობა. მდგ-ის უარყოფითი მხარეა გარდამქმნელი ქვესადგურების შედარებით მაღალი ფასი ცვლად დენის სატრანსფორმატორო ქვესადგურებთან შედარებით.

მდგ ცვლადი დენის გადაცემასთან შედარებით ხელსაყრელია ხაზის გარკვეული კრიტიკული სიგრძის შემდეგ. ხაზის გარკვეული კრიტიკული სიგრძე კონკრეტული პირობების გათვალისწინებით 600-1000 კმ-ის ფარგლებშია. მდგ საჰაერო ხაზებით გამოიყენება ენერჯის გადასაცემად შორეულ მანძილებზე. ნახ. 7 - ზე ნაჩვენებია ცვლადი და მუდმივი დენის გადამცემი ხაზების გადასაცემი სიმძლავრეების დამოკიდებულება ხაზის სიგრძეზე სხვადასხვა ძაბვების შემთხვევაში.



ნახ. 7. ცვლადი და მუდმივი დენის ხაზების შედარება

- 1) მუდმივი დენი, ± 800 კვ;
- 2) ცვლადი დენი, 765 კვ;
- 3) მუდმივი დენი, ± 500 კვ;
- 4) ცვლადი დენი, 500 კვ;
- 5) ცვლადი დენი, 345 კვ.

1.10 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 მიწისქვეშა 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.

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:

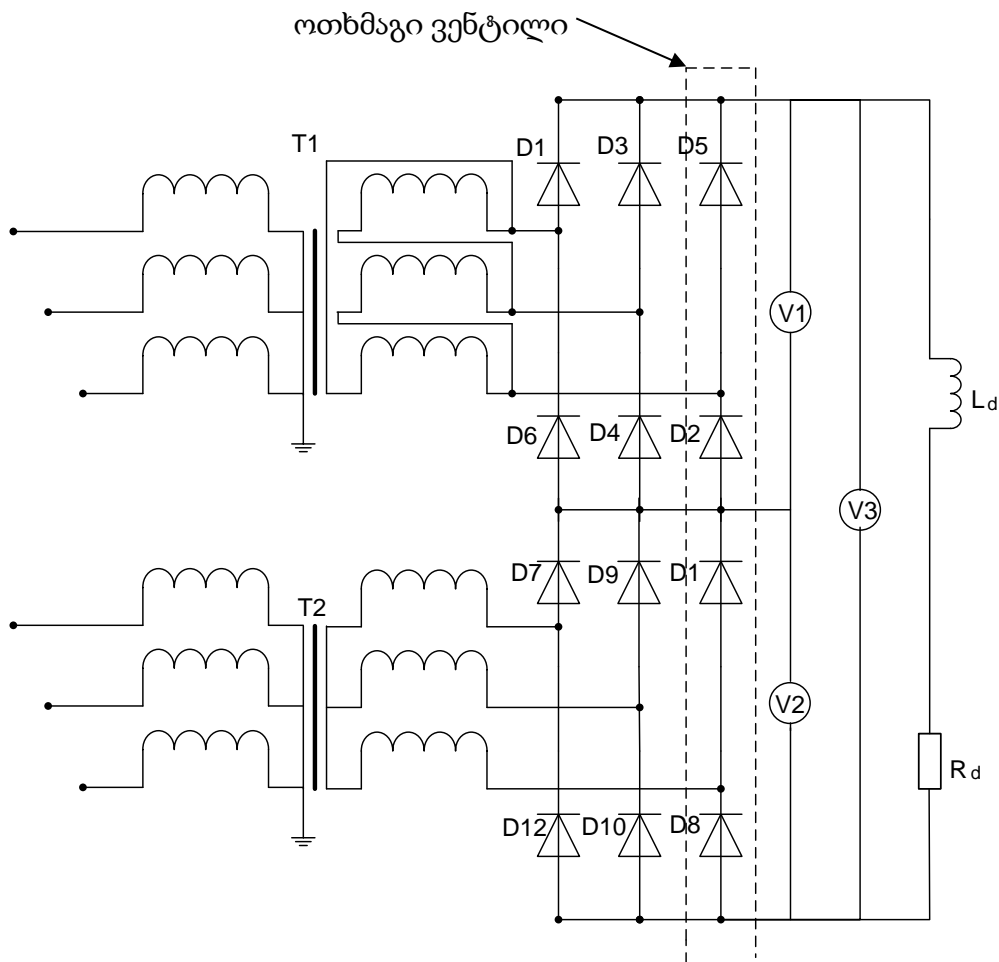
- ცხელ რეზერვში მონაწილეობის მიღება;
- კრიტიკული მდგომარეობის ან გაუთვალისწინებელი შემთხვევის დროს სიმძლავრის მიმოცვლა სისტემებს შორის;
- არსებული გენერაციის უკეთესი ეფექტური გამოყენება ორივე სისტემაში;
- გადადინების სწრაფი რეგულირების საშუალება ერთ ერთი სისტემის სიხშირით ან სიხშირის წარმოებულთ;
- და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

2.2 12-პულსიანი ვენტილური ჯგუფი და შესაბამისი ჰარმონიკები

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ 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 ძაბვები, 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 ძაბვის წრედში მე-5 და მე-7 რიგის დენის ჰარმონიკების და მუდმივი ძაბვის წრედში მე-6 რიგის ძაბვის ჰარმონიკის ჩახშობას. ეს საბოლოო ჯამში აისახება ჰარმონიკული ფილტრების მნიშვნელოვან ეკონომიაში.

ნახ. 8-ზე ნაჩვენებია კონტურით ვენტილთა ჯგუფის გარშემო, რომელსაც აქვს სვეტის ფორმა და შეიცავს ვერტიკალურად ჩამწკრივებულ ოთხ ვენტილს. ასეთ სვეტებს “ოთხმაგი ვენტილს” უწოდებენ და აწყობენ ერთ ვენტილურ სტრუქტურად ოთხი ვენტილის მიმდევრობით ჩალაგებით.



ნახ. 8. ოთხმაგი ვენტილის სტრუქტურა

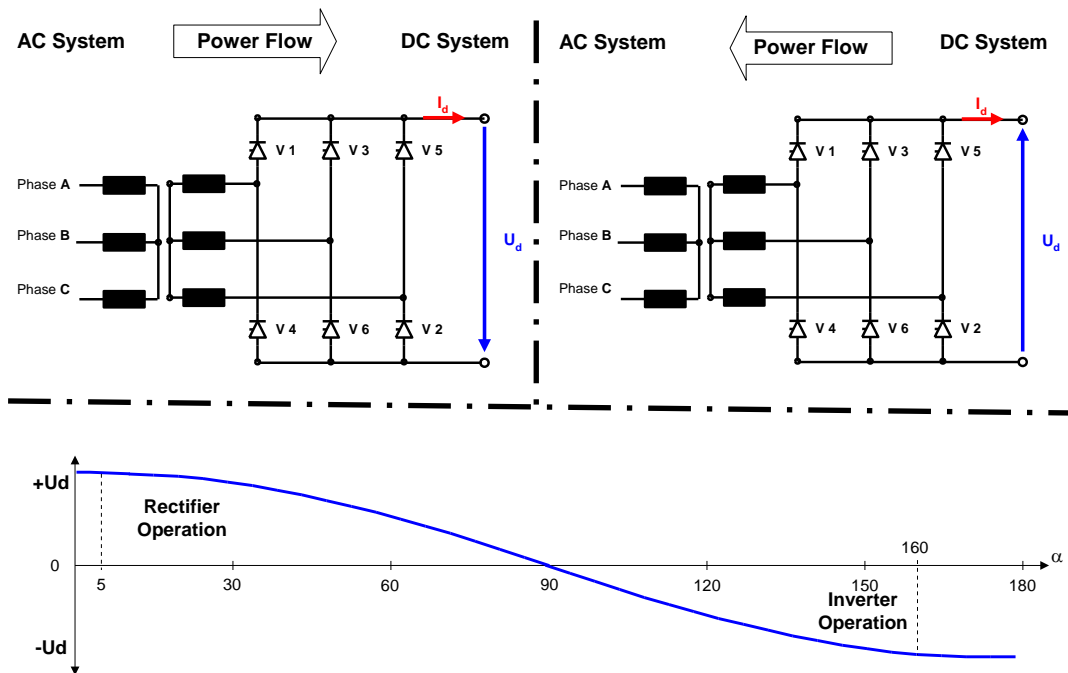
თანამედროვე ტირისტორების დასაშვები უკუ ძაბვა რამდენიმე კილოვოლტის ფარგლებშია, ამიტომ 400 კვ ძაბვის ოთხმაგი ვენტილი შესაძლოა შეიცავდეს ათეულობით მიმდევრობით ჩართულ ტირისტორს, მიმდევრობითი ჯგუფების, ან ტირისტორული მოდულების სახით. ოთხმაგი ვენტილი მაღალ ძაბვაზე ფიზიკურად საკმაოდ მაღალი გამოდის და ხშირად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

2.3 კონვერტორის მოქმედების პრინციპი

6-პულსიანი კონვერტორული ბოგა 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 გასაღები. ისინი იხსნიან მართვის იმპულსის მოსვლისას და იკეტებიან მაშინ, როდესაც დენი მათში უტოლდება ნულს. ამიტომ ასეთ კონვერტორებს უწოდებენ ქსელით კომუტირებადს, რადგან კომუტაციას განსაზღვრავს ქსელის ძაბვა.

ქსელით კომუტირებად HVDC სისტემებში სიმძლავრის ნაკადის რევერსირება შეუძლებელია განხორციელდეს მუდმივი დენის მიმართულების შეცვლით. ვენტილებს დენის გატარება შეუძლია 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 ისე ინვერტირების რეჟიმში მიიღწევა ტირისტორების მართვის კონტროლით.

- რეალური მდჩ-ის სისტემაში, მდ-ში ძაბვა იცვლება კონვერტორის ბოგას მეშვეობით.
- გამმართველში ცდ-ის სიმძლავრის ნაკადი მიმართულია მდ-ის სისტემისკენ.
- სიმძლავრის ნაკადი იცვლება მდ-ის სისტემიდან ცდ-ის სისტემის მიმართულებით, მდ-ში ძაბვის მიმართულების ცვლილებით. მდ-ში დენი არ იცვლის მიმართულებას.
- იდეალური კონვერტორის მუშაობის სპექტრი თეორიაში არის 0° -დან 180° . რეალური კონვერტორის მუშაობის სპექტრი მიახლოებით არის 5° -დან 160° -მდე.
- 90° -ზე მუშაობისას კონვერტორის ძაბვა მდ-ში არის 0.

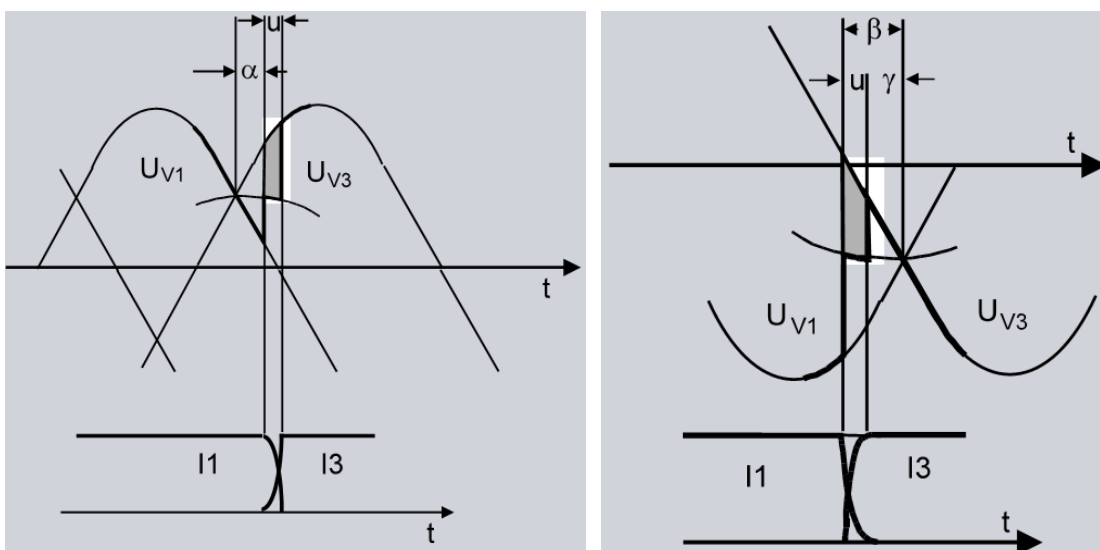


ნახ. 9. 6 - კულსიანი ბოგა გამართვისა და ინვერტირების რეჟიმი

2.4 კონვერტორის ზოგას კუთხეები

ნახაზი 10-ზე ნაჩვენებია რამდენიმე ელექტრული კუთხე, რომლებიც განსაზღვრავენ კონვერტორული ხიდების მუშაობას. ეს კუთხეები იზომება ვენტილების მკვებავ სამფაზა ძაბვებზე. ისინი ეკუთვნის გამმართველსა 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 იმპულსებით. თუ ეს კუთხე ნაკლებია 90° -ზე, მაშინ კონვერტორული ხიდი არის გამმართველი, ხოლო თუ 90° -ზე, მაშინ იგი წარმოადგენს ინვერტორს.



ა) კომუტაცია გამმართველში

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + u) = 2dx$$

ბ) კომუტაცია ინვერტორში

$$\cos\gamma - \cos\beta = 2dx$$

ნახ. 10. 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:

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

გადაფარვის კუთხე α . კონვერტორის ორ ვენტილურ მხარს შორის კომუტაციის ხანგძლივობა 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 α - ზე და განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

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

2.5 მუდმივი დენის ჩანართი მბრუნავ მაგნიტურ ველიანი ზეგამტარაი ტრანსფორმატორებით

მუდმივი დენის ჩანართი აგებული მბრუნავ მაგნიტურ ველიანი ტრანსფორმატორების გამოყენებით ნაჩვენებია ნახაზი 11-ზე ტრანსფორმატორების გრაგნილები დამზადებულია ზეგამტარი მასალისაგან, გრაგნილების სექციები მიერთებულია ნახევრადგამტარიან გადამრთველებთან და ქმნიან მართვად კომუტატორს. ასეთი ზეგამტარი ტრანსფორმატორები კომუტატორთან ერთად შეიძლება განვიხილოთ კომუტატორიანი ელექტრული მანქანის კეპო შემთხვევად, რომლის როტორი არის დამუხრუჯებული. ჩანართის გამმართველი და ინვერტორული ნაწილები ერთმანეთთან დაკავშირებულია რეაქტორის საშუალებით.

ჩანართში ელექტრომაგნიტური პროცესები შესწავლილია ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით სიდიდეთა საშუალო მნიშვნელობებისთვის. მიღებული კომპლექსური განტოლებების ამოხსნით ვპოულობთ სიდიდეთა რეზულტატურ (მაჯამებელ) ვექტორებს, მათი საშუალებით განისაზღვრება სქემის ელემენტებში დენების მნიშვნელობები, აღნიშნული ტრანსფორმატორების დამზადება მიზანშეწონილია ამორფული

ელექტროტექნიკური ფოლადის გამოყენებით, რომლებშიც შემცირებულია მაგნიტური დანაკარგები.

$$\omega_0 = 0, \quad \omega_{u1}^B = 0, \quad \omega_{u2}^B = \omega_1^B,$$

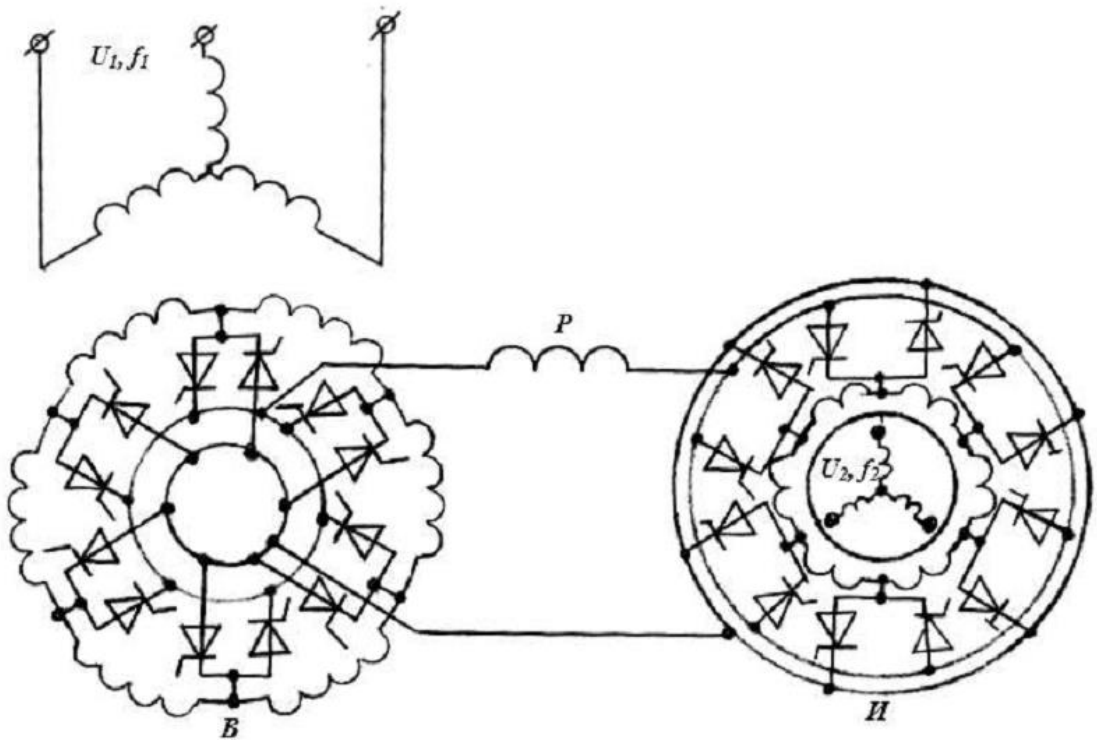
$$\omega^B = \omega_{u2} - \omega_{u1} = \omega_1^B,$$

$$\omega_0^B - \omega^B = 0 - \omega_1^B = -\omega_1^B,$$

$$\theta_0^B - \theta^B = 0 - \omega_1^B t = -\omega_1^B t,$$

$$m_l^B = 3, \quad m_n^B = 1, \quad \vec{A}_1^B = 0, \quad \vec{A}_2^B = e^{j2a_2^B}.$$

$$\vec{U}_1^B = r_1^B \vec{I}_1^B + \frac{d\vec{\Psi}_1^B}{dt}.$$



ნახ. 11. მუდმივი დენის ჩანართი მზრუნავ მაგნიტურველიანი ტრანსფორმატორებით: B-გამმართველი; H-ინვერტორი; P-რეაქტორი

2.6 მოკლე შერთვის სიმძლავრის ინდექსი

ელექტრული ქსელის სიძლიერე HVDC სისტემის კვანძში შეიძლება განისაზღვროს მოკლე შერთვის კოეფიციენტით (ინდექსით), 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 shorte 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: $ESCR < 2.0$

ESCR-ის საანგარიშო ფორმულას აქვს ასეთი სახე:

$$ESCR = \frac{S_{3phsc} - Q_{filters}}{P_{dc}}$$

რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი ცვლადი ძაბვის სისტემასა და HVDC სისტემას შორის შეიძლება მიღწეულ იქნეს კომპუტირებადი რეაქტიული ელემენტებით. დაბალი და ძალიან დაბალი ESCR დაბალი და ძალიან დაბალი ESCR კოეფიციენტის მქონე სისტემებში HVDC სისტემაში მომხდარმა სიმძლავრის ცვლილებამ შეიძლება გამოიწვიოს ძაბვის რყევები 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 კომპესატორების დაყენება.

2.7 IGBT ტიპის ტრანზისტორებიანი გარდამქმნელების გამოყენება მუდმივი დენის ჩანართის სქემებში

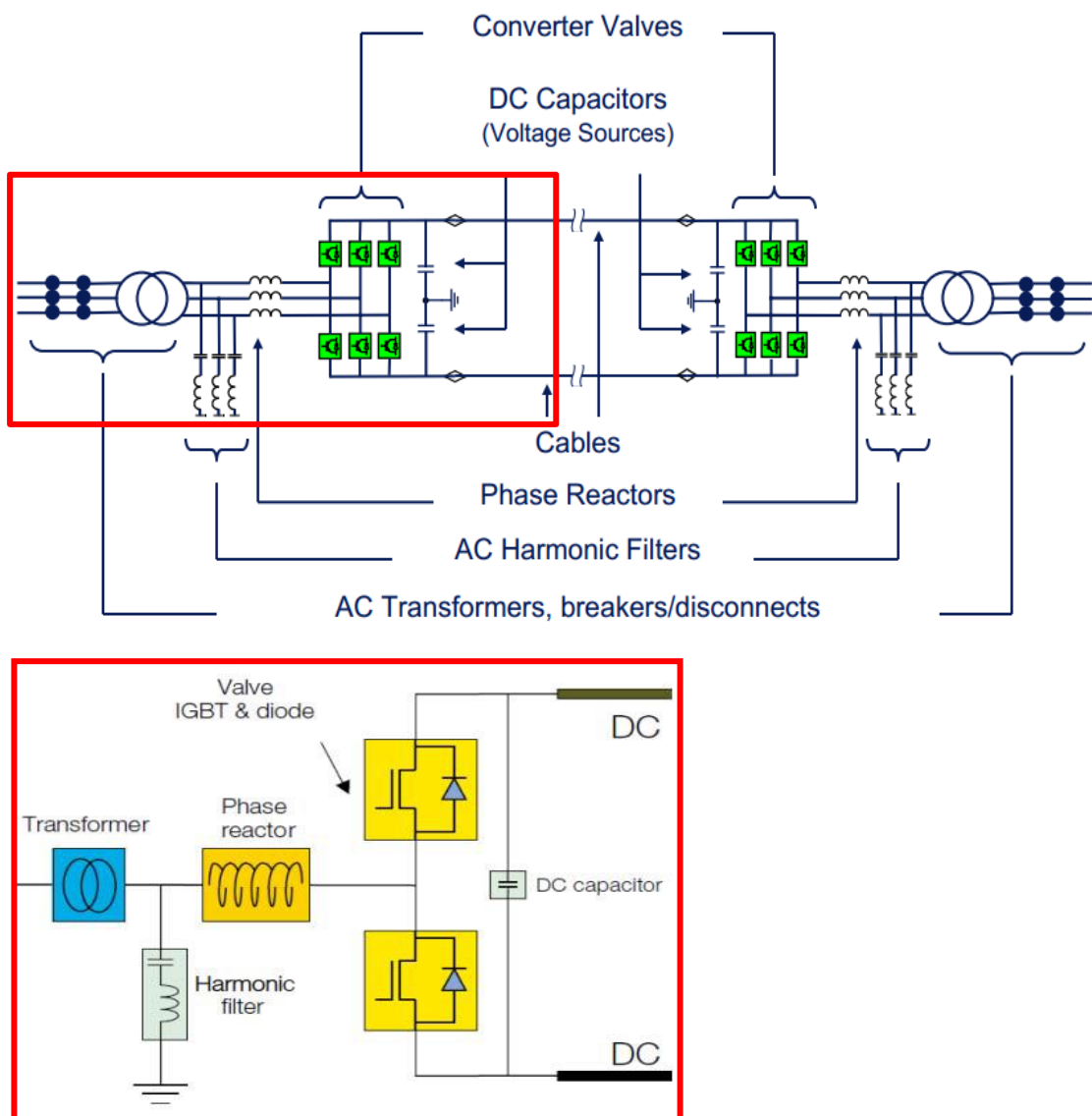
HVDC სისტემაში შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც მართვადი ტირისტორები (line-commutated converters) LCC ასევე (insulated-gate bipolar transistors) IGBT ტრანზისტორებზე აგებული გარდამქმნელები. ტირისტორები შეიძლება ჩაირთოს (გამოირთოს) მართვის იმპულსების საშუალებით ან გარე ძაბვის მოქმედებით, ცვლადი დენის სისტემაში სადაც ჩართულია ასეთი ტიპის გარდამქმნელები LCC HVDC საყიროა სინქრონული კომპენსატორების არსებობა, რომლებიც უზრუნველყოფენ მაკომპენსირებელ ძაბვას. LCC HVDC არ შეუძლია მიაწოდოს კვება პასიურ დატვირთვას.

სხვა ტიპის გარდამქმნელ მოწყობილობებში შეიძლება გამოყენებულ იქნას ბიპოლარული ტრანზისტორები იზოლირებული საკეტიტ (IGBT), რომელსაც შეუძლია წრედის ჩართვა და გამორთვა.

IGBT გამოყენებით შეიძლება შევქმნათ თვით კომპუტირებადი გარდამქმნელები. ასეთ გარდამქმნელებში მუდმივი ძაბვა იფილტრება დიდი ტევადობით და შეიძლება ჩავთვალოთ მუდმივად. ასეთ გარდამქმნელებს IGBT ტრანზისტორებით უწოდებენ მუდმივი დენის წყაროს (voltage-source converters) VSC ტიპისას.

IGBT ტრანზისტორების შექმნამ მაღალ ძაბვებზე დააჩქარა ძაბვის გარდამქმნელების შემუშავება HVDC სისტემაში გამოსაყენებლად. ამ ტიპის გარდამქმნელების მუშაობა დამყარებულია განედურ-იმპულსურ მოდულაციის პრინციპზე (PWM). PWM (pulse-width modulation) საშუალებით შეგვიძლია მივიღოთ ნებისმიერი ფაზური კუთხე და

ამპლიტუდა, ეს იძლევა საშუალებას ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად ვარეგულიროთ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე. IGBT ტრანზისტორების მოდულებს შეუძლია გაატარონ 2.4 kA დენი, უკუ ძაბვით 6.5 kV. უნდა აღინიშნოს, რომ ერთი ეკვივალენტური ვენტილი შეიცავს 20 მილიარდ უჯრედს. ნახაზი 12-ზე ნაჩვენებია IGBT ტრანზისტორების შემცველი გარდამქმნელი სქემა.

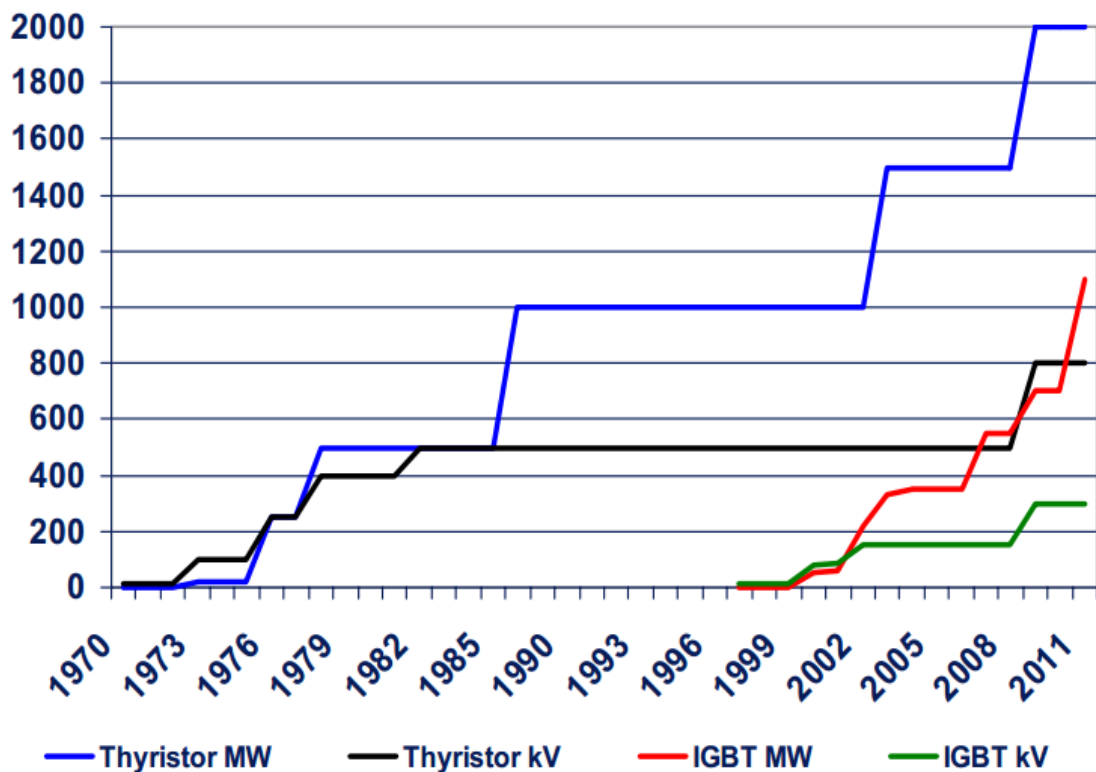


ნახ. 12. IGBT ტრანზისტორების შემცველი გარდამქმნელების სქემა

HVDC ტიპის კონვერტორებისგან განსხვავებით VSC გარდამქმნელებს შეუძლიათ შეინარჩუნონ მუდმივი ძაბვის გარკვეული პოლარობა. სიმძლავრის მიმართულების შეცვლა მიიღწევა დენის მიმართულების შეცვლით, ეს მნიშვნელოვნათ ამარტივებს გარდამქმნელების ჩართვას კვების წყაროსთან მრავალ პოლუსიან HVDC სისტემაში. VSC სისტემის საშუალებით შეიძლება ვაკონტროლოთ სიმძლავრე და ძაბვა, ეს გვაძლევს სერიოზულ უპირატესობას VSC ტექნოლოგიის გამოყენებისას მოკლე შერთვის დროს. კლასიკური ტექნოლოგიის გამოყენების შემთხვევაში რეაქტიული სიმძლავრის მართვა ხორციელდება კონდენსატორთა ბატარეის გამოყენებით (გადართვების შენელებული სქემა) ამის გამო სქემის მოქნილობა დაბალია. სისტემის გამტარუნარიანობა შემდეგია:

HVDC LLC 6400 MW და $U_{dc} = \pm 800kV$

HVDC VSC 1100 MW და $U_{dc} = \pm 300kV$



ნახ. 13. HVDC კონვერტორის განვითარება

	LCC HVDC	VSC HVDC
ერთეულ კონვერტორზე ნომინალური სიმძლავრე	150-1500MW	50-1100MW
ნახევრადგამტარების ტექნოლოგია	ტირისტორი	IGBT
მუდმივი ძაბვა	±800KV	±300kv
კონვენტორის ტექნოლოგია	ხაზით კომუტირებადი	თვით კომუტაცია
რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლი	არა, მხოლოდ გადართვით რეგულირება	დიახ, უწყვეტი მართვა
ძაბვის კონტროლი	შეზღუდული	ფართო
დაზიანების გატარება	არა	დიახ
სიმძლავრის აღება 0-დან	არა	დიახ
სიმძლავრის რევერსი შწყვეტის გარეშე	არა	დიახ
მინიმალური ESCR	2	არ მოითხოვს
მუდმივ დენში მინიმალური სიმძლავრის ნაკადი	5-10% ნომინალური სიმძლავრე	არ მოითხოვს მინიმუმს
სტანდარტული დანაკარგები კონვერტორში	0,80%	2%
ექსპლატაციის გამოცდილება	>20წელი	8 წელი
მუშაობის პერიოდი	3(2) წელი	1 წელი

ცხრილი. 1. LCC HVDC და VSC HVDC სისტემების შედარება

თავი III

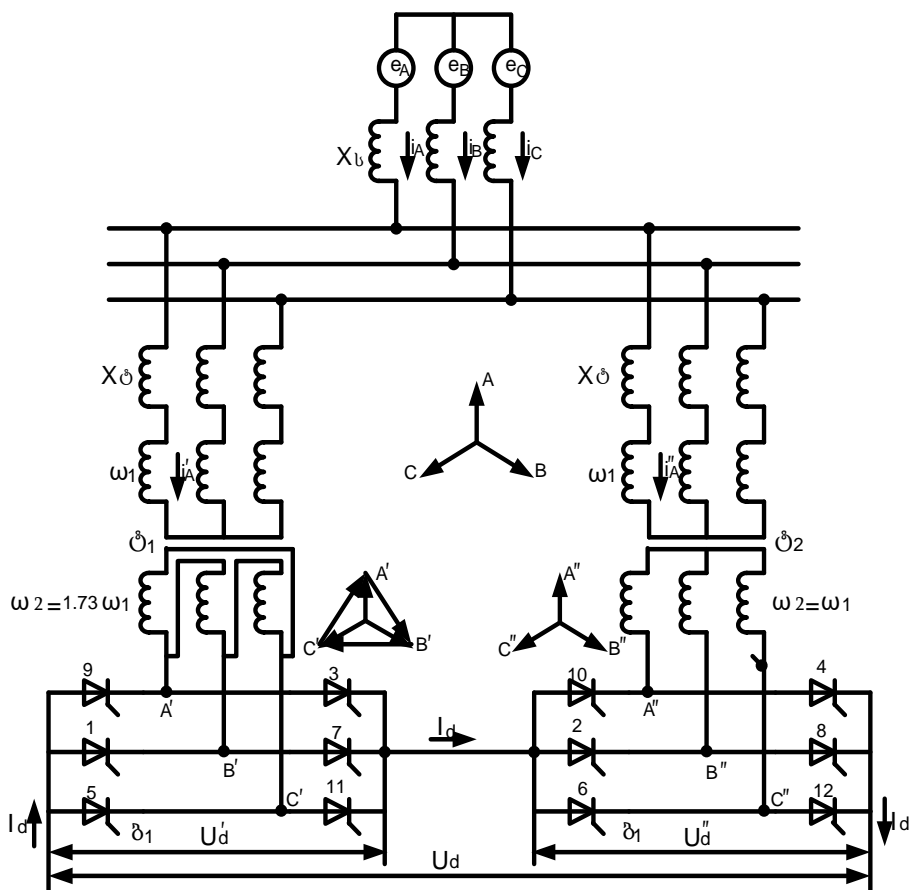
ორბოგიანი გარდამქმნელის მუშაობა გამართვისა და ინვერსირების რეჟიმში. მთავარი ტრანსფორმატორების დენები და ძაბვები. ცვლადი დენი და სიმძლავრე გარდამქმნელის შესასვლელზე

მუდმივი დენის ხაზზე საკმაოდ მაღალი აბვის მისაღებად გამოიყენება გარდამქმნელ ქვესადგურებზე ერთბოგიანი გარდამქმნელების მიმდევრობითი შეერთება. ეს საშუალებას იძლევა ერთდროულად განვახორციელოთ 12 - ფაზა გარდაქმნა. მიმდევრობით ჩართულ ბოგებზე მიიყვანება სამფაზა ძაბვების სისტემა. რომლებიც ერთმანეთის მიმართ დაძრულია 30° - ით, ეს მარტივად მიიღება ტრანსფორმატორების გრაგნილების ვარსკვლავად და სამკუთხედად შეერთებით გამართული ძაბვის ხარისხი აღნიშნულ შემთხვევაში მაღალია - გამოსავალი ძაბვა მეტად გასწორებულია. ორ ბოგიანი გამართველის გამართულ ძაბვას ცვლადი დენის პერიოდის განმავლობაში გააჩნია 12 მცირე სიდიდის ძაბვის პულსაცია და ამის შესაბამისად შეიცავს 12 - ის ჯერად მაღალი რიგის ჰარმონიკებს. თითოეული ბოგას გამართულ ძაბვაში არის $n=6, 18...(2k+1)6$ რიგის ჰარმონიკები, რომლებიც თითოეულ ბოგაში ურთიერთ საწინააღმდეგო ფაზებშია და ორივე ბოგას ჯამურ ძაბვაში არ არსებობენ. გარდა აღნიშნულისა 12 ფაზა სქემის შემთხვევაში ქსელიდან მოხმარებულ (გამმართველი) ან ქსელში გაცემულ დენში გვაქვს ნაკლები რაოდენობის მაღალი რიგის ჰარმონიკები 6 - ფაზა გარდამქმნელთან შედარებით.

აღსანიშნავია, რომ აღნიშნულ სქემაში ბოგები ერთმანეთზე მოქმედებენ. განვიხილოთ ამ სქემის მუშაობის ძირითადი რეჟიმები.

3-1. ორბოგიანი გარდამქმნელის ეკვივალენტური სქემა

ორბოგიანი გარდამქმნელის მუშაობის ანალიზი შეიძლება ჩავატაროთ მისი ეკვივალენტური სქემის მიხედვით (ნახ. 14).



ნახ. 14. გარდამქმნელის საანგარიშო სქემა

საანგარიშო სქემაზე ტრანსფორმატორის მოკლე შერთვის წინაღობა გამოტანილია პირველად მხარეზე. მიღებულია, რომ ტრანსფორმატორის გრაგნილებით „ვარსკვლავი - ვარსკვლავი“ აქვს ერთის ტოლი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი. ($W_2=W_1$). ორივე ტრანსფორმატორების ხაზური ძაბვები ტოლია, ამისათვის საჭიროა ($W_2 = \sqrt{3}W_1$). ვენტის ნომერი უჩვენებს მის რიგითობას გაღების (ანთების) მიხედვით. დამყარებულ რეჟიმში ვენტის იღებიან ცვლადი დენის პერიოდის

1/12 - ის. შემდეგ (30 - გრადუსი), ამ სქემში პროცესების გამეორების ინტერვალის ტოლია 30 - გრადუსის.

ნახ. 14 დან ჩანს რომ კომუტაციის კონტურში შედის წინააღმდეგობები X_{δ} და X_{ν} ერთ ფაზაზე კომუტაციის კონტურის წინააღმდეგობა:

$$X_{\delta} = X_{\delta} + X_{\nu} \quad (3-1)$$

ზოგების ურთიერთ გავლენა განპირობებულია საერთო X_{ν} წინააღმდეგობით:

$$A = \frac{X_{\nu}}{X_{\delta} + X_{\nu}} = \frac{X_{\nu}}{X_{\nu}} \quad (3-2)$$

ეკვივალენტური სქემიდან გამომდინარე ტრანსფორმატორების გრაგნილების და ქსელის დენები გამოისხბა ვენტილების საშუალებით შემდეგ ნაირად.

$$\frac{i_A}{\sqrt{3}} - \frac{i_B}{\sqrt{3}} = i_{\alpha 3} - i_{\alpha 9}; \quad \frac{i'_B}{\sqrt{3}} - \frac{i'_C}{\sqrt{3}} = i_{\alpha 7} - i_{\alpha 1}; \quad (3-3)$$

გარდა ამისა გვაქვს თანაფარდობა $i'_A + i'_B + i'_C = 0$ თუ გამოვიყენებთ ტოლობას:

$$i_{\alpha 9} + i_{\alpha 1} + i_{\alpha 5} = i_{\alpha 3} + i_{\alpha 7} + i_{\alpha 11},$$

მივიღებთ:

$$i'_A = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 3} - i_{\alpha 9} - i_{\alpha 11} + i_{\alpha 5});$$

$$i'_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 7} - i_{\alpha 1} - i_{\alpha 3} + i_{\alpha 9}); \quad (3-4)$$

$$i'_C = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 11} - i_{\alpha 5} - i_{\alpha 7} + i_{\alpha 1}).$$

მეორე ტრანსფორმატორის გრაგნილებში დენები ვენტილების დენების საშუალებით ასე ჩაიწერება:

$$i_A = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 3} - i_{\alpha 9} - i_{\alpha 11} + i_{\alpha 5}) + i_{\alpha 4} - i_{\alpha 10};$$

$$i_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 7} - i_{\alpha 1} - i_{\alpha 3} + i_{\alpha 9}) + i_{\alpha 8} - i_{\alpha 2}; \quad (3-5)$$

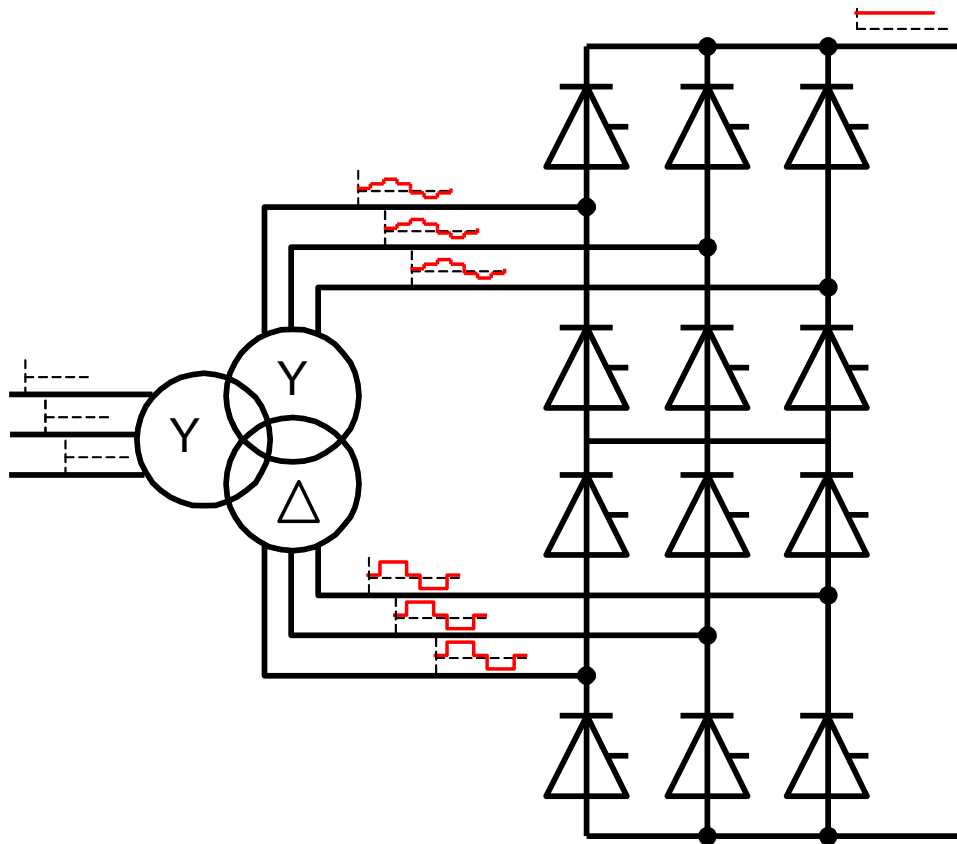
$$i_C = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{\alpha 11} - i_{\alpha 5} - i_{\alpha 7} + i_{\alpha 1}) + i_{\alpha 12} - i_{\alpha 6}.$$

ზემოთ მოყვანილი ფორმულები სამართლიანი გარდამქმნელის მუშაობის ყველა შესაძლო რეჟიმისათვის დროის ნებისმიერ ინტერვალში.

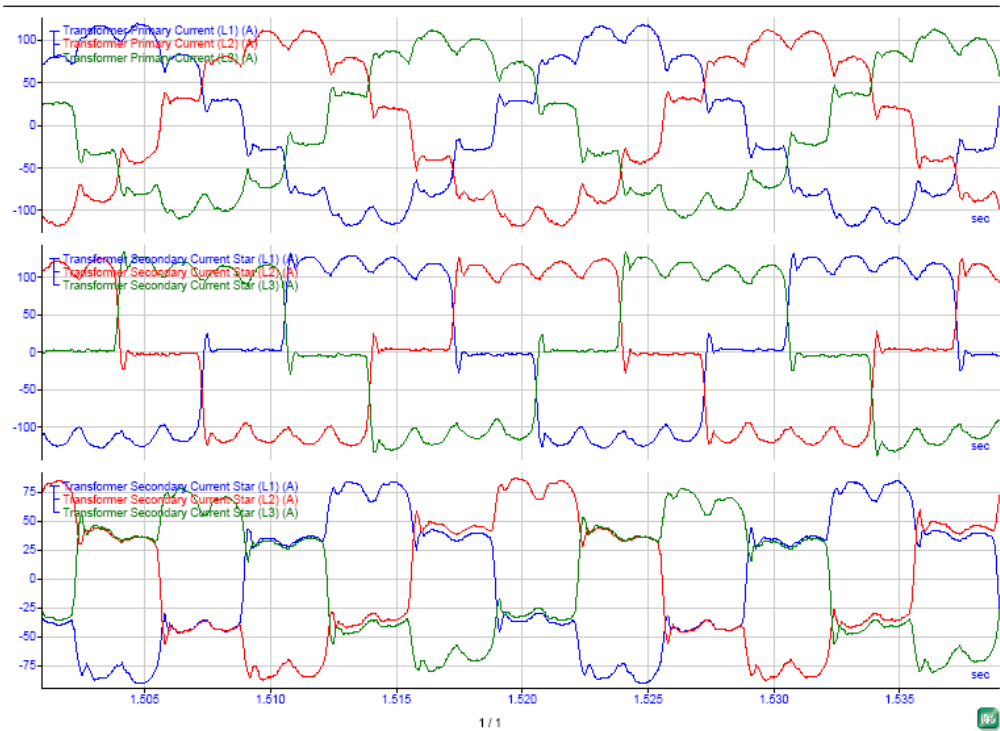
ნახ. 14 - ზე ეკვივალენტური სქემა შედგენილია ორი ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორისთვის. ანალიზის შედეგები შეიძლება გავრცელდეს

სქემაზე ერთი სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორით. ჩვენ შემოვიფარგლებით გარდამქმნელის მუშაობის ძირითადი რეჟიმების ანალიზით. ასეთ რეჟიმებს მიეკუთვნება გამმართველისა და ინვერტორის მუშაობის რეჟიმები ვენტელების რიგრიგობით მუშაობისას. რეჟიმი 4 – 5 და რეჟიმი 5 – 6, გარდა ამისა ქამართველის რეჟიმში 5 ვენტელის ერთ დროული მუშაობა (რეჟიმი 5) და 6 ვენტელის ერთ დროული მუშაობა (რეჟიმი 6).

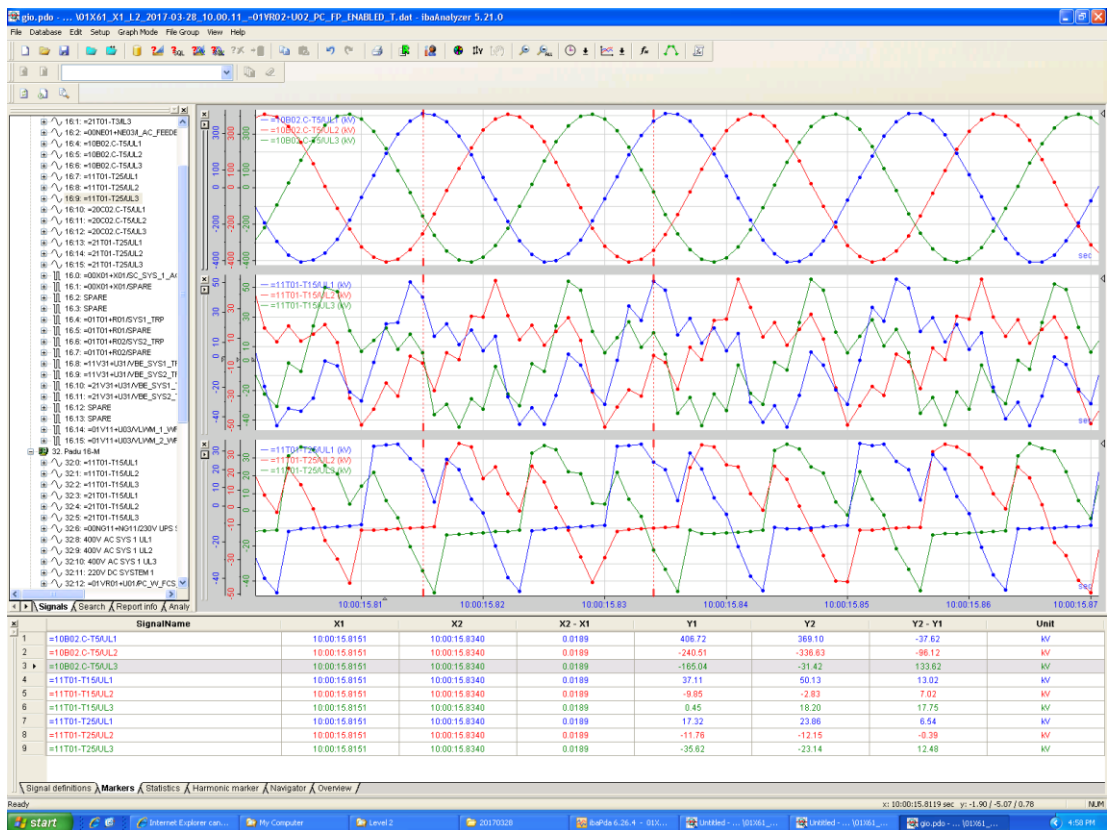
ქვემოთ მოყვანილია 12 - პულსიანი HVDC სისტემით სიმძლავრის გადაცემის პრინციპი ცვლადი და მუდმივი დენი ამსახველი სქემა (ა) და სქემა (ბ) გაკეთებულია ანალიზი კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე. რომელზეც ნათლად არის ასახული ქ/ს ახალციხე 500-ის კონვერტორული ტრანსფორმატორის პირველადი (500კვ) ძაბვები და ტრანსფორმატორის მეორეული ძაბვები.



ნახ. 15. ა) HVDC სისტემით გადაცემის პრინციპი



ნახ. 15. ბ) HVDC სისტემით გადაცემის პირობებში ღენების ოსცილოგრამები



ნახ. 16. კონვერტორული ტრანსფორმატორის ძაბვები

ნახაზი 16 ასახავს რეალურ სურათს სიმძლავრის გადადინების მომენტში, დიაგრამა ასახავს ტრანსფორმატორის მაღალი 500კვ ძაბვის სინუსოიდებს და მეორეული გრაგნილის შედარებით დამახინჯებულ ფორმებს. ასევე მეორეული გრაგნილების ძაბვების დიაგრამაზე დავაკვირვებით შევამჩნევთ, რომ ვარსკვლავად აკრეფილი გრაგნილის ფორმა მეტად დამახინჯებულია ვიდრე სამკუთხედის.

სქემის მიზანია შედარებულ იქნას ძაბვები სინუსოიდურობის კუთხის მიმართულებით კონვერტორული ტრანსფორმატორის პირველად და მეორეულ გრაგნილებს შორის. რადგან ჩვენთვის ცნობილია რომ სამკუთხედში მესამე რიგის ჰარმონიკის ჩახშობა ხდება, ამიტომ მისი შესაბამისი დიაგრამას მეტად გაგლუვებული ფორმა აქვს ვიდრე მეორეული ვარსკვლავად აკრეფილი გრაგნილის დიაგრამას.

3.2. გარდამქმნელის მუშაობა 4 – 5 რეჟიმში

ორბოგიანი გარდამქმნელის მუშაობის ამ საწყის რეჟიმში კომუტაციის კუთხე $\gamma < 30^\circ$ და გამეორების ინტერვალში რომელიც შეადგენს 30° - ს გვაქვს დროის ინტერვალი, როდესაც ორივე ბოგაში ერთდროულად არ ხდება დენის კომუტაცია, ამ შუალედში ხანგრძლივობით $30^\circ - \gamma$ დენს ატარებს 4 ვენტილი, ხოლო დროის სხვა შუალედში კომუტაცია მიმდინარეობს ერთ - ერთ ბოგაში ამ შუალედში ხანგრძლივობით γ დენს ატარებს 5 ვენტილი შედეგად ვღებულობთ ვენტილების მუშაობის შემდეგ მიმდევრობას.

1 – 2 – 3 – 4; 1 – 2 – 3 – 4 – 5; 2 – 3 – 4 – 5; 2 – 3 – 4 – 5 – 6;

3 – 4 – 5 – 6 და ა.შ

როცა ერთ - ერთ ბოგაში ხდება კომუტაცია, მაშინ მეორე ბოგაში კომუტაციას ადგილი არ აქვს.

ერთ - ერთ ბოგაში კომუტაციური პროცესი გავლენას არ ახდენს მეორე ბოგაში მიმდინარე პროცესზე. განვიხილოთ დენის კომუტაცია 2 ვენტილიდან 6 - ზე. ამ კომუტაციურ შუალედში ღია არის ვენტისები 2 – 3 – 4 – 5 – 6; შგვიძლია დავწეროთ.

$$i_{\alpha 3} = i_{\alpha 4} = i_{\alpha 5} = I_d, \quad i_{\alpha 6} = i_k, \quad (3.6)$$

სადაც i_k მაკომპუტირებელი დენია, რომელიც წარმოიშობა 2 და 6 ვენტისებით შექმნილ ორფაზა მოკლედ შექმნილ კონტურში.

მეორე ტრანსფორმატორის ფაზებში დენები:

$$i''_A = I_d, \quad i''_B = -(I_d - i_k), \quad i''_C = -i_k. \quad (3-7)$$

დენები ქსელის ფაზებში ტოლია:

$$i_A = \frac{2}{\sqrt{3}} I_d + I_d, \quad i_B = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_d - (I_d - i_k) \quad (3-8)$$

$$i_C = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_d - i_k.$$

კომუტაციური პროცესისათვის (ფაზები B, B'', C, C'' და ვენტისები 2 და 6 ქმნიან მოკლედ შერთულ კონტურს) გვაქვს განტოლება:

$$X_b \frac{di_B}{dt} + X_{\vartheta} \frac{di''_B}{d\theta} - X_{\vartheta} \frac{di''_C}{d\theta} - X_b \frac{di_C}{d\theta} = e_B - e_C \quad (3-9)$$

ანუ თუ მხედველობაში მივიღებთ i_B , i_B'' , i_C'' და i_C დენების გამოსახულებებს და $I_d = \text{const}$, გვექნება:

$$2(X_{\vartheta} + X_b) \frac{di_k}{d\theta} = e_B - e_C \quad (3-10)$$

4-5 კომუტაციური პროცესი მიმდინარეობს ისევე, როგორც ერთ ბოგა სქემაში 2-3 რეჟიმში კომუტაციური დენი გვაქვს:

$$i_k = \frac{\sqrt{3}E_{2m}}{2X_{\gamma}} (\cos \alpha + \cos \theta);$$

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2X_{\gamma}I_d}{\sqrt{3}E_{2m}} = \cos \alpha - \frac{2}{\sqrt{3}} I_{d*}; \quad (3-11)$$

$$\text{სადაც: } I_{d*} = \frac{E_{2m}}{X_{\gamma}}.$$

ორ ბოგიანი გამმართველის გამორთული ძაბვის მუდმივი შემდგენი 4-5 რეჟიმში ტოლია:

$$U_{d*} = \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma) = 2\cos(\alpha + \frac{\gamma}{2})\cos\frac{\gamma}{2} \quad (3-12)$$

სადაც ძაბვა ფარდობით ერთეულებში არის:

$$u_d = \frac{U_d}{E_d}, \quad E_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{2m}.$$

$$U_{d*} = 2(\cos\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{d*}) \quad (3-13)$$

ეს განტოლება გვაჩვენებს გარე მახასიათებლებს α - ს მნიშვნელობებისათვის.

3-3 ინვერტორის მუშაობა 4-5 რეჟიმში

ინვერტორულ რეჟიმში ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზი შეიძლება ჩავატაროთ 3-2 - პარაგრაფში მოყვანილი მეთოდის ანალოგიურად. ინვერტორის მუშაობისას 4-5 რეჟიმში. გამმართველის რეჟიმში მუშაობის შემთხვევისათვის გამოყენებულ გამოსახულებაში α კუთხე შეიცვლება გამოსახულებით $\alpha = 180^\circ - \beta$;

სადაც: β - ინვერტორის წინსწრების კუთხეა გვაქვს განტოლება:

$$\cos(\beta - \alpha) = \cos\beta + \frac{2}{\sqrt{3}} I_{d*} \quad (3-14)$$

ინვერტორის ჩაქრობის (მრავის) კუთხე $\delta = \beta - \alpha$

ჩაქრობის კუთხის გამოსათვლელი ფორმულები ინვერტორის 4-5 რეჟიმში მუშაობისას მოცემულია ცხრილი 2-ში.

წინსწრების β კუთხის ცვლილების დიაპაზონი	
0 - დან 30° - მდე	$\cos\delta = \cos\beta + \frac{2}{\sqrt{3}} I_d$
30° - დან $30^\circ + \alpha_{5-6}$ - მდე	$\cos(\beta - 30^\circ + \delta) = \cos\beta + \frac{2}{\sqrt{3}} I_d$
$30^\circ + \alpha_{5-6}$ - დან	$\cos(\alpha_{5-6} + \delta) = \cos\beta + \frac{2}{\sqrt{3}} I_d$
$30^\circ + \alpha_{5-6} + \alpha$ - მდე	

ცხრილი. 2. ჩაქრობის δ კუთხის გამოსათვლელი ფორმულები ინვერტორის 4-5 რეჟიმში მუშაობისას

3-4. ტრანსფორმატორის ვარსკვლავად შეერთებული მეორეული გრაგნილის დენი.

ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ვარსკვლავად შეერთებისას მის ფაზებში დენი განისაზღვრება ამ ფაზასთან მიერთებული ვენტილების ანოდური დენებით.

საკომუტაციო რეჟიმში $\theta = \alpha$ და $\theta = \alpha + \gamma$ ინტერვალში გვაქვს:

$$i_2 = i_k = \frac{\sqrt{3}E_{2m}}{2X_Y} (\cos\alpha - \cos\theta);$$

მეორადი დენი ფარდობით ერთეულებში

$$i_{2*} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\cos\alpha - \cos\theta); \quad (3-15)$$

სადაც ბაზისური დენი $i_{ბაზ} = \frac{E_{2m}}{X_Y}$.

დროის მომდევნო შუალედში $\theta = \alpha + \gamma$ დან $\theta = \alpha + 120^\circ$

$i_{2*} = I_d$, გვექნება:

$$i_{2*} = \frac{I_d}{I_{ბაზ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} [\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)]. \quad (3-16)$$

დროის შუალედში $\theta = \alpha + 120^\circ$ -დან $\theta = \alpha + 120^\circ + \gamma$ გვაქვს;

$i_2 = i_\alpha - i_k$. ფარდობით ერთეულებში:

$$i_{2*} = \frac{\sqrt{3}}{2} [\cos(\theta - 120^\circ) - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (3-17)$$

მეორეული დენის მოქმედი მნიშვნელობა:

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \sqrt{1 - \frac{\gamma}{2\pi}} \quad (3-18).$$

3.5 ტრანსფორმატორის სამკუთხედად შეერთებული მეორადი გრაგნილის დენი

ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ვარსკვლავად შეერთებიდან სამკუთხედზე გადასვლისას ვენტილების ანოდური დენების

ფორმა უცვლელია. სამკუთხედად შეერთებისას ხაზური დენების მიხედვით ფაზური დენები განისაზღვრება ასე:

$$i_{2\Delta A} = \frac{1}{3}(i_{2A} - i_{2C}); \quad i_{2\Delta B} = \frac{1}{3}(i_{2B} - i_{2A});$$

$$i_{2\Delta C} = \frac{1}{3}(i_{2C} - i_{2B}).$$

სამკუთხედის ფაზაში დენი, როდესაც $i_{2A} = I_d$

$i_{2B} = -I_d, \quad I_{2C} = 0.$ ტოლია:

$$i_{2\Delta A} = \frac{1}{3}(i_{2A} - i_{2C}) = \frac{1}{3}I_d. \quad (3-19-6)$$

დროის შემდეგ შუალედში $i_{2A} = I_d, \quad I_{2C} = -I_d$ და ამიტომ

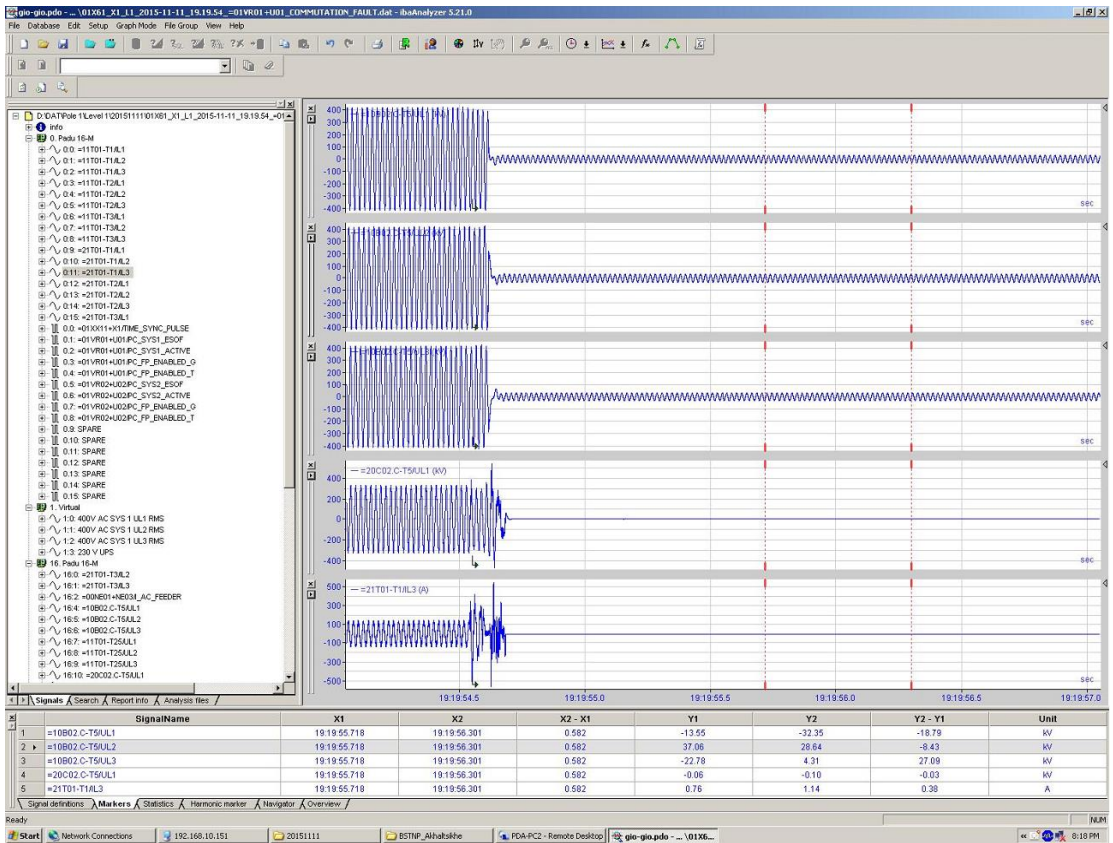
$$i_{2\Delta A} = \frac{1}{3}(I_d + I_d) = \frac{2}{3}I_d. \quad (3-20)$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც ელექტრო სისტემებს შორის კავშირი ცვლადი დენის ხაზით დაკავშირებულია მოკლე შერთის (მ.შ.) დენების მნიშვნელოვნად გაზრდასთან გამმართველები და ინვერტორები მდრ-ის შემთხვევაში, მოკლე შერთვის წერტილში გაზრდილ დენს არ გზავნიან მოსაზღვრე ელექტრო სისტემაში.

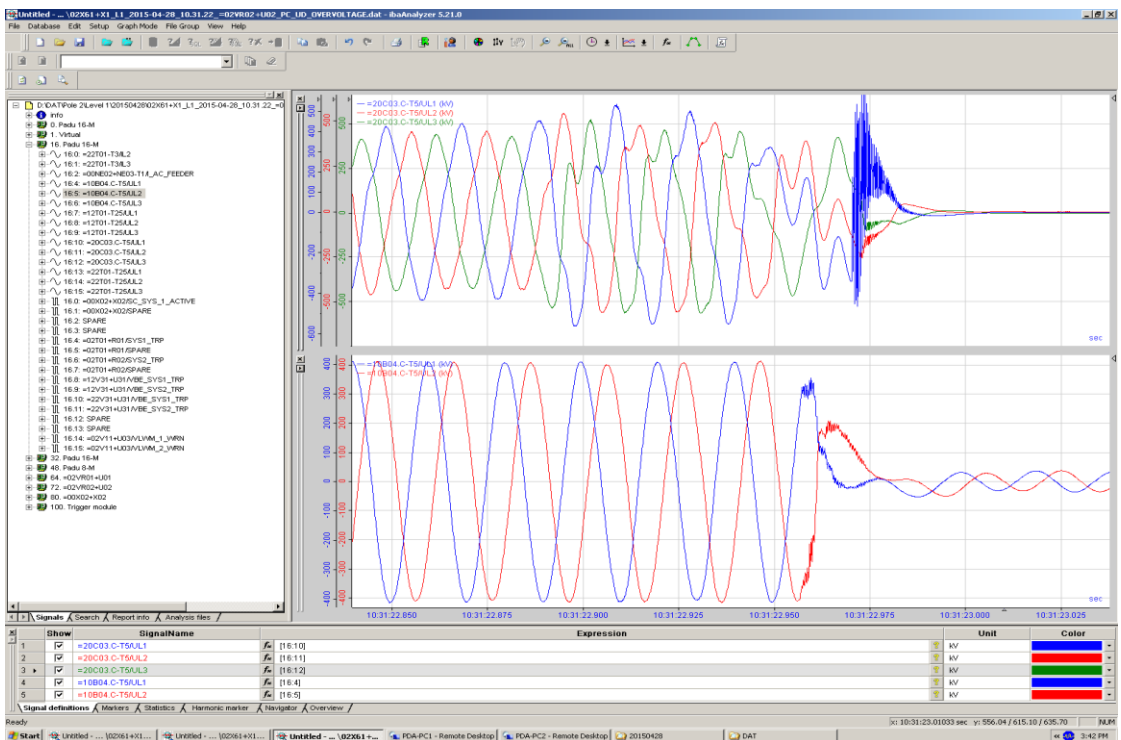
ქვემოთ მოცემულ TFR პროგრამაში კომპიუტერული მოდელირების ბაზაზე გაკეთებულია ანალიზი იმ შემთხვევისთვის, როდესაც ე.გ.ხ. მესხეთზე ერთ-ერთ ფაზაში მოხდა მოკლე შერთვა. ამ შემთხვევაში მოკლე შერთის დენი გვაქვს C-ფაზაში.

მოცემულ პროგრამაში ჩანს, რომ მდრ-ის ინვერტორის მხარეს (ე.გ.ხ. მესხეთზე) მომხდარი მოკლე შერთვის დენი არ ვრცელდება მდრ-ის გამმართველის მხარეს (საქართველოს ელექტროსისტემაში). ამ პროგრამაში ნაჩვენებია მდრ-ის გამმართველ-ინვერტორის (კონვერტორული) ტრანსფორმატორების მაღალი ძაბვის მხარეს არსებული A, B, და C ფაზების ძაბვები. ზემოთ მოყვანილია ორი სისტემის შემაერთებელ ხაზზე მოკლე შერთვის ანალიზის ექსპერიმენტული შედეგი.

ნახ. 17. ა. დიაგრამაზე მოყვანილია 500კვ A, B, C-ის დენები და 400კვ C-ფაზის მოკლე შერთვის დენი და A-ფაზის დენი. ნახ. 17. ბ. დიაგრამაზე ნაჩვენებია პირიქით პირველი ოსცილოგრამა ასახავს 400კვ სამივე ფაზას და შემდგომი 500კვ ორი ფაზის დენების დიაგრამას.



ა) TFR-პროგრამა



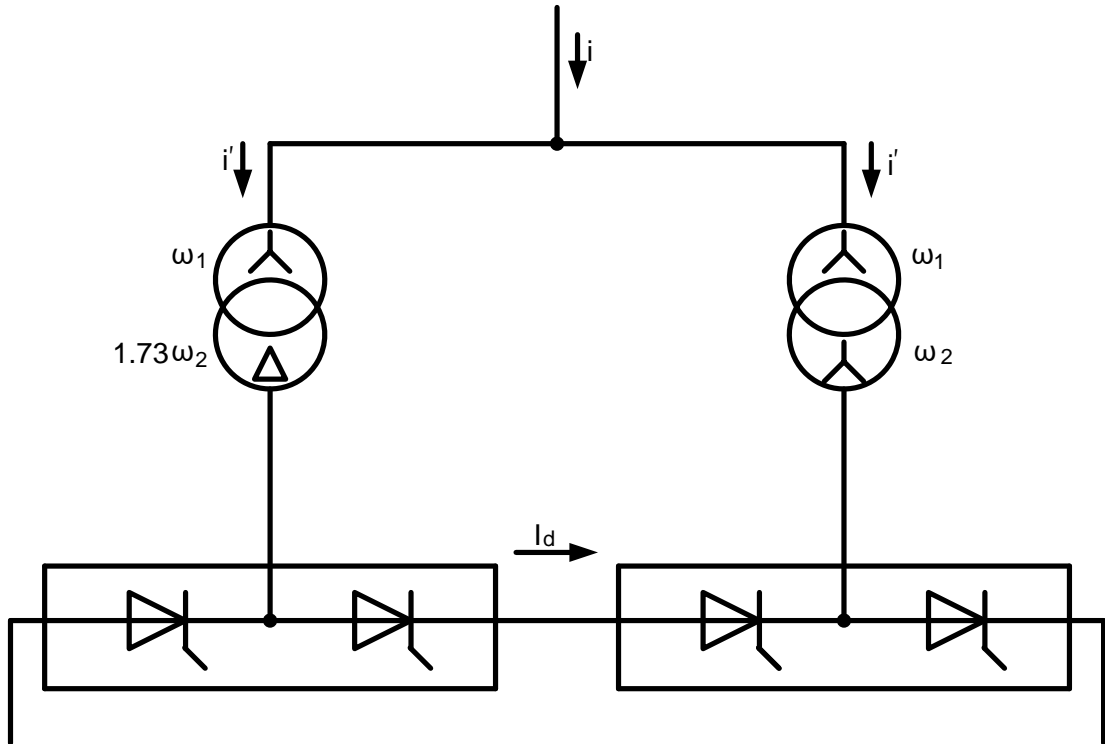
ბ) TFR-პროგრამა

ნახ. 17. TFR-ის პროგრამა ერთფაზა მოკლე შროვის დენების

ანალიზის სქემა

3.6 ცვლადი დენი ორბოგიანი გარდამქმნელის შესავალზე

ორბოგიანი გარდამქმნელი შესრულებულია ორი ტრანსფორმატორით (ნახ. 18)



ნახ. 18. ორბოგიანი გარდამქმნელის შესავალზე დენი

აქ მიღებული შედეგები შეიძლება გავრცლდეს სამ გრაგნილიანი ტრანსფორმატორის შემთხვევაშიც. სქემიდან ჩანს რომ შემავალი დენი $i = i' + i''$, i' და i'' ერთ ბოგიანი გარდამქმნელის დენებია. i დენის ფორმა ახლოსაა სინუსოიდალურთან ორბოგიანი 12 - ფაზა გარდამქმნელის შემთხვევაში $n = 6(2k - 1) \pm 1$ ნომერი ჰარმონიკები იკვრებიან სქემის მიგნით - ცირკულირებენ 2 ტრანსფორმატორს სორის და არ გადიან ცვლადი დენის ქსელში. დანარჩენი ჰარმონიკები გადიან ქსელში. დენის ქსელში მათი რიგითი ნომერია $n = 12k \pm 1$, სადაც $k = 1, 2, 3, \dots$

ზოგადად m - ფაზა გარდამქმნელის შემთხვევაში რომელიც შესრულებულია ნებისმიერი სქემით შემავალ დენში (სამფაზა დენის მხრიდან) გვაქვს უმაღლესი ჰარმონიკები რიგითი ნომრით $n = mk \pm 1$, სადაც $k = 1, 2, 3, \dots$ ხოლო გამართულ ზაზვაში ჰარმონიკები ნომრით $n =$

mk ჩვენს მიერ განხილული გარდამქმნელებისათვის $m = 12$ [2] -ის დანართში მოყვანილია ცვლადი დენის ჰარმონიკების გაანგარიშების მეთოდი და მაგალითები α და γ პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის.

3.7 ტრანსფორმატორის გრაგნილების ძაბვა ერთბოგიანი

გარდამქმნელისთვის

განვიხილოთ ერთბოგიანი გარდამქმნელის სქემა. მეორეული გრაგნილი შერთებულია ვარსკულავად ვიპოვოთ U_{2B} ფაზური ძაბვა.

დროის იმ შუალედში როდესაც განსახილველი B ფაზა არ მონაწილეობს დენის კომუტაციაში მისი ძაბვა უდრის ე.მ.ძ, $U_{2B} = E_{2B}$. ჩვენ მხედველობაში არ ვიღებთ ძაბვის აქტიურ ვარდნას და გამართულ დენს ვთვლით აბსოლუტურად გასწორებულად:

$$I_d = \text{const.}$$

დროის შუალედებში, როდესაც i_{2B} მონაწილეობს კომუტაციაში შესაბამისი ფაზის ძაბვა განსხვავდება ე.მ.ძ - გან $X\gamma$ წინალობაზე ძაბვის ვარდნით დროის იმ შუალედში როცა დენი გადადის 2 ვენტილიდან 4 - ში და იმავე დროულად A -დან B ფაზაში ძაბვისათვის გვექნება.

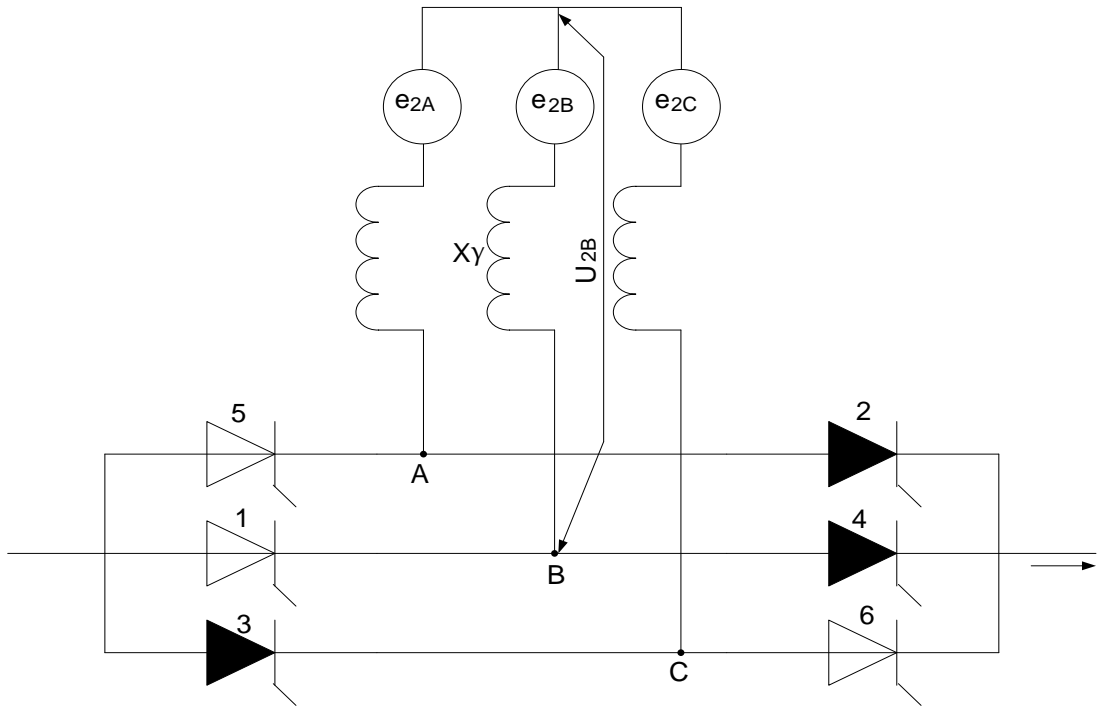
$$U_{2B} = U_{2A} = \frac{1}{2} (e_{2A} + e_{2B}) \quad (2-8).$$

სხვა შუალედში 4 და 6 ვენტილი ამოკლებენ B და C წერტილებს და ამიტომ:

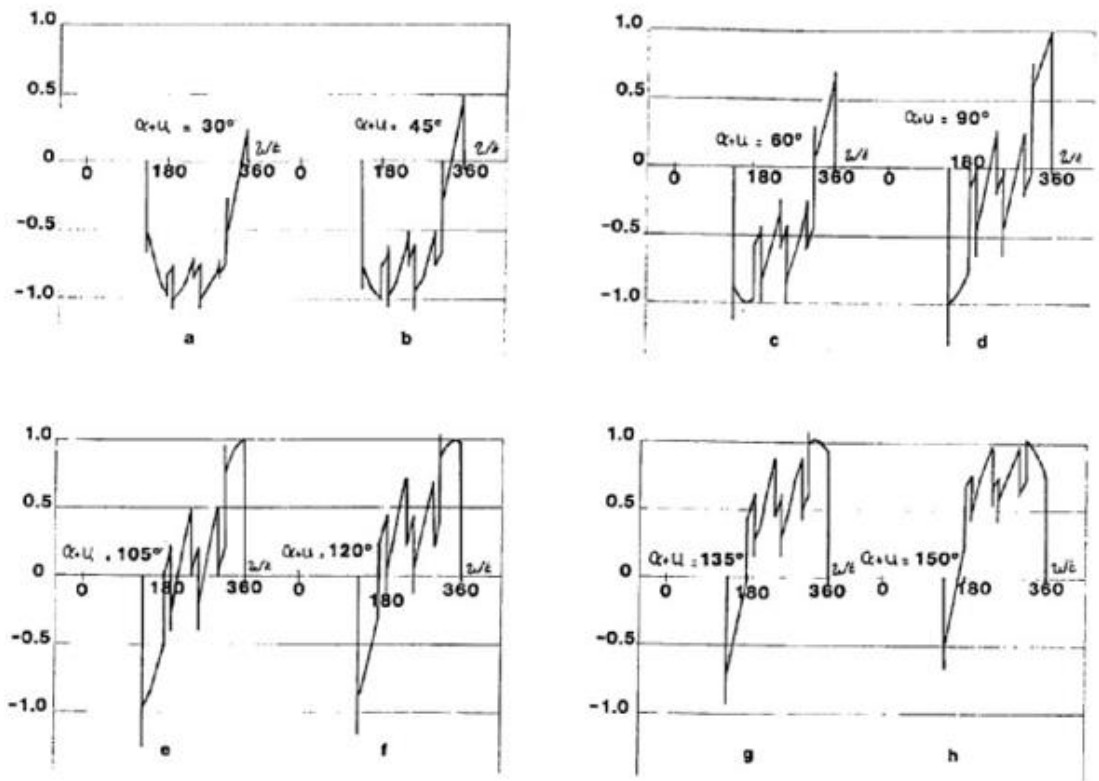
$$U_{2B} = U_{2C} = \frac{1}{2} (e_{2A} + e_{2B}) \quad (2-9).$$

ეს ტოლობები საშუალებას გვაძლევს ავაგოთ ფაზური ძაბვის მრუდის U_{2B} - ს უბნები. ფაზური ძაბვის მიხედვით ვიპოვიოთხაზურ ძაბვასაც მაგალითად:

$U_{BA} = U_B - U_A$, როცა ვენტილებით დამოკლებულია A და B წერტილები, მაშინ ცხადია $U_{BA} = 0$.



ნახ. 19. ვარსკვლავად შეერთებული მეორეული გრაგნილის ფაზური ძაბვის განსაზღვრა



ნახ. 20. 12-პულსიანი ვენტის ძაბვები

ზემოთ მოცემულ ნახაზი 20-ზე გამოსახულია სატესტო პროცედურები ტირისტორული ვენტილებისთვის. მოყვანილია ვენტლის ძაბვის ოსცილოგრამები სხვადასხვა ანთების კუთხისთვის.

3.8 გარდამქმნელის შესავალზე სიმძლავრე.

სიმძლავრის კოეფიციენტი

ვგულისხმობთ რომ გარდამქმნელი მიერთებულია უსასრულოდ დიდი სიმძლავრის სალტებზე და მის შესავალზე მოქმედებს სამფაზა ე.მ.დ. სისტემა გარდამქმნელი წარმოვადგინოთ ზოგადად კონკრეტული სქემის გარეშე.

გარდამქმნელის შესავალზე მყისი სიმძლავრე (ერთი ფაზისთვის)

$P = ei$, სადაც $i = i(1) + \sum_n i(n)$ მყისი სიმძლავრე

$$P = ei(1) + \sum_n Ei(n).$$

აქტიური სიმძლავრე წარმოადგენს (საშუალო მნიშვნელობას) და ამიტომ

$$P' = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \int_0^T ei(1) dt + \sum_n \frac{1}{T} \int_0^T ei(n) dt,$$

სადაც T - სინუსოიდური ე.მ.დ. - ისა და დენის პირველი ჰარმონიკის i(1) პერიოდია.

ცნობილია, რომ

$$\frac{1}{T} \int_0^T ei(1) dt = EI(1) \cos\varphi(1),$$

$$\text{ხოლო} \quad \int_0^T ei(n) dt = 0.$$

გარდამქმნელის შესავალზე აქტიური სიმძლავრე (სამი ფაზისათვის)

$$P = 3EI(1) \cos\varphi(1). \quad (2-10).$$

ამრიგად აქტიურ სიმძლავრეს განაპირობებს შესავალი დენის მხოლოდ პირველი ჰარმონიკა.

გარდამქმნელის შესავალზე სრული სიმძლავრე

$$S = 3EI = 3I\sqrt{I^2(1) + \sum_n I^2(n)} \quad (2-11)$$

სადაც I - დენი შესავალი დენის მოქმედი მნიშვნელობა..

სრულ სიმძლავრეს გააჩნია სამი შემდგენი: აქტიური სიმძლავრე, რეაქტიული სიმძლავრე პირველი ჰარმონიკისთვის და დამახინჯების სიმძლავრე გენპირობებული დენის უმარლესი რიგის ჰარმონიკებზე.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + N^2 \quad (2-12)$$

რეაქტიული სიმძლავრე პირველი ჰარმონიკისთვის

$$Q = 3EI(1) \cos\varphi(1) \quad (2-13)$$

დამახინჯების სიმძლავრე

$$N = 3E\sqrt{\sum_N I^2(n)} = 3E\sqrt{I^2 - I^2(1)} \quad (2-14)$$

დარდამქმნელის სიმძლავრის კოეფიციენტი

$$K = \frac{P}{S} = \frac{I(1)}{I} \cos\varphi(1) \quad (2-15).$$

ერთბოგიანი δ - ფაზა გარდამქმნელისათვის როცა, $\gamma = 0$

$$\frac{I(1)}{I} = 0,955, \text{ ხოლო } \text{ორბოგიანი } 12 - \text{ ფაზა გარდამქმნელისთვის}$$

$\frac{I(1)}{I} = 0,988$ დატვირთვის დენის გაზრდასთან ერთად, მცირდება უმაღლესი რიგის ჰარმონიკების ფარდობითი მნიშვნელობა შემავალ დენში და ამის გარდამქმნელისათვის, როცა $\alpha = 0$

$$\text{და } \gamma = 30^\circ \text{ ფარდობა } \frac{I(1)}{I} = 0,982 \text{ მქმნელის სიმძლავრის}$$

კოეფიციენტში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს $\cos\varphi(1)$.

პირველი მიახლოებით შეიძლება დაუშვათ

$$\varphi(1) \approx \alpha + \frac{\gamma}{2}, \text{ გამმართვეკის რეჟიმში ხოლო ინვერტორის რეჟიმში:}$$

$$\varphi(1) \approx 180^\circ - \beta + \frac{\gamma}{2} = 180^\circ - (\delta + \gamma) + \frac{\gamma}{2} = 180^\circ - (\delta + \frac{\gamma}{2}).$$

სიმძლავრის კოეფიციენტი გამმართველისათვის მცირდება α და γ - ს გაზრდით, ხოლო ინვერტორში δ და γ - ს გაზრდით. გამმართველი ქსელიდან მოიხმარს აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეებს ($P > 0, Q > 0$) ამრიგად ორივე რეჟიმში გარდამქმნელი ენერგოსისტემიდან მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს, მეორენაირად ენერგოსისტემისათვის ის წარმოადგენს ინდუქციურ დატვირთვას.

$$\text{tg}\varphi(1) = \frac{Q}{P}, \text{ განვიხილოთ მაგალითი ერთბოგიანი ინვერტორისთვის}$$

$$\delta = 15^\circ, \quad \gamma = 25^\circ.$$

$$\operatorname{tg}\varphi_{(1)} = \frac{\gamma - \cos(2\alpha + \gamma)\sin\gamma}{\sin(2\alpha + \gamma)\sin\gamma}$$

ინვერტორი გაცემულ 1 კვტ აქტიურ სიმძლავრეზე, სისტემიდან მოიხმარს 0,56 კვარ რეაქტიულ სიმძლავრეს. სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდისათვის, საჭიროა გამართვის რეჟიმში მცირე გაღების კუთხე (10° - ის ფარგლებში), ხოლო ინვერტორულ რეჟიმში კი ჩაქრობის მცირე δ კუთხე (15° - ის ფარგლებში). გარდამქმნელის საინჟინრო გაანგარიშებებში საკმარისია მის შესასვლელზე აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების განსაზღვრა:

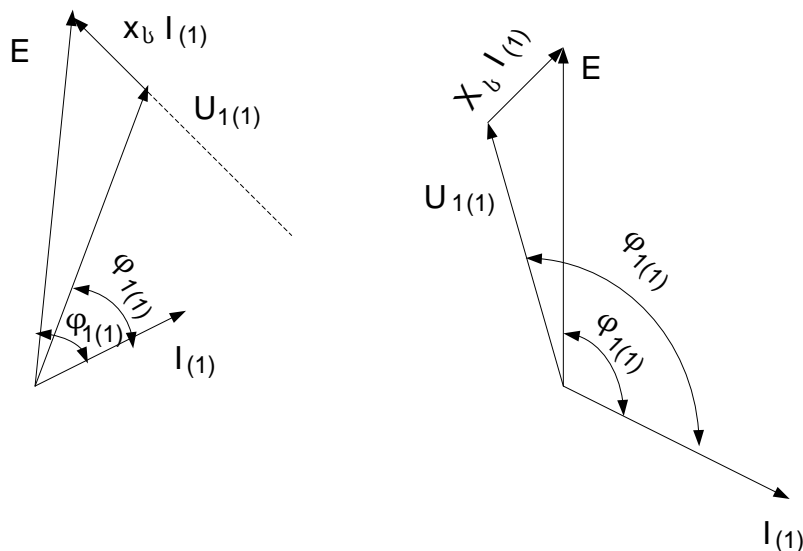
$$P = U_1(1) I(1) \cos\varphi_{1(1)} = 3EI(1)\cos\varphi_{1(1)}$$

$$Q = 3U_1(1) I(1) \sin\varphi_{1(1)} = 3EI(1)\sin\varphi_{1(1)} - 3I^2(1)X_s \quad (2-16)$$

სადაც $U_1(1)$ - გარდამქმნელის სალტეებზე ფაზური ძაბვის პირველი ჰარმონიკაა.

სიმძლავრის კოეფიციენტი პირველი ჰარმონიკის მიხედვით ტოლია $\cos\varphi_{1(1)}$. ის ცოტათი აღემატება $\cos\varphi(1)$ - ს (იხ. ნახ. 21). $\varphi_{1(1)}$ შეიძლება ვიპოვოთ ტოლობიდან.

$$\operatorname{tg}\varphi_{1(1)} = \frac{Q}{P} = \frac{E\sin\varphi(1) - I(1)X_s}{E\cos\varphi(1)}$$



ნახ. 21. გარდამქმნელის შესავალზე სიმძლავრის
საანგარიშოდ ($X > 0$)

თავი IV

4.1 სინქრონული კომპენსატორები

ზოგადი ცნობები. სინქრონულ კომპენსატორს უწოდებენ ძრავულ რეჟიმში მომუშავე სინქრონულ მანქანას, რომელსაც ლილვზე დატვირთვა არა აქვს. სინქრონულ კომპენსატორს შეუძლია გამოიმუშაოს და გასცეს ქსელში რეაქტიული ენერჯია ან მოიხმაროს იგი ქსელიდან. თუკი დატვირთვის ცენტრში ჩავრთავთ სინქრონულ კომპენსატორს, გასცემს რა მომხმარებლისათვის საჭირო რეაქტიულ სიმძლავრეს, საშუალებას იძლევა განტვირთული იქნას რეაქტიული დენისგან სადგურებისა და მომხმარებლების დამაკავშირებელი ელექტროგადაცემირ ხაზები. რაც ამცირებს ხაზში დანაკარგებს და აუმჯობესებს ქსელის მუშაობის პირობებს.

სინქრონული კომპენსატორის მიერ გამოიმუშავებული ან ქსელიდან მოხმარებლს რეაქტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია აგზნების დენზე. გადააგზნების რეჟიმში იგი გამოიმუშავებს რეაქტისლ ენერჯიას და გასცემს მას. თუ აგზნების დენი მცირეა, მაშინ სინქრონული კომპენსატორი ქსელიდან იღეებს რეაქტიულ ენერჯიას.

სინქრონული კომპენსატორების თავისებურებაა მისი უნარი იმუშაოს როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი აგზნებით. სინქრონული კომპენსატორების როტორი ჩვეულებრივ ცხადპოლუსაა, მსგავსად ჰიდროგენერატორებისა, მაგრამ მათი ლილვი განლაგებულია ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში, ტურბოგენერატორების მსგავსად. ასეთი შესრულებისას მცირდება კომპენსატორის მასა, გაბარიტები და ღირებულება, ადვილდება მისი რემონტი და მარტივდება მისი საძირკვლის მოწყობა. სინქრონული კომპენსატორის როტორის წყვილპოლუსთა რიცხვი ჩვეულებრივ 3 ან 4-ია, ახალციხის ქვესადგურის მაგალითზე მისი წყვილპოლუსთა რიცხვი შეადგენს 1-ს, შესაბამისად მისი ნომინალური ბრუნთა რიცხვია 1000 ან 750 ბრ/წთ, ხოლო ჩვენ შემთხვევაში 3000ბრ/წთ. ერთი სინქრონული კომპენსატორის სიმძლავრე 10–დან 320 მგვა–მდე

მერყეობს. ქ/ს ახალციხის მაგალითზე გვაქვს 3 მანქანა, ერთის სიმძლავრე არის 65 მგვა.



ნახ. 22. სინქრონული კომპენსატორის როტორი

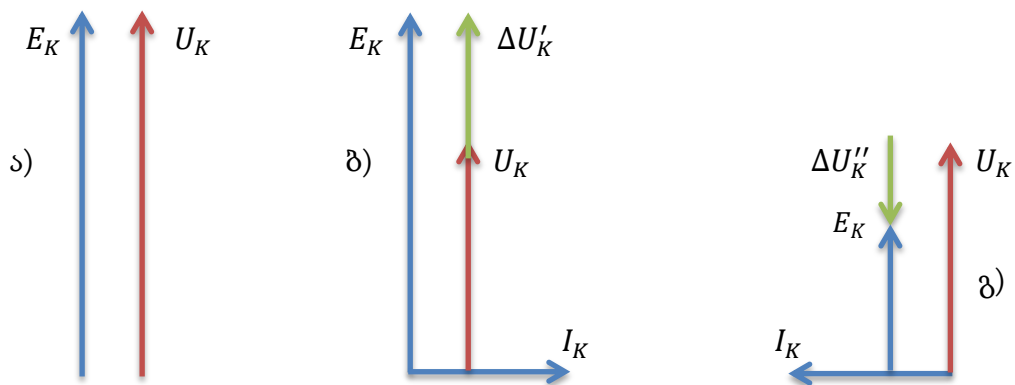


ნახ. 23. სინქრონული კომპენსატორის სტატორი

სისტემასთან პარალელური მუშაობის მდგრადობის ამაღლების მიზნით, სინქრონულ კომპენსატორებს ამზადებენ დიდი ინერციის მომენტით და, მიუხედავად იმისა, რომ სინქრონულ კომპენსატორებს მცირე მახრუნი მომენტი გააჩნიათ (არ გააჩნიათ აქტიური დატვირთვა), მათ ლილვს მაინც გააჩნია მნიშვნელოვანი გაბარიტებით. მექანიკური სიმტკიცის ამაღლებისათვის, მათ გააჩნიათ ნაჭედი შესრულება.

მუშაობის რეჟიმები. აგზნების დენის ცვლილება იწვევს სტატორის გრაგნილის ემპ-ის E_K ცვლილებას. სინქრონულმა კომპენსატორმა შეიძლება იმუშაოს შემდეგ სამ რეჟიმში:

- რეჟიმს, როდესაც სტატორის ემპ სიდიდით ქსელის ძაბვის ტოლია $E'_K = U_K$, უწოდებენ კომპენსატორის უქმი სვლის რეჟიმს (ნახ 24-ა)
- სინქრონული კომპენსატორის დენის გაზრდის შედეგად, სტატორის ემპ გადააჭარბებს ძაბვას მის მომჭერებზე (გადააგზნების რეჟიმი). ძაბვის დადებითი სხვაობის $\Delta U' = E'_K - U_K$ ზეგავლენით, კომპენსატორის სტატორში წარმოიქმნებანდენი I_k მიმართული კომპენსატორიდან ქსელისკენ (ნახ. 24-ბ) ვინაიდან კომპენსატორის გრაგნილის წინაღობა თითქმის მთლიანად ინდუქციური ხასიათისაა, ამიტომ აღნიშნული დენი ძაბვის სხვაობას $\Delta U'$ და მომჭერების U_k ძაბვას ჩამორჩება დაახლოებით 90° -ით და I_k დენის შესაბამისი Q_K რეაქტიული სიმძლავრე მიეწოდება ქსელს ამ რეჟიმს უწოდებენ გადააგზნების რეჟიმს.
- მცირე აგზნების შემთხვევაში, როდესაც E''_K დენი იწვება წინმსწრები U_K ძაბვისა და კომპენსატორი მოიხმარს ქსელიდან რეაქტიულ ენერგიას (ნახ. 24-გ).



ნახ 24. სინქრონული კომპენსატორის ვექტორული დიაგრამები

ა - უქმი სვლის რეჟიმში, ბ - გადააგზნების რეჟიმში, გ - მცირედ აგზნების რეჟიმში

სინქრონული კომპენსატორის გაშვების ყველაზე სწრო გავრცელებული ხერხია მისი რეაქტორული გაშვება, როდესაც მისი ქსელში ჩართვა ხდება დიდი ინდუქტიური წინაღობის მქონე რეაქტორის გავლით. რისი წყალობითაც კომპენსატორის მომჭერებზე ძაბვა მცირდება ნომინალურის 45-50 %-მდე, რაც საშსალებას იძლევა რომ გამშვმა დენმა არ გადააჭარბოს ნომინალურ დენს 2-2.8-ჯერ მეტად. გაშვების შემდეგ კი ჩაერთვება რეაქტორის პარალელური შტო, რომლითაც ექნება კომპენსატორს კავშირი ქსელთან. რეაქტორის შტო კი გამოერთვება.

მცირე და საშუალო სიმძლავრის კომპენსატორების აძვრა ხორციელდება ასინქრონული მომენტის განვითარების ხარჯზე, რისთვისაც გათვალისწინებულია სპეციალური გამშვი გრაგნილი, რომელთაც ჰიდროგენრატორების სადემპფერო გრაგნილების ანალოგიური შესრულება გააჩნიათ. დიდი სიმძლავრის სინქრონული კომპენსატორების პოლუსების მასიური დაბოლოებები თვითონ უზრუნველყოფენ საკმარისად დიდი ასინქრონული მომენტის წარმოქმნას, ამიტომ მძლავრ კომპენსატორებზე გამშვი გრაგნილების არსებობის საჭიროება აღარ არის. დიდი სიმძლავრის სინქრონული კომპენსატორის აძვრისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას მის ლილვზე დამაგრებული დამატებითი ძრავი, რომელიც კომპენსატორის როტორს დააბრუნებს სინქრონულ ბრუნთა რიცხვამდე. რის შემდეგაც კომპენსატორს მიეწოდება აგზნება და ჩაერთვება ქსელში, ანუ პრაქტიკულად მოხდება მისი სინქრონიზაცია.

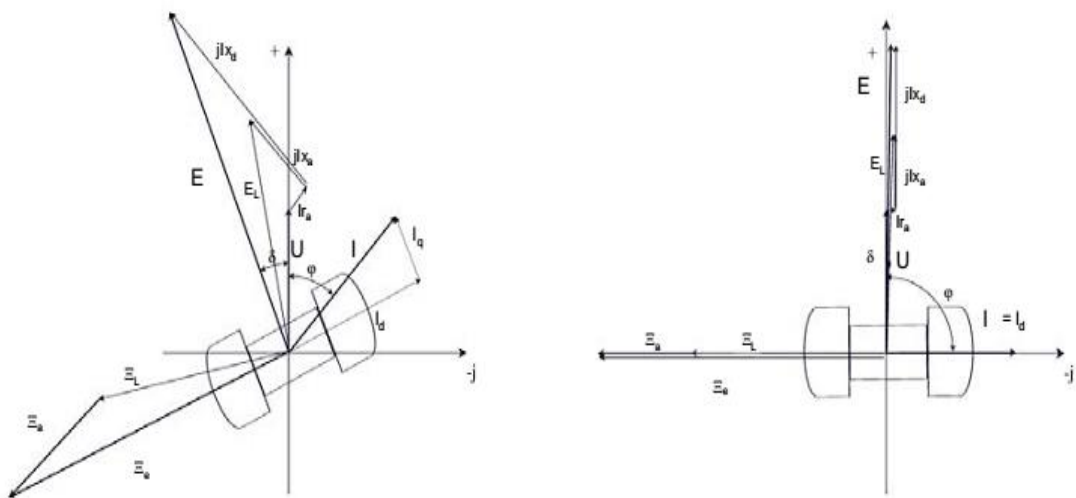
სინქრონული კომპენსატორს გააჩნია ირიბი გაცივების სისტემა წყალბადით ან წყლით. სინქრონულ კომპენსატორზე, ქსელში მიერ გასაცემი რეაქტიული სიმძლავრის სწრაფი ცვლილების უზრუნველსაყოფად, ჩვეულებრივ გააჩნიათ სწრაფმოქმედი ტირირტორული აგზნების სისტემები. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, რომელთა მეტი წილი მოდის როტორის აძვრასა და ხახუნზე (რადგან კომპენსატორზე ტვირთი არ არის მიერთებული), ნორმალური გაცივების პირობებში არ უნდა

აღმატებოდეს სინქრონული კომპენსატორის დადგმული სიმძლავრის 1.5-2.5 %-ს.

4.2 სინქრონული კომპენსატორის ფუნქციები. თეორია

სინქრონიზირებული ელექტრო მანქანა, როგორც სინქრონული გენერატორი (ან ძრავი) ძირითადად შეიძლება გამოყენებული იყოს, როგორც სინქრონული კომპენსატორი. აქტიური სიმძლავრის მიწოდების (ან მოხმარების) გარეშე მანქანა შეიძლება მუშაობდეს, როგორც კონდესატორი ან როგორც ინდუქციურობა და დამოკიდებულია აგზნების დენზე.

შევხედოთ ვექტორულ დიაგრამას, რომელიც შეიძლება მარტივად ასე გამოვსახოთ. ასეთია მისი ნომენკლატურა.

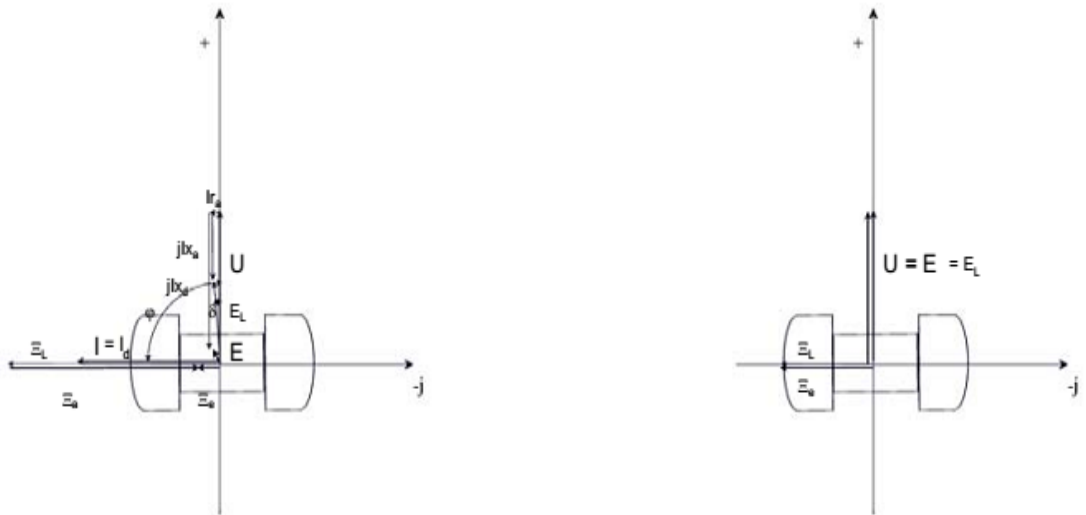


გენერატორის გადამეტაგზნებით მუშაობა

ა) აქტიური და რეაქტიული დატვირთვით (წერტილი N)

ბ) მხოლოდ რეაქტიული დატვირთვით (წერტილი A)

ნახ. 25. ა), ბ), სინქრონული კომპენსატორის თეორია



გენერატორის მუშაობა

გ) ქვე აგზნებით მუშაობა

რეაქტიული დატვირთვია (წერტილი B)

დ) თვითის გარეშე

მუშაობა (წერტილი C)

ნახ. 25. გ), დ), სინქრონული კომპესატორის თეორია

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოთ მოცემული გენერატორის სისტემის ნახაზი არის გამოყენებული მომხმარებლის დატვირთვის სისტემის ნაცვლად.

E_e მთელი აგზნების მაგნიტომამოძრავებელი ძალა (დენური აგზნება);

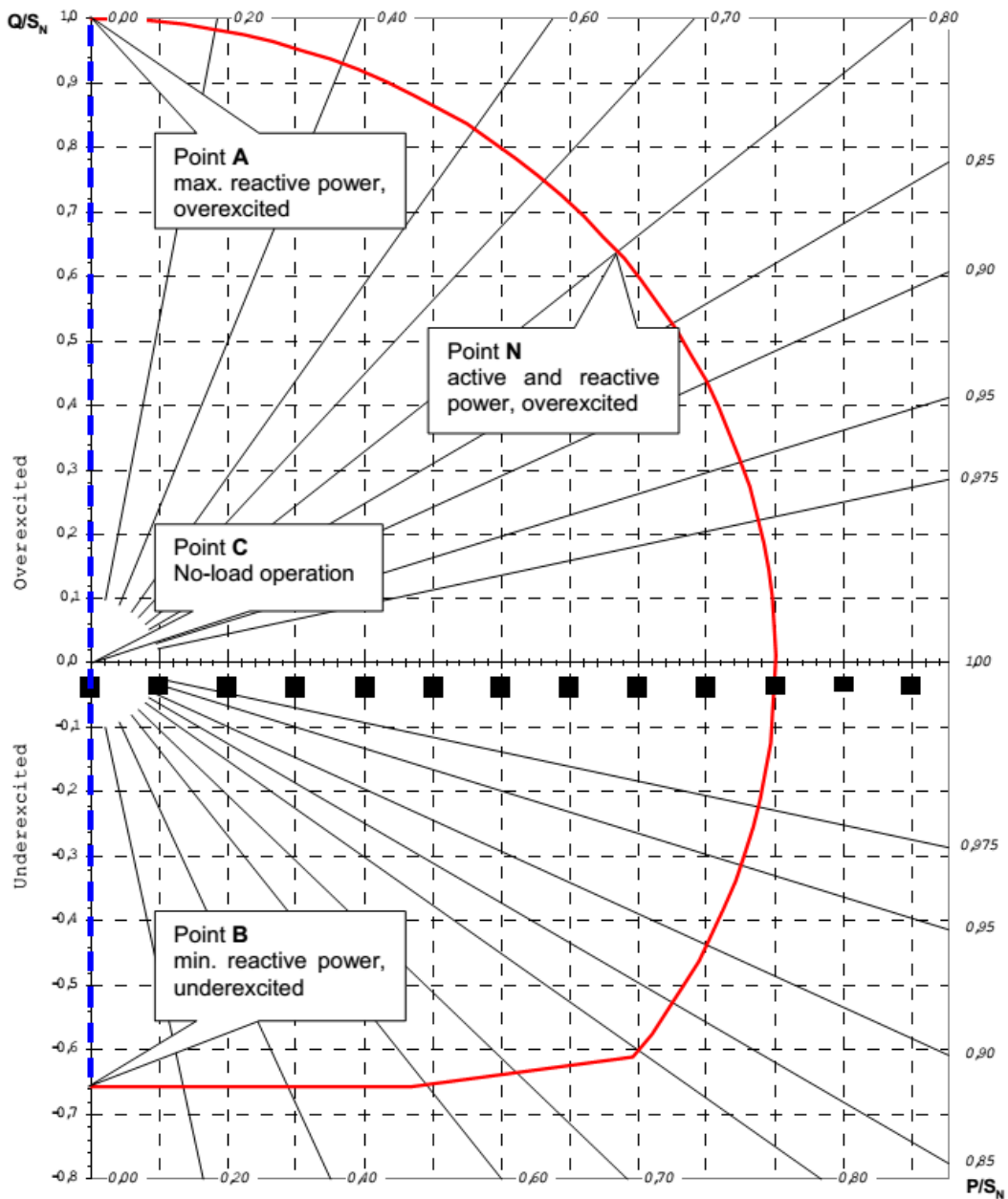
E_L აგზნების ძაბვის მაგნიტომამოძრავებელი ძალა;

E ფაზური ძაბვა (ხშირად უწოდებენ U_p).

მანქანის ოპერაცია მხოლოდ რეაქტიული სიმძლავრით (წერტილები A და B) მთელი მაგნიტურმამოძრავებელი ძალა არის ხაზში და შეიძლება იყოს დაჯამებული მუდმივად გამოყენებლ თავის დონეზე.

ქვეაგზნების ოპერაცია არის შეზღუდული a წერტილში, E_e სადაც მისწრაფის ნულისაკე. a პატარას მინიმუმი აგზნების დონე არის აუცილებელი სტაბილიზაციის მიზეზებიდან გამომდინარე (ჩვეულებისამებრ 10% დაუტვირთავი დენი). გადამეტ აგზნების შესაძლებლობა არის შეზღუდული როტორის მაქსიმალური აგზნების დენით (თერმული ზღვარით).

ზემოთ აღნიშნული წერტილები N, A, B და C წერტილები არის ნაჩვენები მრუდის შესაძლებლობებში. წერტილები A, B და C წარმოადგენს ოპერაციის პირობას, როგორც სინქრონული კომპესატორი (ლურჯი, წვეტილი ხაზი). სიმარტივისათვის მოხმარებული სიმძლავრე აბრუნებს სინქრონულ კომპესატორს და მოყავს მუდმივ მოძრაობაში.



ნახ. 26. სინქრონული გენერატორების რამოდენიმე შესაძლებლობების მრუდი

$S_N = 60,00 \text{ MVA}$

$PF = 0,00$

$I_{fN} = 1189 \text{ A}$

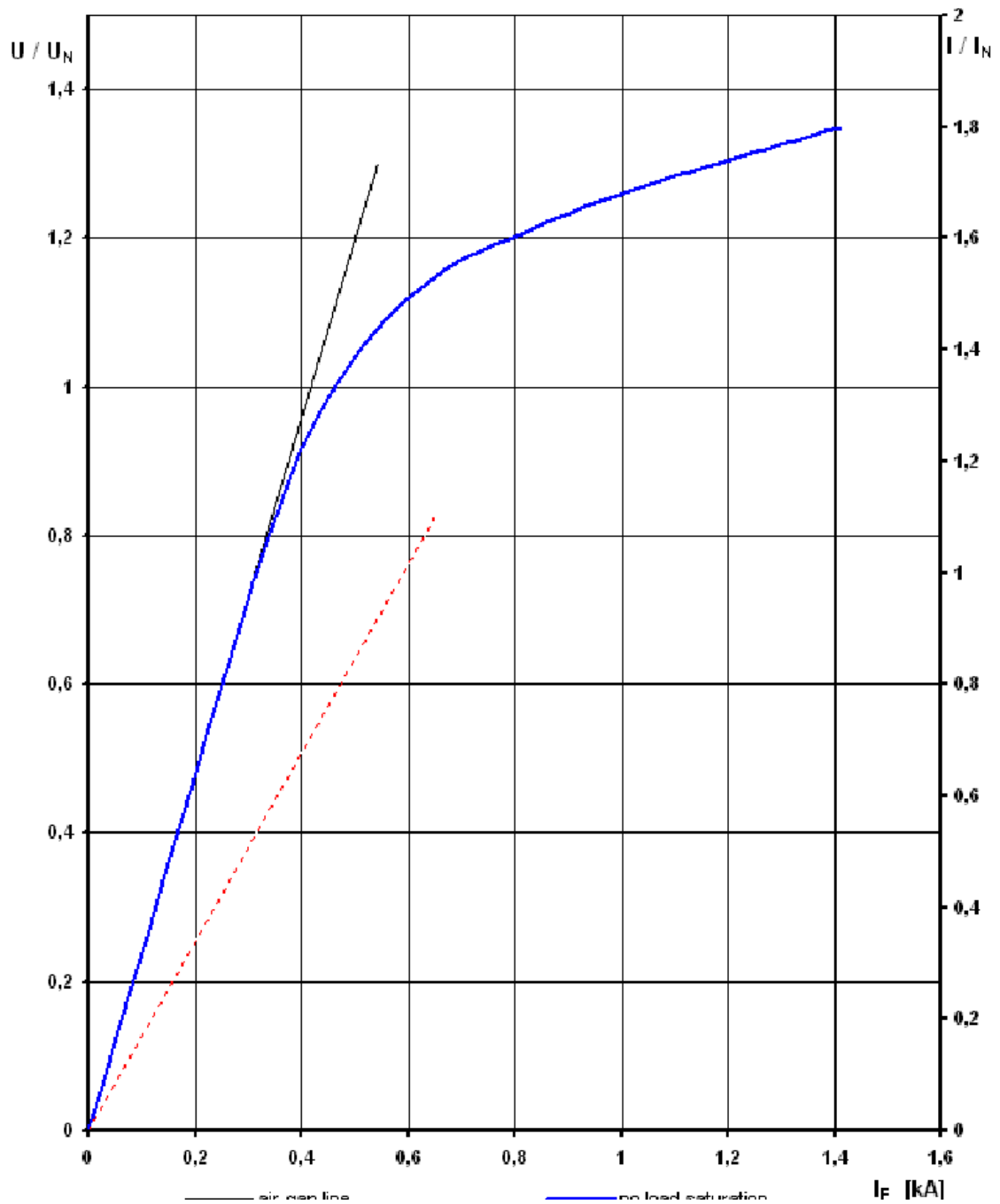
$U_N = 11,00 \text{ kV}$

$SCR = 0,78$

$f_N = 50 \text{ Hz}$

$I_N = 3,149 \text{ kA}$

$I_{f0} = 461 \text{ A}$



ნახ. 27. უქმ სვლაზე გაჯერება და მოკლემუდროვის მახასიათებელი

- ----- შავი ხაზით გავლებულია მხები.
- ----- ლურჯით აღნიშნულია უქმ სვლაზე გაჯერება.
- ----- წითელი პუნქტირით აგებულია მოკლედ მუდროვის დენი.

ESCR = 0,78 არის ეფექტური მოკლეშერთვის სიმძლავრის კოეფიციენტი (effective short circuit ratio). ანუ ქ/ს ახალციხის მაგალითის შემთხვევაში ეს პარამეტრი წარმოადგენილია ერთი მანქანისთვის, ჩვეულებრივ პირობებში კი შესაძლებელია ორი ასეთი პარამეტრების მქონე მანქანის მუშაობა. ეს საბოლოო ჯამში გააუმჯობესებს SCR-ს და გვექნება $2 * 0,78 = 1,56$.

ამ შემთხვევაში სინქრონული კომპენსატორის წილი არის:

$$ESCR = 1,56.$$

რადგან ქ/ს ახალციხეში სინქრონული კომპენსატორის დადგმის აუცილებლობა მოთხოვნილია პირველ რიგში ESCR გაუმჯობესების მიზნით, მეორე მხრივ ძაბვის დამატებითი რეგულირებით და ასევე რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის მიზნით.

ქვემოთ მოყვანილია სქემა და პარამეტრები, რომლებიც შესაბამეა ქ/ს ახალციხე 500-ში არსებულ სინქრონულ კომპენსატორს. კვლევის საფუძველზე აგებულ იქნა ეს სქემა და მოყვანილ იქნა ცხრილი რომელშიც მითითებულია შესაბამისი პარამეტრები, სადაც ასახულია სტატორის დენისა და აგზნების ძაბვის დასაშვები ზღვრები დროის სხვადასხვა ხანგრძლივობით.

$$S_N = 60 \text{ MVA} \quad PF = 0,00 \quad I_{fN} = 1189 \text{ A}$$

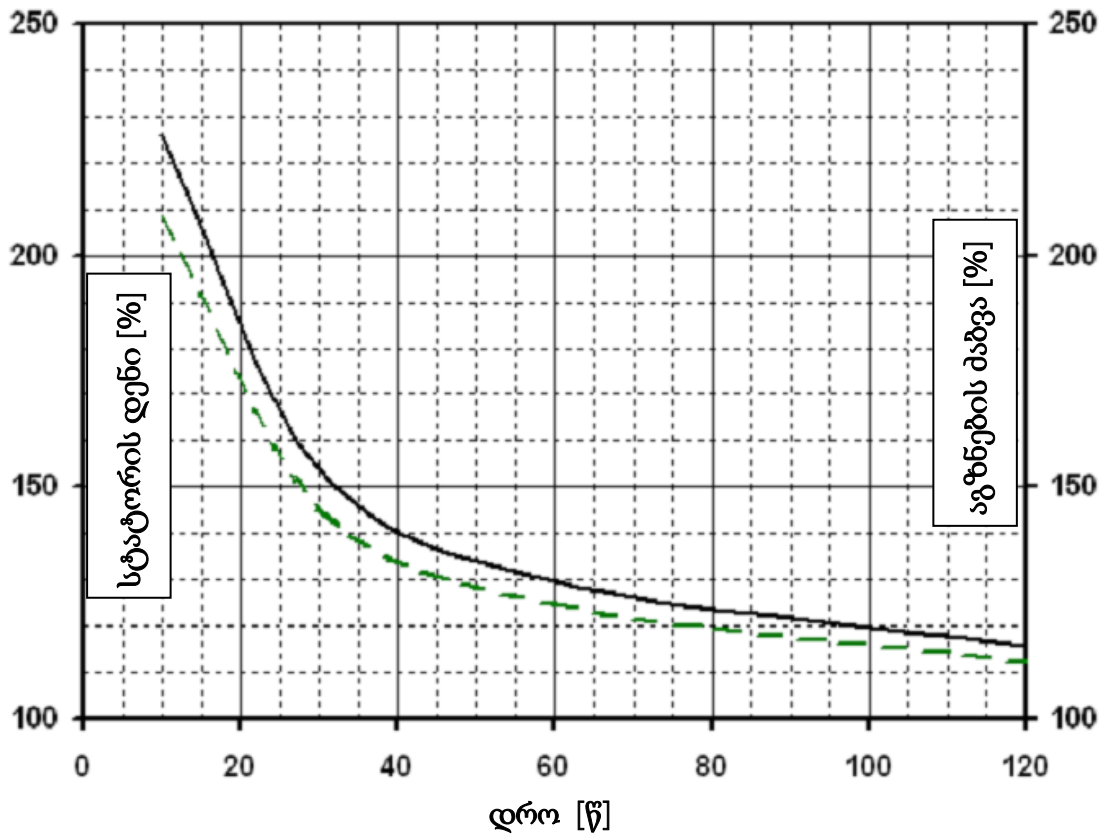
$$U_N = 11,00 \text{ kV} \quad f_N = 50 \text{ Hz} \quad T_{\text{cold Air}} = 35.0 \text{ C}^0$$

$$I_N = 3,149 \text{ kA} \quad n_N = 3000 \text{ rpm}$$

დრო [წ]	10	30	60	120
სტატორის დენი I/I_N [%]	226	154	130	116
აგზნების ძაბვა U_f/U_{fN} [%]	208	146	125	112

ცხრილი. 3. სტატორის დენისა და აგზნების ძაბვის დამოკიდებულება დროზე

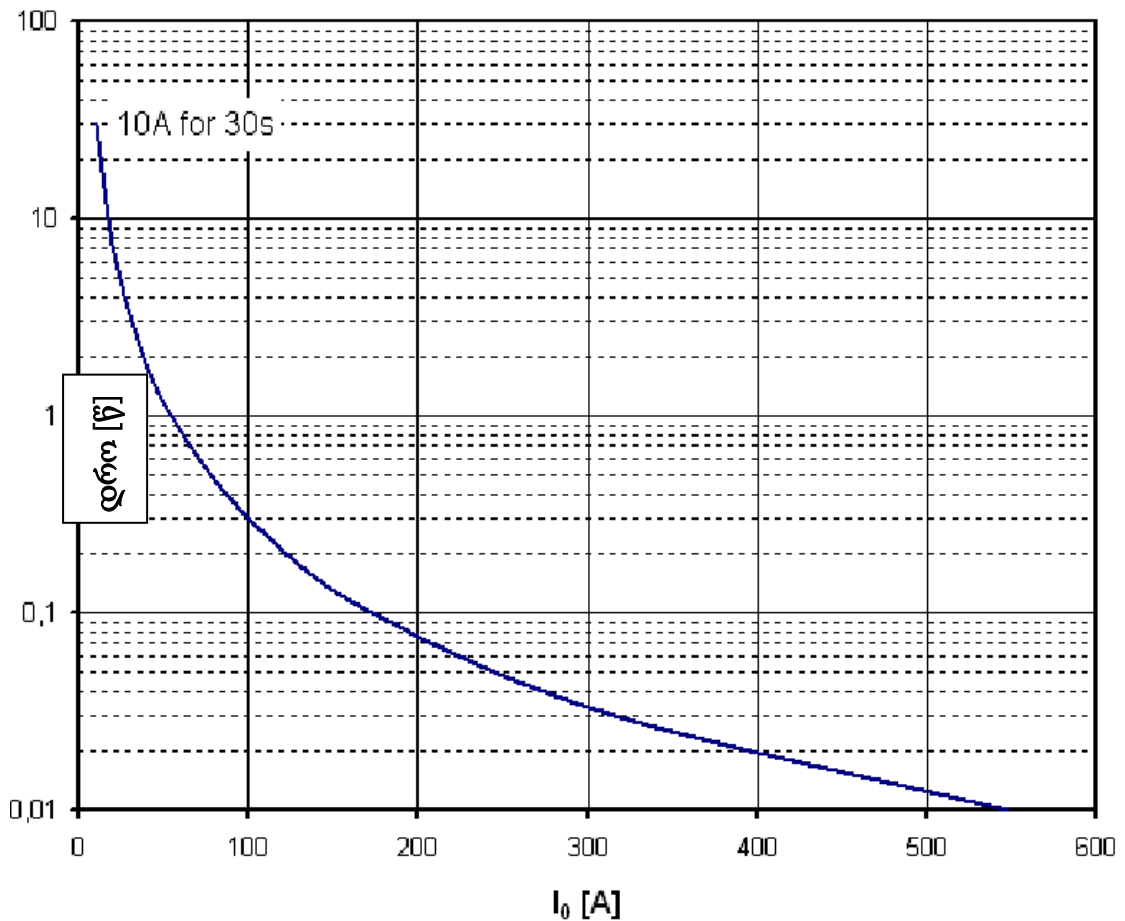
- ----- სტატორის დენი
- - - - - აგზნების ძაბვა



ნახ. 28. სტატორის დენი და აგზნების ძაბვა დამოკიდებული დროზე

- სინქრონულ კომპესატორში სტატორის ნომინალური დენის მატება დასაშვებია 130%-ით 1წთ-ის განმავლობაში.
- აგზნების ძაბვის გაზრდა დასაშვებია 125%-ით 1წთ-ის განმავლობაში.

ორივე პარამეტრის შესრულების აუცილებლობა მოთხოვნილია გრაგნილების ტემპერატურის ნომინალური მდგომარეობიდან გამომდინარე.



ნახ. 29. მიწასთან მოკლეშერთვის დენის შეზღუდვა დროზე დამოკიდებულებით

I_0 [A] მიწასთან მოკლე შერთვის დენის დამოკიდებულება ნეიტრალის წერტილში.

დრო [წ] მოცემულია I_0 -თვის დროითი შეზღუდვა, რათა თავიდან იქნეს აცილებული სტატორის გრაგნილის დაზიანება.

უწყვეტი მუშაობის დასაშვები ზღვრები:

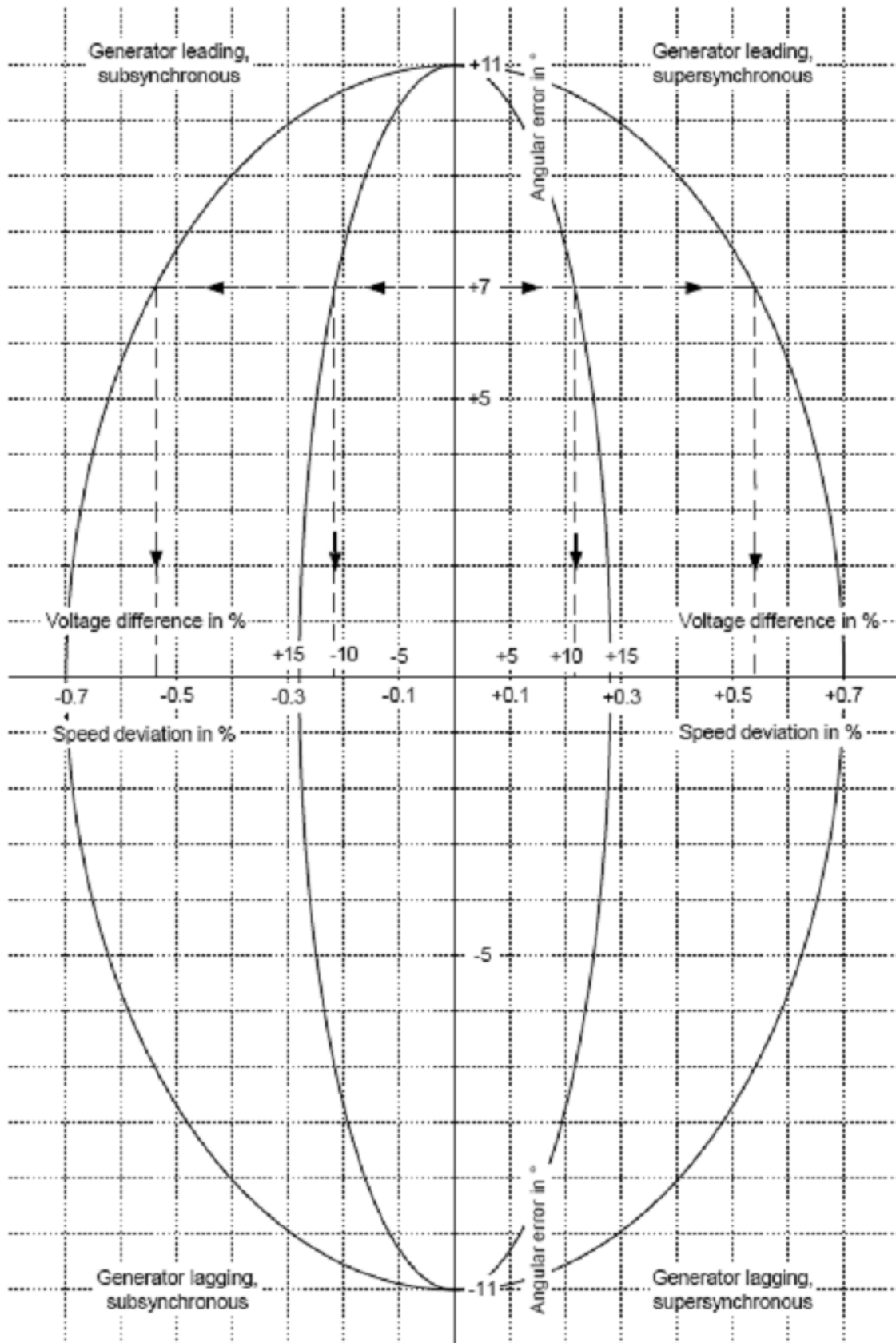
მაქსიმალური ძაბვა: +10,0% მაქსიმალური სიხშირე +5,0%

მინიმალური ძაბვა: -10,0% მინიმალური სიხშირე -5,0%

გადამეტ ძაბვისა და დაბალი სიხშირის შემთხვევაში ერთსა და იმავე დროს ორივე პარამეტრის გადახრა უწყვეტი მუშაობის რეჟიმში არის შეზღუდული:

ძაბვა +/- 5%

სიხშირე +/- 2%



ნახ. 30. სინქრონიზაციის დასაშვები კრიტერიუმები

ზემოთ მოყვანილ სქემაზე განხილულია მაგალითი:

კუთხური ცდომილება + 70 $\left\{ \begin{array}{l} \text{სიჩქარის დასაშვები გადახრა } \pm 0.54\% \text{ მაქს.} \\ \text{მაზვის დასაშვები სხვაობა } \pm 10.7\% \text{ მაქს.} \end{array} \right.$

4.3 სინქრონული კომპენსატორის ჩართვის გარდამავალი პროცესი

სინქრონული მანქანის გარდამავალი პროცესი აიწერება პარკი-გორევის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემით [5]. განტოლების სრულ სისტემას დემპფერული კონტურების არსებობის შემთხვევაში d, q ღერძებში ფარდობით ერთეულებში (x_{ad} სისტემა) აქვს სახე.

$$-e_d = \frac{d\psi_d}{d\tau} - \psi_q(1+s) + r_a + i_d;$$

$$-e_q = \frac{d\psi_q}{d\tau} + \psi_d(1+s) + r_a + i_q;$$

$$U_f = \frac{d\psi_f}{d\tau} + r_f i_f;$$

$$0 = \frac{d\psi_f}{d\tau} + r_Q i_Q;$$

$$0 = \frac{d\psi_D}{d\tau} + r_Q i_Q;$$

$$e_0 = \frac{d\psi_Q}{d\tau} + r_a i_0;$$

$$T_M \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \psi_q i_d - \psi_d i_q = M_H;$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = s. \quad (4-1)$$

აქ e_d, e_q – სტატორის d, q ელექტრომამოძრავებელი ძალები;
 $\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_D, \psi_Q$ d, q ნაკადთშეხებები, ψ_f – აგზნების გარაგნილის ნაკადთშეხება. i_d, i_q, i_f, i_D, i_Q სტატორის გარაგნილებში

დენები, τ – სინქრონული დრო (რად); Q – კუთხეა ქსელის ძაბვის ვექტორისა და q ღერძის უარყოფითი მიმართულებას შორის.

$S = (\omega_r - \omega_s)/\omega_s$ – სრიალი; ω_s – სინქრონული სიჩქარე; ω_r – როტორის სიჩქარე. M_H – დატვირთვის მომენტი; T_M – ამძრავი მექანიზმის ინერციის მუდმივა.

$$\begin{aligned}\psi_d &= L_d i_q + M_{afd} i_f + m_{QD} i_D = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D; \\ \psi_q &= L_d i_q + m_{aQ} i_Q = x_q i_q + x_{aQ} i_Q; \\ \psi_f &= M_{afd} i_f + L_f i_f + m_{fD} i_D = x_{ad} i_D + x_f i_f + x_{fD} i_D; \\ \psi_D &= m_{QD} i_D + m_{fD} i_f + L_d i_D = x_{aQ} i_d + x_{fD} i_f + x_D i_D; \\ \psi_Q &= m_{aQ} i_q + L_Q i_Q = x_{aQ} i_q + x_Q i_Q.\end{aligned}\quad (4 - 2)$$

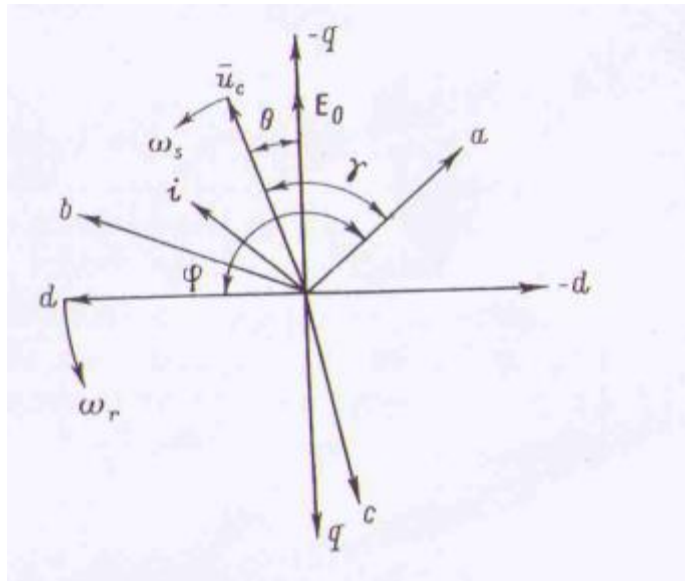
(28) – ში შედის პარამეტრები მანქანის გრაგნილების,

(27) განტოლებათა სისტემა შეიძლება გადაიწეროს ძაბვის ჩართვის რეჟიმის შემთხვევაში, როდესაც სრიალი მიიღებს დადებით მნიშვნელობას როტორის სიჩქარე ამ შემთხვევაში ნაკლებია სინქრონულ სიჩქარეზე. გვაქვს განტოლება:

$$\begin{aligned}U_d &= \frac{d\psi_d}{d\tau} - (1 - s)\psi_q + r_a i_d; \\ U_q &= \frac{d\psi_q}{d\tau} + (1 - s)\psi_d + r_a i_q; \\ U_f &= \frac{d\psi_f}{d\tau} + r_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\psi_D}{d\tau} + r_D i_D; \\ 0 &= \frac{d\psi_Q}{d\tau} + r_Q i_Q; \\ T_M \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \psi_q i_d - \psi_q &= M_H; \\ \frac{d\theta}{d\tau} &= s.\end{aligned}\quad (4 - 3)$$

სადაც $u_d, u_q - d$, გრაგნილზე მოდებული ძაბვებია.

ნახაზი 31 –ზე ნაჩვენებია მათი გამომსახველი ვექტორები



ნახ. 31. მანქანის ვექტორული დიაგრამა

განვიხილოთ კომპენსატორის ხანმოკლე გამორთვა, მანქანის ბრუნვის სიჩქარე და მანქანის პარამეტრები მუდმივი სიდიდეებია და (4-3) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს დიფერენციალურ განტოლებებს მუდმივი კოეფიციენტებით და მისი ამოხსნა შეიძლება ოპერატიული მეთოდით. $x_d(p)$ და $x_q(p)$ ოპერატორული პარამეტრების შემოღება ამარტივებს ანალიზს. გამოვიყენოთ ზედდების პრინციპი. დიფერენციალურ განტოლებათა სრული სისტემა გავყოთ ორ სისტემათ რომლებიც შეესაბამებიან ელექტრომაგნიტურ და ელექტრო მექანიკურ გარდამავალ პროცესებს. ელექტრო მაგნიტურ გარდამავალ პროცესებს ვიკვლევთ როტორის მუდმივი ბრუნვის სიჩქარის შემთხვევაში ვიხილავთ განტოლებათა ორ სისტემას. პირველი სისტემა აღწერს მანქანის სტატორის მიერთებას ქსელზე, როცა აგზნების გრაგნილი მოკლედ არის შერთული. განტოლებებს აქვთ სახე:

$$U_d = \frac{d\psi_d}{d\tau} - (1 - s)\psi_q + r_a i_d;$$

$$U_q = \frac{d\psi_q}{d\tau} - (1 - s)\psi_d + r_a i_q;$$

$$0 = \frac{d\psi_D}{d\tau} + r_f i_f;$$

$$0 = \frac{d\psi_D}{d\tau} + r_D i_D;$$

$$0 = \frac{d\psi_Q}{d\tau} + r_Q i_Q. \quad (4-4)$$

განტოლებათა მეორე სისტემა შეესაბამება სტატორის მოკლედ შერთულ გრაგნილს და მუდმივ ძბაზე ჩართულ აგზნების გრაგნილს:

$$0 = \frac{d\psi_d}{d\tau} - (1-s)\psi_q + r_a i_a;$$

$$0 = \frac{d\psi_d}{d\tau} + (1-s)\psi_d + r_a i_q;$$

$$U_f = \frac{d\psi_f}{d\tau} + r_f i_f;$$

$$0 = \frac{d\psi_D}{d\tau} + r_D i_D;$$

$$0 = \frac{d\psi_Q}{d\tau} + r_Q i_Q. \quad (4-5)$$

(30) განტოლებები ოპერატიულ ფორმაში ასე ჩაიწერება:

$$U_a(p) = p\psi_a(p) - \psi_{a0} - (1-s)\psi_q(p) + r_a i_a(p);$$

$$U_q(p) = p\psi_q(p) - \psi_{q0} + (1-s)\psi_d(p) + r_a i_q(p);$$

$$0 = p\psi_f(p) - \psi_{f0} + r_f r_f(p);$$

$$0 = p\psi_D(p) - \psi_{D0} + r_D r_D(p);$$

$$0 = p\psi_Q(p) - \psi_{Q0} + r_Q r_Q(p). \quad (4-6)$$

სადაც ψ_{a0} , ψ_{q0} , ψ_{f0} , ψ_{D0} , ψ_{Q0} – შესაბამისი ნაკადთშებმების საწყისი მნიშვნელობებია.

ნაკად შებმებისათვის მივიღებთ განტოლებებს:

$$\psi_a(p) = x_a i_a(p) + x_{ad} i_f(p) + x_{ad} i_D(p);$$

$$\psi_q(p) = x_q i_q(p) + x_{aq} i_Q(p);$$

$$\psi_f(p) = x_f i_f(p) + x_{ad} i_a(p) + x_{fD} i_D(p);$$

$$\psi_D(p) = x_{ad} i_a(p) + x_{fD} i_f(p) + x_D i_D(p);$$

$$\psi_Q(p) = x_{aq} i_q(p) + x_Q i_Q(p). \quad (4-7)$$

ნაკად შებმების მნიშვნელობები ოპერატიული წინაღობების გათვალისწინებით ტოლია:

$$\begin{aligned} x_d(p), x_q(p) \\ \psi_d(p) = x_d(p)i_d(p); \\ \psi_q(p) = x_q(p)i_q(p). \end{aligned} \quad (4-8)$$

დავუშვათ $\psi_r = 0$ და ჩავწეროთ სტატორის წრედის განტოლებები მატრიცულ სახეში:

$$\begin{bmatrix} U(p) + \psi_{d0} \\ U_q(p) + \psi_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} px_d(p) & - (1-s)x_q(p) \\ (1-s)x_d(p) & px_q(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d(p) \\ i_q(p) \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

(35) განტოლებათა სისტემიდან ვპოულობთ სტატორის დენებს

$$i_d(p) = \frac{[U_d(p) + \psi_{d0} + [U_q(p) + \psi_{q0}]](1-s)}{[p^2 + (1-s)^2] x_d(p)}; \quad (4-10)$$

$$i_q(p) = \frac{[U_q(p) + \psi_{q0} - [U_d(p) + \psi_{d0}]](1-s)}{[p^2 + (1-s)^2] x_q(p)}. \quad (4-11)$$

u_a, u_b, u_c ფაზური ძაბვით წრფივი გარდაქმნების ფორმულებით გამოისახება სტატორის ძაბვის d, q შემდგენები:

$$U_d = \frac{2}{3} \left[U_a \cos \alpha + U_b \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + U_c \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right];$$

$$U_q = \frac{2}{3} \left[U_a \sin \alpha + U_b \sin \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + U_c \sin \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right],$$

სადაც

$$U_a = U_c \cos \gamma; \quad \gamma = \tau + \gamma_0; \quad U_b = U_c \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$\tau = \omega_s t; \quad U_c = U_c \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad \alpha = \varphi + \frac{\pi}{2}.$$

ძრავულ რეჟიმში მუშაობისას $\varphi = (1-s)\gamma + \varphi_0 + \varphi = -s\tau + \theta_0$ და u_d და u_q ასე გამოსახება;

$$U_d = U_c \sin(s\tau - \theta_0) = U_c \sin(-\theta);$$

$$U_q = U_c \sin(s\tau - \theta_0) = U_c \cos(-\theta),$$

ე.ი. როტორის მუდმივი კუთხური სიჩქარით ბრუნვისას $s = \text{const}$, u_d და u_q წარმოადგენენ დროის ჰარმონიულ ფუნქციებს.

θ კუთხის დადებითი მნიშვნელობა შეესაბამება გენერატორულ რეჟიმს, ხოლო უარყოფითი – ძრავულ რეჟიმს. შესაბამისად გვაქვს: $u_d = u_c \sin \theta$ $u_q = u_c \cos \theta$. ძრავული რეჟიმისთვის u_d და u_q ძაბვების:

$$U_d(p) = \frac{U_{q0}s + U_{d0}(p)}{p^2 + s^2};$$

$$U_q(p) = \frac{-U_{d0}s + U_{q0}(p)}{p^2 + s^2}.$$

ჩავსვათ ეს მნიშვნელობები (36) – ში და მივიღებთ დენების ოპერატორულ გამოსახულებას:

$$i_d(p) = \{p^3\psi_{d0} + p^2[U_{d0} + \psi_{q0}(1-s)] + p[U_{q0}(1-2s) + \psi_{d0}s^2] + U_{d0}(1-s) + \psi_{q0}s^2(1-s)\} \{(p^2 + s)[p^2 + (1-s)^2]x_d(p)\}^{-1}$$

$$i_q(p) = \{p^3\psi_{q0} + p^2[U_{q0} - \psi_{d0}(1-s)] - p[U_{d0}(1-2s) - \psi_{q0}s^2] + U_{q0}(1-s) + \psi_{d0}s^2(1-s)\} \{(p^2 + s)[p^2 + (1-s)^2]x_q(p)\}^{-1}. \quad (4-12)$$

სადაც $u_d = u_c \sin \theta$; $u_q = u_c \cos \theta$. როტორის სინქრონული სიჩქარით ბრუნვისას ძრავას ქსელში ჩართვისას ე.ი. $S = 0$ და θ – ს საწყისი მნიშვნელობა θ_0 ტოლია კუთხის მნიშვნელობისა დამყარებულ რეჟიმში (38) ტოლობები მიიღებს სახეს:

$$i_d(p) = \frac{p^2\psi_{d0} + p(U_{d0} + \psi_{q0}) + U_c}{p(p^2 + 1)x_d(p)};$$

$$i_q(p) = \frac{p^2\psi_{q0} + p(U_{q0} - \psi_{d0}) - U_{d0}}{p(p^2 + 1)x_q(p)}. \quad (4 - 13)$$

i_d და i_q დენების ცვლილების ხასითი დამოკიდებულია (39) – ის მახასიათებელი განტოლებების ფესვებზე. $p = 0$ ნულოვანი ფესვი შეესაბამება დენების დამყარებულ მნიშვნელობას. $i_d(n)$ და $i_q(n)$ – ს

$$i_{dn} = \frac{U_c \cos \theta_0}{x_d(p)_{p=0}}; \quad i_{qn} = \frac{U_c \sin \theta_0}{x_q(p)_{p=0}}. \quad (4 - 14)$$

მატრიცულ სახეში გვაქვს განტოლებათა სისტემა.:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{aD} \\ px_{ad} & px_{f+r_f} & px_{fD} \\ px_{aD} & px_{fD} & px_D + r_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d(p) \\ i_f(p) \\ i_D(p) \end{bmatrix}. \quad (4 - 15)$$

(41) დან განვსაზღვროთ

$$i_d(p) = \frac{\psi_d(p)M_1(p)}{\Delta p},$$

სადაც Δp – სისტემის დეტერმინანტია;

$M_1(p)$ – სისტემის მინორი

ოპერატიული წინალობა $x_d(p) \frac{\Delta p}{M_1(p)}$, ან

$$x_d(p) = x_d - [p^2(x_{ad}x_d - 2x_{ad}x_{fd}x_{ad} + x_{ad}^2x_f) + p(x_{ad}^2r_D + x_{ad}r_f)] \\ [p^2(x_f - x_{fd}^2) + p(x_{ad}^2 + x_{ad}r_f)][p^2(x_f x_D - x_{ad}^2) + p(x_f r_D + x_D r_f) + r_f r_D]^{-1}.$$

როცა $p = 0$, $x_d(p) = x_d$, ე.ი. ოპერატიული წინალობა დამყარებულ რეჟიმში ტოლია სინქრონული ინდუქციური წინალობა. გრაგნილების დროს მუდმივობის გათვალისწინებით გვაქვს:

$$x_d(p) = \frac{T_d''p + 1)(T_d'p + 1)}{T_{d0}p + 1)(T_{d0}'p + 1)} x_d, \quad (4 - 16)$$

სადაც $T_d' = \frac{x_d'}{x_d} T_{d0}$ აგზნების გრაგნილის დროს მუდმივა მოკლედ

შერთულ გრაგნილსა და გახსნილი დემპფერული გრაგნილის შემთხვევაში.

x_d' – სტატორის გრაგნილის გარდამავალი წინალობაა. $T_{d0} \approx \frac{x_D}{r_D}$, გრძივი

დემპფერული კონტურის დროს მუდმივა სტატორისა და აგზნების

კონტურების მოკლედ შერთვისას; $x_D'' = x_D' \frac{x_d'}{x_d''}$ – იმავე პირობებში

გრძივი დემპფერული კონსტრუქციის ეკვივალენტური ინტუქციური

წინალობა; x_d'' – სტატორის გრძივი ზეგარდამავალი წინალობა; x_D' – გრძივი

დემპფერული კონტურის ეკვივალენტური ინდუქციური წინალობაა

სტატორსა და აგზნების გრაგნილების გახსნის შემთხვევაში. d და D

გრაგნილების კავშირის კოეფიციენტების მხედველობაში მიღებით:

$$x_D' = x_D - \frac{x_{aD}^2}{x_d} = x_D \delta_{aD},$$

სადაც δ_{aD} – სტატორის და დემპფერულ კონტურს შორის ფანტვის

კოეფიციენტი. ანალოგიურად განისაზღვრება

$x_q(p)$ ოპერატიული წინალობა:

$$\begin{bmatrix} \psi_q(p) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q & x_{aQ} \\ px_{aQ} & px_Q + r_D \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} i_q(p) \\ i_Q(p) \end{bmatrix}$$

საიდანაც

$$i_q(p) = \frac{\psi_q(p)(px_Q + r_Q)}{x_q(px_Q + r_Q) - px_{aQ}^2};$$

$$x_q(p) = x_q - \frac{px_{aQ}^2}{px_Q + r_Q}.$$

$$\delta_{qQ} = 1 - \frac{x_{aQ}^2}{x_Q x_q}.$$

მხედველობაში მივიღოთ, რომ აქ δ_{qQ} – სტატორის გრაგნილებსა და დემპფერულ კონტურს შორის ფანტვის კოეფიციენტი, ხოლო $T_Q = \frac{x_Q}{r_Q}$, სადაც T_Q – არის Q დემპფერული გრაგნილის დროის მუდმივა.

(43) განტოლება ასე შეიძლება ჩავწეროთ:

$$x_q(p) = \frac{pT_Q \sigma_{qQ} + 1}{pT_Q + 1} x_q,$$

$$\text{ან } x_q(p) = x_q \frac{pT_q'' + 1}{pT_Q + 1}.$$

აქ T_q'' არის Q დემპფერული გრაგნილის დროს მუდმივა გახსნილი სტატორის გრაგნილის შემთხვევაში.

ჩავსვათ (42) და (44) (39) გამოსახულებაში და განვსაზღვროთ მახასიათებელი განტოლების ფესვები. $p_2 = -\frac{1}{T_d''}$ და $p_3 = -\frac{1}{T_d'}$ განსაზღვრავენ $i_{da}(\tau)$ დენის აპერიოდულ შემდგენს, ხოლო $p_{4,5} = \pm j$ მოგვცემს $i_{d2}(\tau)$ დენის ჰარმონიულ შემდგენს.

საწყის განტოლებებში არ იყო გათვალისწინებული აქტიური წინაღობები, ამის გამო მახასიათებელ განტოლების ფესვებში არ გვაქვს ნამდვილი ნაწილი, რომელიც ითვალისწინებს შესაბამისი დენის შემდგენის მიღევას ამ შემდგენის მიღევა ნაწილობრივ შეიძლება განისაზღვროს ნაკადთშემშლის მუდმივობის პრინციპიდან ზეგამტარი კონტურებისთვის. თვლით როტორის წრედის წინააღობები $r_f = 0$, $r_D = r_Q = 0$, ამის გამო $x_d(p)$, $x_q(p)$ დებულობს მნიშვნელობებს:

$$x_d(p) = x_d'', \quad x_q(p) = x_q''.$$

სტატორის ძაბვების განტოლებები სტატორის გრაგნილის r_a აქტიური წინაღობის მხედველობაში მიღებით ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{bmatrix} U_d(p) + \psi_{d0} \\ U_q(p) + \psi_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} px_d'' & -(1-s)x_q'' \\ (1-s)x_d'' & px_q'' + r_a \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} i_d(p) \\ i_q(p) \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

(45) სისტემის დეტერმინანტს აქვს სახე:

$$\Delta_2(p) = (px_d'' + r_a)(px_q'' + r_a) + (1-s)^2 x_d'' x_q''.$$

(45) –ის ფესვები

$$p_{1,2} = -\frac{r_a}{2} \frac{(x_d'' + x_q'')}{x_d'' + x_q''} \pm j \sqrt{\frac{r_a^2}{4} \frac{(x_d'' + x_q'')^2}{(x_d'' - x_q'')^2} - \frac{r_a}{x_d'' x_q''} - (1-s)}.$$

ამ ფესვების ნამდვილი ნაწილი α განსაზღვრავს i_d , i_q დენების ჰარმონიული შემდგენის მიღევას:

$$T_a = -\frac{1}{a} = \frac{2x_d'' x_q''}{r_a(x_d'' - x_q'')} = \frac{x_2}{r_a},$$

სადაც x_2 დემპფერული გრაგნილის მქონე მანქანის უკუმიმდევრობის წინაღობაა.

დავუშვათ, რომ მანქანის ყველა გრაგნილი იდეალური გამტარებია ($r_d = 0$, $r_f = 0$, $r_D = 0$, $r_Q = 0$). როტორის ბრუნვის სიჩქარე ახლოსაა სინქრონულთან. ასეთი პირობები გვაქვს კვების ხანმოკლე შეწყვეტისას. ამ პირობებში ოპერატორული დენების გამოსახულებებს აქვთ სახე:

$$\begin{aligned} i_d(p) &= -\frac{p^2 \psi_{d0} + p u_{d0} + p \psi_{q0} + U_{q0}}{p(p^2 + 1)x_d''}; \\ i_q(p) &= -\frac{p^2 \psi_{q0} + p u_{q0} - p \psi_{d0} - U_{d0}}{p(p^2 + 1)x_q''}. \end{aligned} \quad (4-18)$$

ψ_d და ψ_q ნაკადუმებები კვების შეწყვეტის შემთხვევაში განისაზღვრება ტოლობებით:

$$\begin{aligned} \psi_d(p) &= -x_{ad}(p)i_f(p); \\ \psi_q(p) &= -x_{aq}i_q(p), \end{aligned} \quad (4-19)$$

სადაც $x_{ad}(p)$, $x_{aq}(p)$ – შესაბამისად ღზის რეაქციის ოპერატიული წინაღობაა გრძივ ღერძზე სტატორის გახსნილი გრაგნილის და შეკრული დემპფერული გრაგნილის შემთხვევაში და სტატორის გრაგნილსა და განივ დემპფერულ გრაგნილს შორის ურთიერთინდუქციის წინაღობა.

(41) სისტემიდან განისაზღვრება $x_{ad}(p)$:

$$x_{ad}(p) = \frac{\psi_a(p)}{i_f(p)} = \frac{\Delta_1(p)}{M_2(p)},$$

სადაც $M_2''(p)$ არის (41) სისტემის მინორი. ხედველობაში მივიღოთ მაშინ

$$\delta_D = 1 - \frac{x_{aD}}{x_a},$$

$$x_{ad}(p) = x_{ad} \frac{pT_{D\sigma D+1}}{pT_{D+1}},$$

(48) სისტემა (49) – ის გათვალისწინებით მიიღებს სახეს:

$$\psi_a(p) = i_f(p) \frac{pT_{D\sigma D+1}}{pT_{D+1}};$$

$$\psi_q(p) = i_q(p)x_{aq}.$$

აგზნების $i_f(p)$ განისაზღვრება განტლებიდან

$$\frac{U_f}{p} = x_{f0}(p)pi_f(p) - \psi_{f0} + r_f i_f(p) \quad (4-20)$$

სადაც $x_{f0}(p)$ აგზნების გრაგნილის სპექტრული წინაღობაა გახსნილი სტატორის გრაგნილსა და შეკრული გრაგნილის დემპფერული კონტურის შემთხვევაში.

$x_{f0}(p)$ განისაზღვრება განტოლებათა სისტემიდან:

$$\psi_f(p) = x_f i_f(p) + C;$$

$$0 = p\psi_D(p) + r_D i_D P. \quad (4-21)$$

$p\psi_D(p) = x_{fD} i_f(p) + x_{fD} i_f(p)$ ტოლობის გათვალისწინებით (4-20)

განტოლებათა სისტემა მატრიცულ სახეში ასე ჩაიწერება:

$$\begin{bmatrix} \psi_f(p) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f & x_{fD} \\ px_{fD} & px_D + r_D \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} i_f(p) \\ i_D(p) \end{bmatrix}$$

აქედან განვსაზღვრავთ

$$i_f(p) = \frac{\psi_f(p)(Px_D + r_D)}{x_f(p)x_D + r_D - px_{fD}^2}$$

ავნიშნოთ $x_{f0}(p) = \psi_f(p)/i_f(p)$, მაშინ

$$x_{f0}(p) = x_f - \frac{px_{fD}^2}{px_D + r_D}. \quad (4-22)$$

x_{fD} – ს გათვალისწინებით (52) შეიძლება ასე ჩაიწეროს

$$x_{f0}(p) = \frac{pT_D^{\sigma_{fD}} + 1}{pT_D + 1}.$$

(50) ტოლობიდან დენი ასე განისაზღვრება:

$$i_f(p) = \frac{(u_f/p) + \psi_{f0}}{px_{f0}(p) + r_f}. \quad (4-23)$$

ჩავსვათ (52) და (53) – ში და მხედველობაში მივიღოთ $T_f \gg T_D$,

$$i_f(p) = \frac{[(u_f/p) + \psi_{f0}](pT_D + 1)}{\left(p + \frac{1}{T_D^{\sigma_{fD}}}\right) \left(p + \frac{1}{T_f}\right) x_f T_D^{\sigma_{fD}}}. \quad (54)$$

სინქრონული კომპესატორისათვის გამშვები გრაგნილით შეიძლება დავწეროთ $x_{ad} \ll x_D$; $x_{fD}^2/x_f \ll x_D$, მაშინ ნაკადთშემა გრძივ ღერძზე

$$\psi_d(\tau) = \left(\frac{u_f}{r_f} x_{ad} + \psi_{f0} \frac{x_{ad}}{x_f} - \frac{u_f}{r_f} x_{ad} \right) e^{-\frac{\tau}{T_f}} \quad (4-25)$$

ψ_{f0} ნაკად შემა განისაზღვრება ძრავას წინა დამყარებული რეჟიმიდან. დამყარებულ რეჟიმში აგზნების გრაგნილის ნაკად შემა

$$\psi_f = I_f x_f + i_d x_{ad}, \quad (4-26)$$

სადაც $I_f = \frac{u_f}{r_f}$ – აგზნების დენის დამყარებული მნიშვნელობა;

i_d – სტატორის დამყარებული დენი d ღერძის გასწვრივ.

სინქრონული ძრავას მუშაობისას დამყარებულ რეჟიმში დემპფერულ გრაგნილებში დენები არ გვაქვს ამიტომ გრძივი ღერძის გასწვრივ ნაკადთშემა ასე განისაზღვრება

$$\psi_d = E_0 + x_d i_d.$$

თუ ჩავთვლით, რომ $\psi_f = \psi_{f0}$ მივიღებთ

$$\psi_{f0} \frac{x_{ad}}{x_f} = \frac{u_f}{r_f} x_f \frac{x_{ad}}{x_f} + \frac{i_d x_{ad}^2}{x_f}.$$

ბოლო გამოსახულების მარჯვენა მხარე გავამრავლოთ და გავყოთ x_d – ზე, მივიღებთ

$$\psi_{f0} \frac{x_{ad}}{x_f} = I_f x_{ad} + \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d} i_d x_d, \quad (4-27)$$

სადაც $I_f x_{ad} = E_0$ – ელექტრომამოძრავებელი ძალა (უქმი სვლის) $i_d x_d = E_d$. ძაბვის ვარდნა სინქრონულ წინაღობებზე გრძივი დენისაგან. $x_{ad}^2(x_f x_d) = \mu$ – აგზნების გრაგნილსა და გრძივი ღერძის გასწვრივ სტატორის გრაგნილს შორის კავშირის კოეფიციენტი. (57) ამ ტოლობის გათვალისწინებით ასე ჩაიწერება:

$$\psi_{f0} \frac{x_{ad}}{x_f} = E_0 + \mu E_d = E'_d. \quad (4-28)$$

ეს არის სტატორის გარდამავალი წინაღობა ემმ გარდამავალი წინაღობის იქეთ წინა დამყარებულ რეჟიმში.

$$\psi_d(\tau) = E_0 + (E'_d - E_0) e^{-\frac{\tau}{T_f}}. \quad (4-29)$$

საწყისი პირობების გათვალისწინებით $i_d(p)$, $i_q(p)$ ოპერარტიული დენები მიიღებენ სახეს:

$$i_d(p) = \frac{p^2 \psi_{d0} + u_{d0} p + u_{q0}}{p(p^2 + 1)x_d''};$$

$$i_q(p) = \frac{p[u_{q0} - \psi_{d0}] - u_{d0}}{p(p^2 + 1)x_q''}. \quad (4-30)$$

დენების ჰარმონიული შემდგენები $p = \pm j$ უგულვებელყოფით ტოლია:

$$i_{d2} = \frac{u_{d0}}{x_d''} \sin \tau - \left(\frac{u_{q0} - \psi_{d0}}{x_d''} \right) \cos \tau;$$

$$i_{q2} = \frac{u_{d0}}{x_q''} \cos \tau - \left(\frac{\psi_{d0} - u_{q0}}{x_q''} \right) \sin \tau. \quad (4-31)$$

$\alpha = -1/T_a$ მიღვევის კოეფიციენტის გათვალისწინებით

$$i_{d2}(\tau) = \left(\frac{u_{d0}}{x_d''} \sin \tau - \frac{u_{q0} - \psi_{d0}}{x_d''} \cos \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}};$$

$$i_{q2}(\tau) = \left(\frac{u_{d0}}{x_q''} \cos \tau - \frac{u_{d0} - \psi_{q0}}{x_q''} \sin \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}}.$$

(30) განტოლებათა სისტემის ამოხსნით განისაზღვრება სტატორის სრული დენები, როგორც ჯამი ჰარმონიული ზეგამტარი, გარდამავალი და დამყარებული მდგენელებისა

$$\begin{aligned}
 i_{d1}(\tau) &= \left(\frac{u_{q0}}{x_d''} \sin \tau - \frac{u_{q0} - \psi_{d0}}{x_d''} \cos \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}} + \\
 &+ u_{q0} \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) - \frac{\psi_{d0}}{x_d'} + u_{q0} \frac{1}{x_d} ; \\
 i_{q1}(\tau) &= \left(\frac{u_{d0}}{x_q''} \cos \tau - \frac{\psi_{d0} - u_{q0}}{x_q''} \sin \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}} - \\
 &- u_{d0} \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\frac{\tau}{T_q'}} - u_{d0}/x_q . \quad (4-32)
 \end{aligned}$$

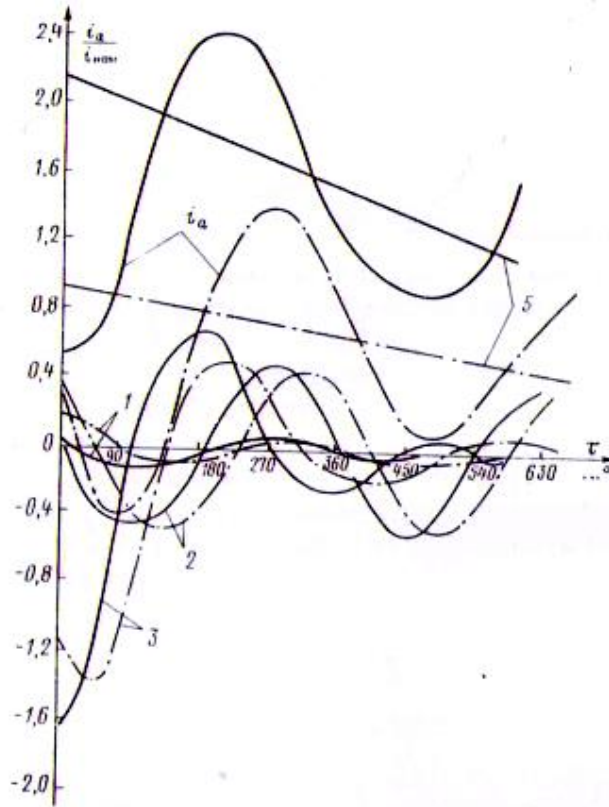
სრული დენები $i_{d1}(\tau)$, $i_{q1}(\tau)$ კომპესატორის ჩართვისას ხანმოკლე გამორთვის შემდეგ:

$$\begin{aligned}
 i_d(\tau) &= \left(\frac{u_{d0}}{x_d''} \sin \tau - \frac{u_{q0} - \psi_{d0}}{x_d''} \cos \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}} + \\
 &+ (u_{q0} - \psi_{d0}) \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{\tau}{T_d'}} \\
 &+ (u_{q0} - \psi_{d0}) \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{\tau}{T_d}} - \\
 &- \frac{\psi_{d0} - E_0}{x_d} e^{-\frac{\tau}{T_f}} + \frac{u_{q0} - E_0}{x_d} ; \\
 i_q(\tau) &= \left(\frac{u_{d0}}{x_q''} \cos \tau - \frac{\psi_{d0} - u_{q0}}{x_q''} \sin \tau \right) e^{-\frac{\tau}{T_a}} - \\
 &- u_{d0} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\frac{\tau}{T_d'}} - \frac{u_{q0}}{x_q} . \quad (4-33)
 \end{aligned}$$

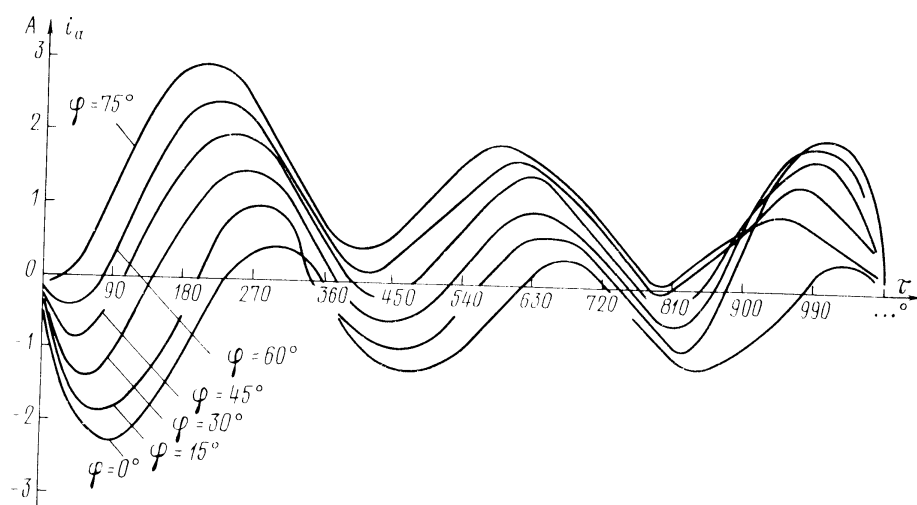
i_d და i_q დენებიდან ფაზურ დენებზე გადასვლა ხორციელდება წრფივი გარდაქმნები ფორმულებით:

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_d(\tau) \cos(\tau + a_0) - i_q(\tau) \sin(\tau + a_0) ; \\
 i_b &= i_d(\tau) \cos\left(\tau + a_0 - \frac{2\pi}{3}\right) - i_q(\tau) \sin\left(\tau + a_0 - \frac{2\pi}{3}\right) ; \\
 i_c &= i_d(\tau) \sin\left(\tau + a_0 + \frac{2\pi}{3}\right) - i_q(\tau) \sin\left(\tau + a_0 + \frac{2\pi}{3}\right) .
 \end{aligned}$$

ფაზური დენების გამოსახულებები სამართლიანია უფრო ზოგადი შემთხვევისათვის. რეჟიმის ხანმოკლე შეცვლისას. ნახ. 32 – ზე ნაჩვენებია ფაზური დენის აპერიოდული შემდგენები.



ნახ. 32. ფაზური დენის აპერიოდული მდგენელი



ნახ. 33. დამოკიდებულება $i_a = f(t)$ სხვადასხვა კუთხეების ჩართვის შემთხვევაში

თავი V

უმალლესი რიგის ჰარმონიკების შემცირება მდგ - ის მოწყობილობებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია

5.1 ფილტრების შერჩევის ლოგიკა

ჰარმონიკული დამახინჯების მიხედვით ფილტრების შერჩევას საფუძვლად უდევს 34-ე ნახაზზე მოცემული სქემა:

სადაც ,

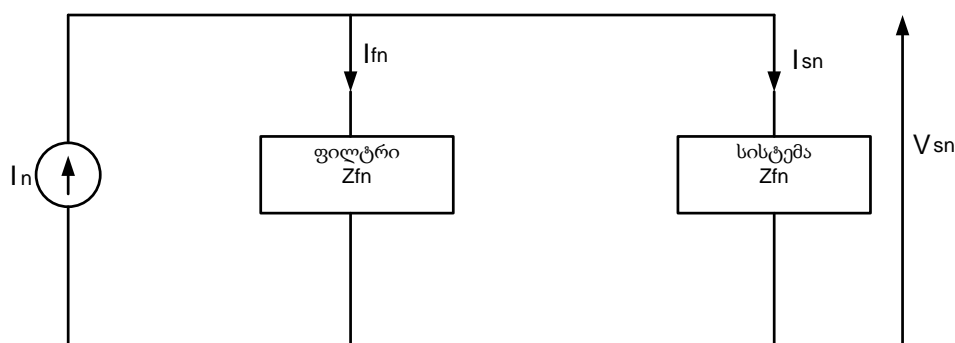
I_n - კონვერტორის მიერ გენერირებული ჰარმონიკული დენებია;

I_{fn} - ფილტრებში გამავალი ჰარმონიკული დენებია;

I_{sn} - მკვებავ სისტემაში შეჭრილი ჰარმონიკული დენებია;

Z_{fn} - ფილტრის ჰარმონიკული წინაღობა;

Z_{sn} - მკვებავი სისტემის ჰარმონიკული წინაღობა.



ნახ. 34. სისტემის წინაღობის მიხედვით ფილტრების შეფასების სქემა

ძაბვის და დენის დამახინჯებებს თითოეული ჰარმონიკისთვის გამოვთვლით შემდეგი გამოსახულებიდან

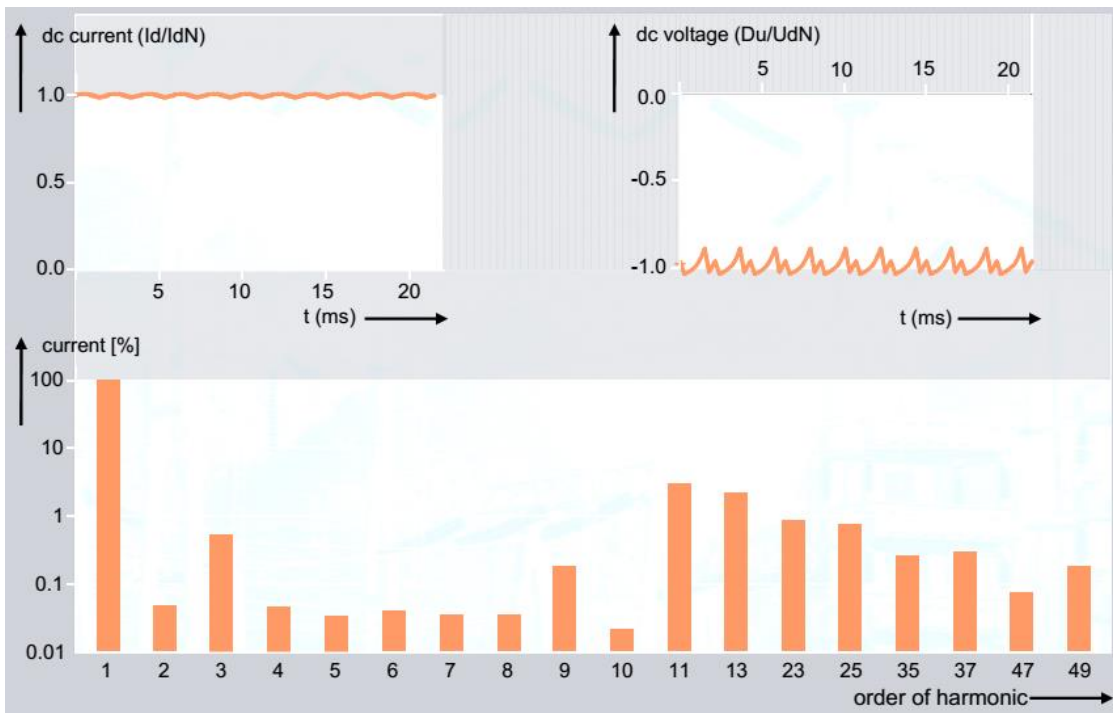
$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n \quad (20)$$

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

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 რიგის ჰარმონიკების ჩახშობის თვალსაზრისით არსებობს ფილტრების შერჩევის სხვადასხვა მეთოდი.

ქვემოთ მოცემულ სქემაზე ნაჩვენებია ჩატარებული კვლევის საფუძველზე სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკების უაროფითი გავლენა ქსელზე. აქვე უნდა აღინიშნოს რომ სქემაზე მკვეთრად არის გაზრდილი 11 და 13 რიგის ჰარმონიკა, შესაბამისად 11 და 13 რიგის ჰარმონიკები მოქმედებენ ყველაზე მეტად ქსელის პარამეტრებზე.



ნახ. 35. 12-პულსიანი ხიდის დენის ჰარმონიკები

$$v = k * p \pm 1. \quad p = 12 \quad (p = 12 \text{ იმპულსი})$$

დენის ჰარმონიკების ამპლიტუდა:

$$I_N = \frac{1}{n} * I_1$$

მუდმივი დენის სისტემაში	ცვლადი დენის ქსელში	
$f_{dc} > f_0$	$f_{dc} + f_0^a$	$f_{dc} - f_0^b$
$f_{dc} = f_0$	$2f_0^a$	$0, 0^c$
$f_{dc} < f_0$	$f_{dc} + f_0^a$	$f_0 - f_{dc}^a$
$f_{dc} = 0$	f_0^a	0
f_{dc} - არის სიხშირის ურთიერთგავლენა გარდამქმნელის მუდმივი დენის მხარეს. f_0 - არის სიხშირის ურთიერთგავლენა გარდამქმნელის ცვლადი დენის მხარეს. a - არის პირდაპირი მიმდევრობის b - არის უარყოფითი მიმდევრობის c - მუდმივი დენი		

ცხრილი. 4. დომინანტური სიხშირეები ცვლად და მუდმივ დენში, ასევე მათი ჰარმონიკების ურთიერთქმედება

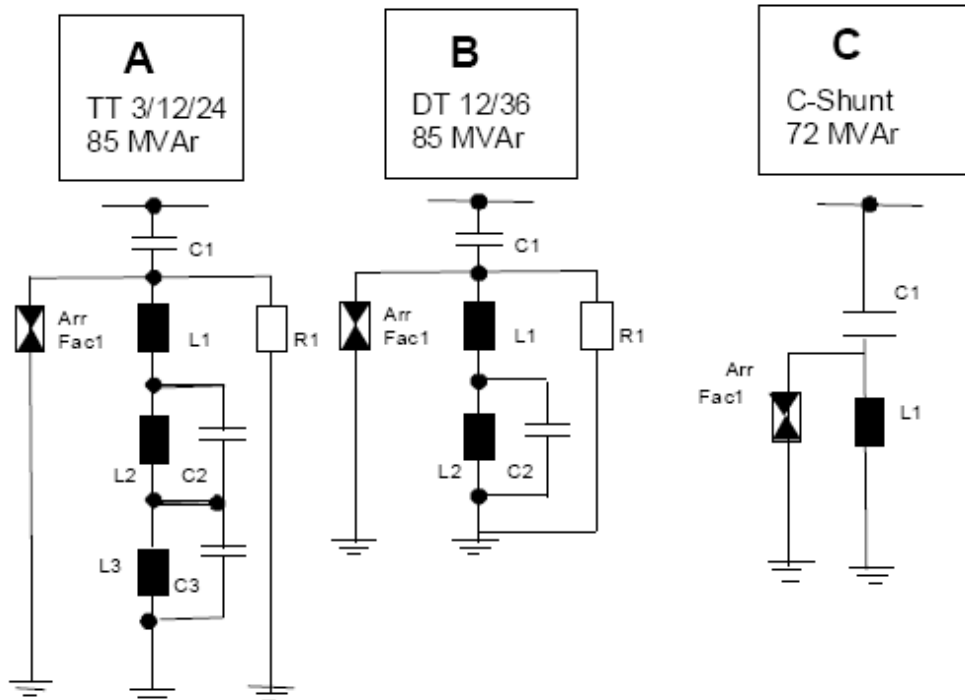
5-2. HVDC სისტემის მიერ გენერირებული მაღალი რიგის

დენის ჰარმონიკების გავლენა და მისი შემცირების ხერხები

როგორც ვიცით, გადამცემ ხაზში მაღალი რიგის ჰარმონიკები უარყოფით გავლენას ახდენს ქსელის პარამეტრებზე. მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემცირების მიზნით ღონისძიებებს ატარებენ შემდეგი მიმართულებით:

- 1) დენის ჰარმონიკების შეზღუდვა ხაზში;
- 2) გარდამქმნელის ფაზათა რიცხვის გაზრდას, გალების (რეგულირების) კუთხეების შემცირებას;
- 3) ქვესადგურის გამოსავალი მოწყობილობების საშუალებით უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები ჩახშობას და ფილტრაციას;
- 4) ჰარმონიკების მილევის გაზრდის მიზნით ხაზის პარამეტრებზე ზემოქმედებას.

ნახ. 36 - ზე ნაჩვენებია ქვესადგურის გამოსავალი მოწყობილობის ფილტრების სქემა.



ნახ. 36. ფილტრების სქემები

პარამეტრები ნახ. 36-ზე L_d , C_g და L_ϕ - შეირჩევა ისეთ ნაირად, რომ მივიღოთ დაბალი სიხშირის ფილტრები სქემებში გამოყენებულია სამი LC რომლებიც, აწყობილია რეზონანსში ერთ - ერთ ჰარმონიკაზე, შეიცავს მართული დენი.

მდგ - ის მილევის კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით იყენებენ ფოლად - ალუმინის სადნებს. ფოლადის სადნები განლაგებულია ალუმინის სადნები გარეთ წრეხაზზე. ზედაპირული ეფექტის გამო მაღალი სიხშირეების შემთხვევაში იზრდება სადენის წინაღობა. აქტიური წინაღობის გაზრდასთან ერთად ამ სადენში იზრდება შიგა ინდუქციურობაც, რომელიც ნაკლებია ხაზის ინდუქციურობაზე. ამიტომ ხაზის ტალღური წინაღობა $Z \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$ პრაქტიკულად არ იზრდება. გამოთვლებმა აჩვენა რომ ხაზის გასწვრივ ჰარმონიკებიკონტურში „ორი პოლუსი - მიწა“ მცირდება 2-3 - ჯერ, ხოლო კონტურში „პოლუსი - პოლუსი“ უფრო მეტად. აღნიშნული კონსტრუქციის სადენი უფრო მაღალი სიმტკიცისაა.

ქვემოთ მოყვანილია ცხრილი სადაც მოყვანილია სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკების გავლენა ქსელზე და ზოგადი დამახინჯების კოეფიციენტი სხვადასხვა სიმძლავრეზე გამოსახული პროცენტებში.

შედეგების გავლენა								
დატვ.	შესა-ზე		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1
ჰარმონ	ზღვრ.	Max Dn %-ში						
3	1	0.99	0.77	0.77	0.87	0.96	0.84	0.81
5	1	0.22	0.01	0.03	0.05	0.13	0.16	0.22
7	1	0.38	0.01	0.04	0.07	0.17	0.26	0.38
11	1	0.87	0.31	0.40	0.53	0.77	0.60	0.55
13	1	0.69	0.28	0.36	0.46	0.63	0.53	0.48
23	1	0.75	0.54	0.67	0.74	0.54	0.27	0.50
35	1	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03
37	1	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03
47	1	0.14	0.13	0.11	0.05	0.10	0.07	0.12
Deff	2	1.54	1.01	1.13	1.33	1.47	1.16	1.22
TIF	50	44.96	34.32	39.86	43.98	34.68	19.59	32.87

ცხრილი. 5. ჰარმონიკების გავლენა 500კვ-ში.

- ინდივიდუალური დამახინჯება: $D_n = \frac{U_n}{U_1} * 100[\%];$
- ძაბვის საერთო დამახინჯება: $D_{tot} = \sum_{n=2}^{50} D_n;$
- დამახინჯების ზოგადი ეფექტი: $D_{eff} = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} D_n};$
- სატელეფონო ფაქტორის ხელშემშლა: $TIF = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} (\frac{U_n}{U_1} * F_n)^2}.$
- n - ჰარმონიკების რიგითობა;
- U_n - ფაზური ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის ჰარმონიკა;

7. U_1 - ნომინალური ფაზური ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის ძირითადი სიხშირე;
8. F_n - ჰარმონიკის შეწონილი ფაქტორი.

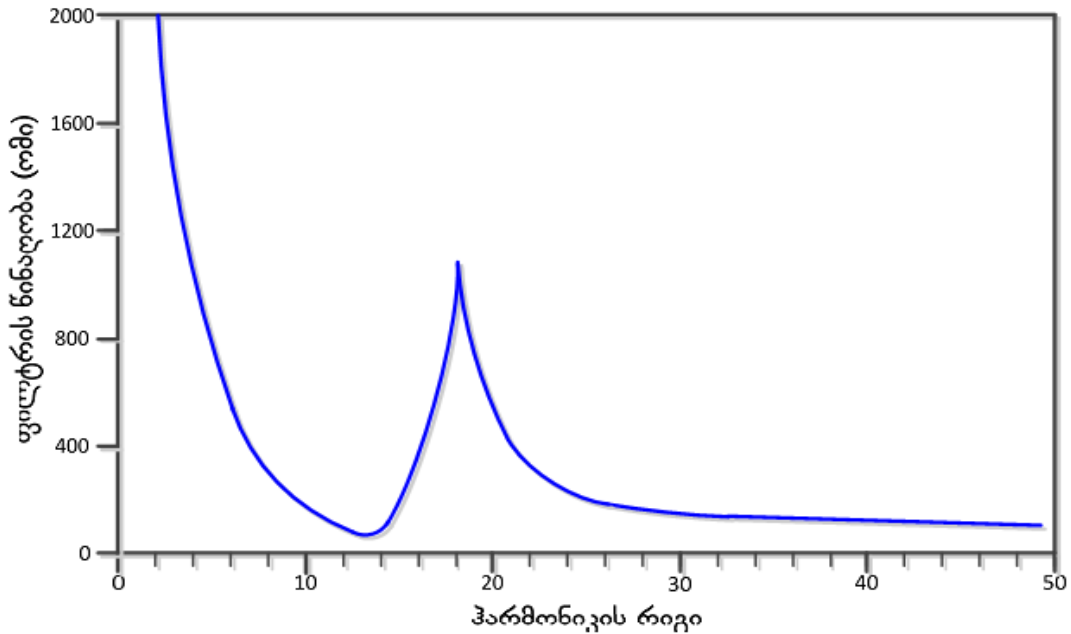
5.3 ქ/ს ახალციხის კონვერტორის ცვლადი ძაბვის ფილტრები

ჩატარებული კვლევის საფუძველზე მიღებული ჰარმონიკული დამახინჯების კოეფიციენტთა მნიშვნელობების გათვალისწინებით, ახალციხის კონვერტორული ქვესადგურისთვის 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.11, 12) აღწერილია V თავის ქვეპარაგრაფებში.

5.3.1 TT 3/12/24 ფილტრი

A1 ბლოკი წარმოადგენს TT 3/12/24 (Triple Tuned - სამრეზონანსიანი, გათვლილი სამ სიხშირეზე) ტიპის ფილტრს, რომელიც 50 ჰერც სიხშირეზე გენერირებს 85 მგვარ რეაქტიულ სიმძლავრეს. მისი წინააღობის სიხშირული მახასიათებლიდან (ნახ. 37) კარგად ჩანს, რომ ყველაზე დაბალი წინააღობა 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 ჰარმონიკის სიხშირეზე). მე-19 რიგის ჰარმონიკამდე ფილტრის წინააღობა იზრდება, შემდეგ მცირდება და 24-ე ჰარმონიკისა უფრო მაღალ სიხშირულ დიაპაზონში აქვს მცირე წინააღობა.

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

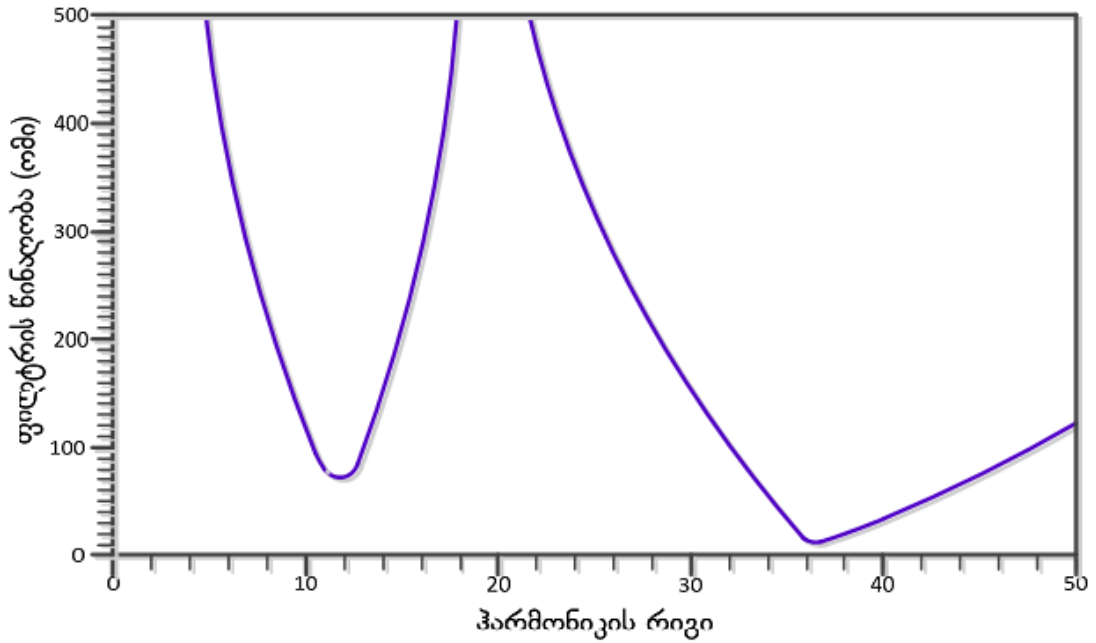


ნახ. 37. TT 3/12/24 ფილტრის სიხშირული მახასიათებელი

5.3.2 DT 12/36 ფილტრი

B1 ბლოკი წარმოადგენს DT 12/36 (Double Tuned –ორრეზონანსიანი, გათვლილია ორ სიხშირულ ზოლზე ტიპის ფილტრის მოდულს, რომლის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე 50 ჰერცზე შეადგენს 85 მგვარ-ს. მისი წინააღობის სიხშირული მახასიათებლიდან (ნახ. 38) კარგად ჩანს, რომ პირველი რეზონანსული კონტურის წარმოქმნა ხდება მე-12 რიგის ჰარმონიკაზე და იგი თითქმის თანაბრად ახშობს მის მეზობელ მე-11 და მე-13 ჰარმონიკებსაც. მე-13 და 30-ე რიგის ჰარმონიკის სიხშირეების ჩათვლით DT 12/36 ფილტრს აქვს მაღალი წინააღობა და ამ დიაპაზონში იგი ფაქტიურად არ მონაწილეობს არმონიკების ფილტრაციაზე.

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



ნახ. 38. 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 მის ჩართვას განსაზღვრავს მუდმივი დენის ჩანართის რეჟიმი. როგორც მოდელირებამ აჩვენა კონვერტორის 50-60% და უფრო მეტად დატვირთვისას აღნიშნული ბლოკის ჩართვა აუცილებელია, როგორც ჰარმონიკული დამახინჯებისას, ასევე ჩანართის რეაქტიული ენერგიის უზრუნველყოფის კუთხით.

5.3.3 C ბლოკი

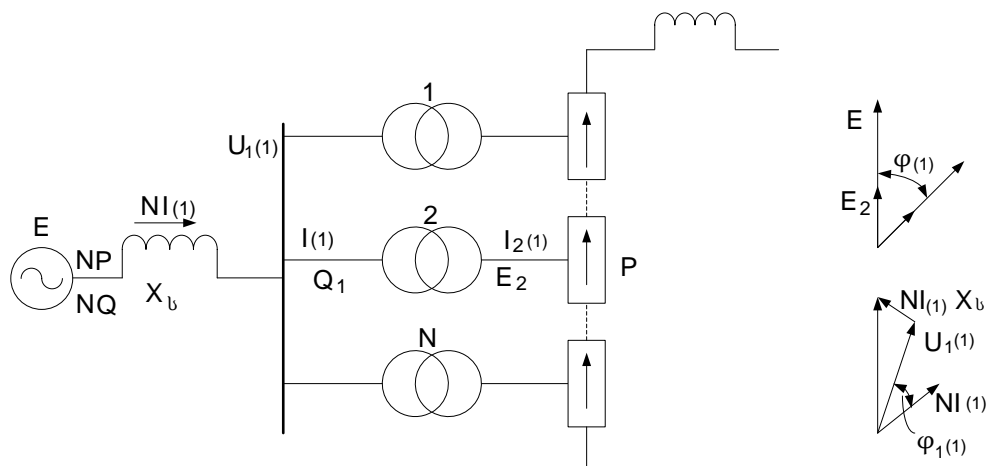
C ბლოკის მთავარი დანიშნულება მუდმივი დენის ჩანართის რეაქტიული ენერგიით კვებაში მონაწილეობის მიღებაა. ისევე როგორც დანარჩენი ბლოკების შემთხვევაში, მისი ჩართვაც რეჟიმით განისაზღვრება. როგორც წესი იგი საჭიროა დიდი დატვირთვებისას, როდესაც ძაბვა კონვერტორის ცვლადი ძაბვის სალტეზე დაბალია. იგი მონაწილეობს მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრაციაშიც, მაგრამ არ არის გათვლილი

რომელიმე კონკრეტულ სიხშირულ ზოლზე, უბრალოდ წარმოადგენს მაღალი სიხშირეებისთვის დაბალი წინაღობის არხს.

5-4. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია

გამმართველის და ინვერტორის რეჟიმში მუშაობისას გარდამქმნელი ცვლადი დნის ქსელიდან მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს, ამიტომ საჭირო ხდება მისი კომპენსაცია. ამ მიზნით გამოიყენება მაშუნტებელი კონდენსატორები და სინქრონული კომპესატორები. გარდა ამისა იყენებენ სერიულ კონდენსატორებს, კონდენსატორები ჩაერთვება ტრანსფორმატორების პირველად და მეორეულ მხარეზე. გამოიყენება გარდამქმნელი სქემები ე.წ. ხელოვნური კომუტაციით.

ვთქვათ გარდამქმნელ ქვესადგურზე მიერთებულია N თანაბრად დატვირთული ერთბოგიანი გარდამქმნელი. ერთი გარდამქმნელის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე ტოლია შესაბამისად P და Q - სი. უგულებელყოფილია აქტიური დანაკარგები და ტრანსფორმატორების დამაგნიტების რეაქტიული სიმძლავრე. ნახ. 39 - ზე წარმოდგენილია რეაქტიული სიმძლავრის საანგარიშო სქემა.



ნახ. 39. რეაქტიული სიმძლავრის საანგარიშო სქემა
(გარდამქმნელი ქვესადგურის სალტებზე)

$Q = f(p)$ დამოკიდებულების მისაღებად შემოვიღოთ ფარდობითი სიდიდეები $P^* = P/S_{\text{ზაზ}}$ და $Q^* = Q/P_{\text{ზაზ}}$

სადაც $S_{\text{ზაზ}}$ - ერთ ბოგას ბაზისური სიმძლავრე.

ადრე ჩვენ გვქონდა თანა ფარდობები:

$$U_{\text{ზაზ}} = E_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{2m} \text{ და } I_{\text{ზაზ}} = \frac{E_{2m}}{X_Y}$$

$$S_{\text{ზაზ}} = U_{\text{ზაზ}} I_{\text{ზაზ}} = E_d \frac{E_{2m}}{X_Y}$$

ერთ ბოგას აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეები ფარდობით ერთეულებში:

$$P = \frac{E_2 I_2(1) \cos \varphi(1)}{S_{\text{ზაზ}}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I''_{2(1)} \cos \varphi(1) = \frac{\pi}{6} I'^2_{2(1)}, \quad (6-1)$$

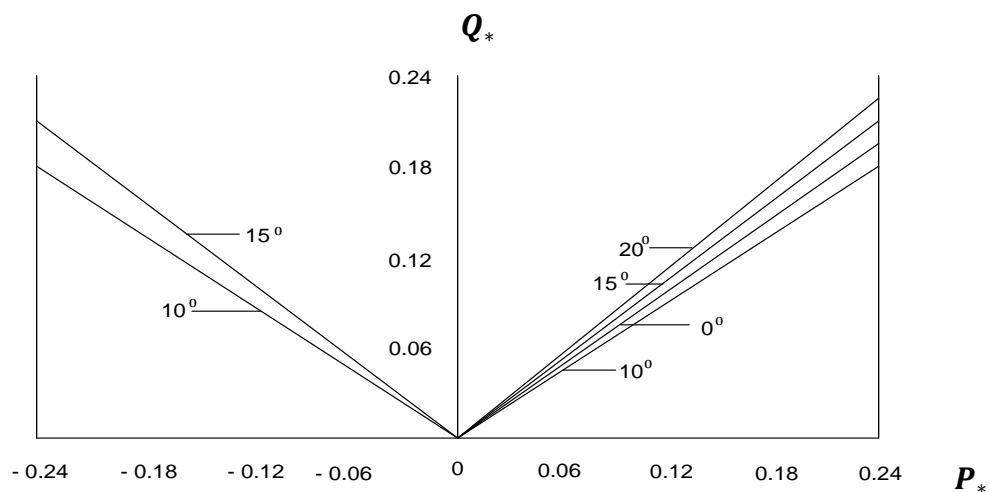
$$Q = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_2(1) \sin \varphi(1) = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I''_{2(1)}. \quad (6-2)$$

დენის $I'^2_{2(1)}$ და $I''_{2(1)}$ პირველი ჰარმონიკების მიღებით მხედველობაში გვაქვს:

$$P_* = \frac{\sqrt{3}}{4} \sin(2\alpha + \gamma) \sin \gamma \quad (5-3)$$

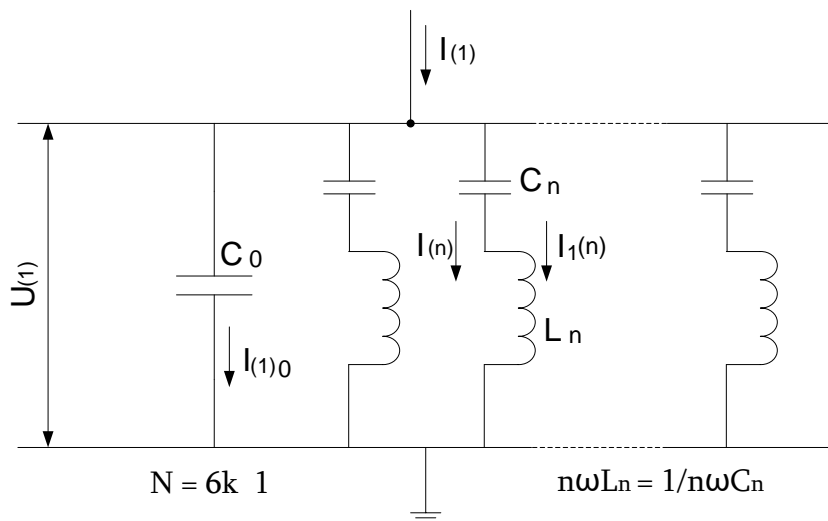
$$Q_* = \frac{\sqrt{3}}{4} [\gamma - \cos(2\alpha + \gamma) \sin \gamma] \quad (5-4)$$

გამმარტველის რეჟიმში გარდამქმნელი მუშაობს პრაქტიკულად მუდმივი α კუთხის დროს, ხოლო ინვერტორულ რეჟიმში δ კუთხით. ნახ. 40 - ზე მოყვანილია $Q_* = f(P_*)$ დამოკიდებულების მრუდები ერთბოგიანი გარდამქმნელისთვის.



ნახ. 40. დამოკიდებულების მრუდები ერთ ბოგიანი გამმარტველისთვის

მუდმივი დენის გადაცემის გარდამქმნელ ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისათვის იყენებენ შუნტურ კონდენსატორულ ბატარებს (კბ) და სინქრონულ კომპენსატორებს. შუნტურ კონდენსატორებს აქვთ ორი დანიშნულება: რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და დენის უმაღლესი ჰარმონიკების დაშუქება. დენის უმაღლესი ჰარმონიკები ხვდებიან ქსელში და იწვევენ არა სასურველ მოვლენებს: ენერჯის კარგვებს, კავშირ გაბმულობის ხაზებზე უარყოფითი ზეგავლენა, შეიძლება გამოიწვიონ საშიში რეზონანსული მოვლენები, შეუძლიათ გამოიწვიონ რეზონანსული გადახურება, ელექტრული მანქანის საშიში ვიბრაციები. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და ფილტრაცია შედგება რამდენიმე რეზონანსული L_n , C_n წრედისა და კონდენსატორული C_0 ბატარეისაგან. ეს ელემენტები ჩაირთვება ცვლადი დენის მხარეს ქვესადგურის სალტეებსა და მიწას შორის. შესაძლებელია მათი ჩართვა დასადაბლებელი ტრანსფორმატორების მეშვეობით ან ქვესადგურის მთავარი ტრანსფორმატორების მესამეული გრაგნილების მხარეზე.

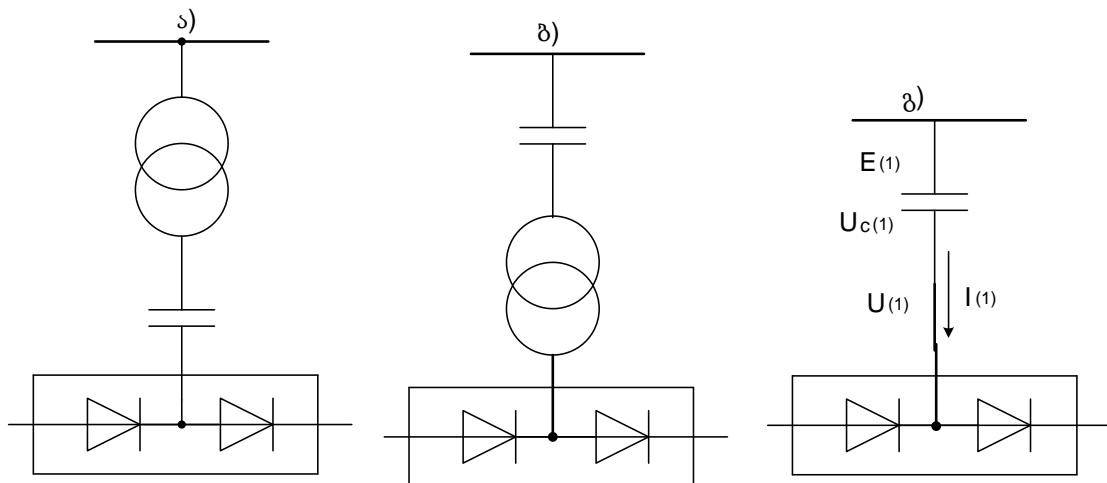


ნახ. 41. კონდენსატორული ფილტრების დენების განაწილება

რეაქტიული სიმძლავრის მისაწოდებლად გარდა კონდენსატორისა იყენებენ სინქრონულ კომპენსატორებს (სკ). კბ-ის აქვს ეკონომიკური

უპირატესობა სინქრონულ კომპესატორებთან შედარებით. კბ-ს მიერ გაცემული რექტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია ძაბვაზე. იგი ეცემა ძაბვის კვდრავტი პროპორციულად, ეს ნაკლი არ გააჩნია სკ-ს. სკ-ში ამგზნები დენის რეგულირებით შეიძლება შეეცვალოთ რექტიული სიმძლავრე. თანამედროვე სკ-ის სიმძლავრე შეადგენს ასეულ მეგავოლტამპერს. ისინი იდგება ქვესადგურის ღია ნაწილში, მათი მიერთება ხდება ცალკეული ტრანსფორმატორის ან მთავარი ტრანსფორმატორის მესამეული გრაგნილით.

ზოგჯერ იყენებენ კონდესატორთა ბატერიის მიმდევრობით შეერთებას გარდამქმნელის ძალურ წრედში. ნახ-ზე ნაჩვენებია კბ-ის ჩართვის სქემა.



ნახ. 42. კონდესატორთა ბატერიის მიმდევრობითი ჩართვის სქემები

შედეგები და მათი განსჯა

ჩატარებულმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა:

- დაგვედგინა რომ, გარდამავალი და დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშება მიზანშეწონილია ჩატარდეს გადართვის ინტერვალებში არასიმეტრიული გარდამავალი პროცესების განხილვის საფუძველზე, სადაც შეიძლება გამოვიყენოთ ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი რეზულტატური ვექტორების მიმართ.
- დაგვედგინა, რომ ჩანართში მიმდინარე მიკროპროცესები გაანგარიშებისათვის საჭიროა, სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობების მიხედვით ანალიზის ჩატარება კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდის ერთდროული გამოყენებით, გარდამქმნელების ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით.
- შეგვექმნა მეთოდიკა დანადგარის მუშა მახასიათებლების გაანგარიშების, ცვლადთა გასაშუალოებული სიდიდეების მიხედვით, რაც საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ ჩანართის ძირითად სიდიდებს შორის თანაფარდობები. სხვადასხვა რეჟიმებში.
- შეგვექმნა სინქრონული კომპენსატორის მათემატიკური მოდელი, რომელიც დიდი სიზუსტით ასახავს არამარტო დამყარებულ, არამედ გარდამავალ პროცესსაც კომპიუტერზე შემდგომი გაანგარიშების მიზნით.
- სინქრონული კომპენსატორის გარდამავალი პროცესი ოპერატორული მეთოდით ანალიზი გვაძლევს დენების ზუსტ ფორმულებს, რომელიც სამართლიანია კომპენსატორის მუდმივი ბრუნვის სიხშირით მუშაობისას.

დასკვნა

1. მუდმივი დენის ჩანართის გამმართველი და ინვერტორული ქვესადგურების აგება თანამედროვე ელემენტურ ბაზაზე - მაძლავრ დიოდებსა და სრულად მართვად ტირისტორებზე და მძლავრ IGBT ტრანზისტორებზე ოპტოელექტრონული მართვის სისტემების გამოყენებით, ამცირებს ამ დანადგარების გაბარიტებსა და მასას.
2. ჩანართის სქემური გადაწყვეტების შედარებითი ანალიზის შედეგად შეიძლება შეირჩეს ოპტიმალური ვარიანტი ყველა კონკრეტული შემთხვევისათვის. და გაანგარიშების საფუძველზე შეირჩეს სქემის ელემენტების ოპტიმალური პარამეტრები.
3. ძალურ ტრანსფორმატორებში დენების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შეირჩეს მათი პარამეტრები ვენტილური ბლოკების სპეციფიკის გათვალისწინებით. ეს საშუალებას გვაძლევს დაგეგმარდეს გარდამქმნელები მაღალი ტექნიკურ - ეკონომიკური მაჩვენებლებით.
4. ჩანართში მიმდინარე ელექტრო მაგნიტური პროცესების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გამოვავლინოთ უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები და მოვახდინოთ მათი ფილტრაცია, მოვახდინოთ სიმძლავრის კოეფიციენტისა და მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდა.
5. ჩანართის გამოყენება შეიძლება არა მარტო სისტემათა შორისი კავშირის განსახორციელებლად, არამედ ერთი სისტემის ფარგლებში მისი ორი ნაწილის ერთმანეთთან დასაკავშირებლად გეოგრაფიული პირობების გათვალისწინებით.
6. სინქრონულ კომპენსატორში ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შეირჩეს დანადგარის ოპტიმალური პარამეტრები მდგრადი მუშაობის რეჟიმისათვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Васильев А.А., Крючков И.П., Янышков Е.Ф. и Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций, подред Васильева АА,-2-е- изд. Перераб. И доп.-М. : энергоатомиздат, 1990-576с.:ил.
2. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Изд-во „Энергия“,1973-30с с.:ил.
3. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах .М, Изд-во иностр лит, 1955-715с. сил.
4. რაზმაძე შ. დენის გარდამქმნელები. თბილისი გამომცემლობა „განათლება“, 1965-485 გვ. ილ.
5. Аллилуев А.А., Шинкаренко Р.В. Переходные режимы в преобразовательных системах „выпрямитель-реактор-инвертор“-Электротехника,1981,№1 с.38-51.
6. Лутидзе Ш.И., Маглаперидзе О.К., Чурсин В.И., Якимец И.В. Электромагнитные процессы в вентильных возбудителях с буферными вентилями.Изд-во „Найка“,1975-295с.с ил.
7. Кохреидзе Д.К. Векторны уравнения переходных режимов многофазных каскадно-мостовых выпрямителей высокого напряжения. Проборы и системы, Москва, Изд-во „Научтехлитиздат“,Москва,2006,№4, с 38-43.
8. არზიანი გ. არასინუსოიდალური რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი თურქეთთან ასინქრონული კავშირის პირობებში.
9. Кохреидзе Д. К. Хачидзе Г.П. векторные уравнения вставки постоянного тока На Основе сверхпроводящих трансформаторов с вращающимся магнитным полем. XI Международная научно-практическая конференция, 2015, 6(13), с-151-154.

10. ხაჩიძე გ. მუდმივი დენის ჩანართის გამმართველ-ინვერტორული ქვესადგურის რეჟიმების ანალიზი. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“. 2017, 1 (81), გვ. 72-77.
11. ხაჩიძე გ. კოხრეიძე დ. მუდმივი დენის ჩანართის გამმართველში ელექტრომაგნიტური პროცესების კომპლექსური განტოლებები. სამეცნიერო-ტექნიკური კომფერენცია. ქუთაისი “ენერჯეტიკა“ 2015, III გამოცემა, გვ. 13-17.
12. ხაჩიძე გ. კოხრეიძე დ. სინქრონული ძრავას ჩართვის გარდამავალი პროცესის ოპერატორული განტოლებები. „ბიზნეს-ინჟინერინგი“ №1 2017, გვ. 56-58