

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

არკადი რიკრიკაძე

ორფაზა/ოთხფაზა დენის გენერაცია – გადაცემა – მოხმარების
რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა “ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია”

შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2017 წელი

საავტორო უფლება © 2017- წელი, არკადი რიკრიკაძე

თბილისი

2017 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით არკადი რიკრიკაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: 'ორფაზა / ოთხფაზა დენის გენერაცია - გადაცემა – მოხმარების რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

ივლისი, 2017 წელი

ხელმძღვანელი _____ პროფესორი გურამ მახარაძე

რეცენზენტი _____

რეცენზენტი _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2017 წელი

ავტორი: არკადი რიკრიკაძე

დასახელება: ორფაზა/ოთხფაზა დენის გენერაცია – გადაცემა – მოხმარების რეჟიმების გამოკვლევა და ანალიზი

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორის

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2017

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომში გამოკვლეულია ორფაზა/ოთხფაზა დენის გენერაცია-გადაცემა-მოხმარების საკითხები. აღნიშნული საკითხების ირგვლივ ჩატარებულია ლიტერატურული მიმოხილვა განხილულია მრავალფაზა ელექტროსისტემის განვითარების ისტორიული ეტაპები. ამ საკითხებთან დაკავშირებით აღნიშნულია ამერიკის შ.შ-სა და რუსეთის ფ.რ-ის სამომავლო მიმართულებები.

სამფაზა სისტემის საჰაერო ხაზის ელექტროგამტარუნარიანობის ამღლება არსებული ტექნოლოგიებით პრაქტიკულად ამოწურულია, ვინაიდან იგი მოითხოვს მრავალჯაჭვიან ზემდალ და ულტრამალ ძაბვებზე გადასვლას, ეს კი ართულებს როგორც მისი მშენებლობის და მონტაჟის საკითხებს, ასევე ამცირებს ელექტროგადაცემის საიმედობას, ზრდის როგორც ფერადი და შავი ლითონის ისე საიზოლაციო მასალის ხარჯს, აუარესებს ეკოლოგიას. აქედან გამომდინარე დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს აღნიშნული საკითხების ინოვაციური გზით გადაწყვეტას.

ამოცანის განხილვის პროცესში მეცნიერული კვლევა ჩატარდა ზემოთ მოყვანილ საკითხებზე, რომელთა დამუშავებით თეორიულად მიღებული გვაქვს:

1. ორფაზა და ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური ელექტრული პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები;
2. სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის უკუ სადენში გამავალი დენების საანგარიშო გამოსახულებები და გაკეთდა მათი ანალიზი;
3. გაკეთდა ორფაზა, სამფაზა, ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემების ურთიერთ შედარებითი ანალიზი, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეების თეორიული დასაბუთება;
4. გაანალიზდა მათი მუშაობის რეჟიმული პარამეტრები და ეს პარამეტრები შეფასდა ტექნიკო-ეკონომიკური მაჩვენებლების თვალსაზრისით. გამოვლინდა ამ სისტემების დადებითი და უარყოფითი მხარეები.
5. მიღებულ იქნა სამ სადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემისა და ოთხსადენიან ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენების რეაქტიულ-ინდუქციური წინააღობის და გასაშუალოებული ტევადობის საანგარიშო გამოსახულებები.
6. ორფაზა ელექტროგადაცემის უკუ სადენის რეაქტიულ-ინდუქციური წინააღობის კომპენსაციისათვის საჭირო რეაქტიული ტევადური წინააღობის გამოსათვლელი გამოსახულება, უკუ სადენში ძაბვის ვარდნის სიდიდის მნიშვნელობის წინასწარი პროცენტული შეზღუდვით.

თეორიულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემა მიუხედავად მთელი რიგი უპირატესობისა, სამსადენიან სამფაზა ელექტროგადაცემასთან შედარებით ნაკლები გამტარუნარიანობით ხასიათდება მაგრამ თუ განვახორციელებთ უკუ სადენის რეაქტიულ ინდუქციური წინააღ-

ბის (50-100%-იან) კომპენსაციას შესაბამისი სიდიდის რეაქტიულ-ტევადური წინაღობით (კონდენსატორული ბატარეის გამოყენებით), მაშინ შესაძლებელი ხდება აღმოიფხვრას ფაზურ სადენებში ძაბვების ასიმეტრიულობა, როგორც სიდიდით ისე მათ შორის ფაზური ძვრის კუთხის სიდიდის მნიშვნელობით.

შედარების თვალსაზრისიდან გამომდინარე ჩატარებული გვაქვს ანგარიში ორფაზა, ოთხფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის 220კვ-იანი ძაბვის ხაზისათვის, 150 მგვა სიმძლავრის გადაცემის დროს. აგრეთვე ორფაზა ელექტროგადაცემის ანგარიში 500კვ-ი ძაბვის ხაზისათვის. ანგარიშმა აჩვენა, რომ ოთხფაზა ელექტროგადაცემა სამფაზიანთან შედარებით მეტი გამტარუნარიანობით ხასიათდება. რაც მეტია ფაზათა რაოდენობა მით ნაკლებია ფაზებს შორის ძაბვა (ხაზური ძაბვა), ეს საშვალეებს გვაძლევს საყრდენებზე ფაზებს შორის მანძილი შევამციროთ, ამავე მიზეზით მცირდება გადამცემი ხაზის რეაქტიულ-ინდუქციური წინაღობა და იზრდება საჰაერო სადენების გასაშუალებელი ტევადობა, რაც ამცირებს ხაზის ტალღურ წინაღობას, ეს უკანასკნელი კი ზრდის გადაცემული ნატურალური სიმძლავრის სიმკვრივეს.

კვლევის პროცესში თეორიულად დავამუშავეთ ინოვაციური ორგრაფილიანი 90⁰-იანი ფაზათა ძვრის მქონე ელექტრომანქანის პრინციპიალური ელექტრული სქემა, რომელსაც შეუძლია იფუნქციონიროს სამფაზა ელექტროქსელიდან ძრავულ რეჟიმში. იგი გამორიცხავს გამშვი და მუშა კონდენსატორების გამოყენებას და უზრუნველყოფს ძრავას მუშაობის საიმედოობის ამაღლებას, ხოლო გენერატორულ რეჟიმში მოახდენს სამფაზა დენის (120⁰-იანი კუთხური ძვრის მქონე) გენერაციას. ამასთან დაკავშირებით მივიღეთ სასარგებლო მოდელზე პატენტი № U 1926. ზემოთ აღნიშნული პრობლემების გადაწყვეტის მცდელობა გვაქვს დასახული შემდეგი ინოვაციური და ალტერნატიული მიმართულებებით:

1. ვახორციელებთ ორფაზა დენის (90⁰-იანი ფაზური ძვრის კუთხის მქონე) გენერაციას, რომელსაც ვაკავშირებთ ჩვენს მიერ შემუშავებული ორფაზა-ოთხფაზა ერთი ცალი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზთან. ხაზის ბოლოში კი ვიყენებთ ოთხფაზა-ორფაზა ერთ ცალ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, შემდეგ მიღებული ორფაზა დენი მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით და სამი სადენით მიგვყავს როგორც საწარმოო ისე საყოფაცხოვრებო დანიშნულების მომხმარებლებთან.

2. ვახორციელებთ ორგრაფილიან სამფაზა გენერაციას და მას ვაკავშირებთ ჩ. სკოტის ორი სამფაზა-ორფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა გადაცემის ხაზთან. ხაზის ბოლოში კი ვიყენებთ ჩვენს ოთხფაზა-ორფაზა ერთ ცალ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, შემდეგ მიღებული ორფაზა დენი მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით და სამი სადენით მიგვყავს როგორც საწარმოო ისე საყოფაცხოვრებო დანიშნულების მომხმარებლებთან.

3. ვახორციელებთ ორგრაგნილიან სამფაზა გენერაციას და მას ვაკავშირებთ სკოტის ორი ცალ სამფაზა-ორფაზა ფაზოგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა გადაცემის ხაზთან. ხაზის ბოლოში ვიყენებთ ისევ ორ ცალ სკოტის ორფაზა-სამფაზა ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, შემდეგ კი მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით მიღებული სამფაზა დენი მიგვყავს სამფაზა მომხმარებლებთან, რომელიც ამ შემთხვევაში სასურველია სამფაზა მომხმარებელი დაკომპლექტებული იყოს ჩვენი პატენტით ორგრაგნილიანი-სამფაზა ელექტროძრავებით.

4. სიმეტრიულ ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დროს როგორც შუალედური საყრდენი ანძების კონსტრუქცია ისე კუთხურ-ანკერული საყრდენების კონსტრუქცია მარტივდება ხოლო მათი რაოდენობა, განსაკუთრებით მთიან რეგიონებში დამონტაჟების დროს მცირდება (სამის ნაცვლად გვექნება ორი საყრდენი) ამასთან თუ ორჯაჭვა სამფაზა გადაცემასთან მიმართებაში სადენების ჯამური კვეთი ტოლი იქნება ერთჯაჭვა ოთხფაზა გადაცემის სადენების ჯამური კვეთის, მაშინ ოთხფაზა გადაცემით გადაცემული სიმძლავრის სიდიდე ტოლი იქნება ორჯაჭვა სამფაზა გადაცემით გადაცემული სიმძლავრის და ამავდროულად საიზოლაციო მასალის გირლიანდების ხარჯიც შემცირდება თითქმის 33%-ით.

5. სამსადენიანი ორფაზა ელექტროქსელის დანერგვა საშვალებას მოგვცემს ორფაზა ელექტროძრავები გამოვიყენოთ საყოფაცხოვრებო დანიშნულების ელექტროხელსაწყოებში, რომლებიც შეცვლიან ერთფაზა ქსელიდან მომუშავე კონდენსატორულ ელექტროძრავებს, მათი თვითღირებულება იქნება დაბალი, ხოლო საიმედოება მაღალი, თანაც მისი სიმძლავრე სამფაზა ძრავას სიმძლავრის ტოლი იქნება.

6. როგორც ალტერნატიული ვარიანტი შესაძლებელია მრეწველობის მრავალ სფეროებში წარმატებით დანერგილ იქნეს ჩვენზე გაცემული პატენტი № U1926 დასახელებით „ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანა“, რომელიც არსებულ სამფაზა მანქანებთან შედარებით მეტი საიმედოობითა და დაბალი თვითღირებულებით გამოირჩევა. თუ აღნიშნულ ორგრაგნილიანი-ორფაზა და ორგრაგნილიანი-სამფაზა ელექტრომანქანების ფაზური ძაბვების სიდიდე არსებული სამფაზა ელექტრომანქანების ფაზური ძაბვების ტოლი იქნება, მაშინ მათი ელექტროუსაფრთხოებაც შედარებით გაიზრდება.

Summary

In the thesis questions of generation-transmission and consumption of two-phase and four-phase current are investigated. A literature review was conducted on these issues. The historical stages of the development of multiphase electrical systems are considered. The works carried out on these issues in the USA and the RSFSR are indicated.

The increase in the transmission capacity of the power transmission line on the existing technology has exhausted its practical possibilities as it requires the use of multi-chain three-phase systems with high and ultra-high voltages, which complicates the construction and installation of the line, reduces the reliability of electricity transmission and also worsens the ecology. In connection with this, it is of great practical importance to address these issues in innovative ways.

The above mentioned problems are solved by innovative and alternative directions. In the process of reviewing the above-mentioned tasks, studies were conducted on the above listed issues, after the elaboration of which theoretically received:

Expressions for calculating the electrical parameters of a two-phase and four-phase transmission;

2. Expressions for calculating the return currents of a two-phase three-wire overhead line. An analysis of these expressions is carried out;

3. A comparative analysis has been made between two, three and four-phase power transmission systems, as well as the theoretical justification of their positive and negative sides.

4. The parameters of the regime are analyzed. These parameters were evaluated by technical and economic indicators;

5. Expressions for the calculation of reactive inductive resistance and the average value of the electrical capacity of the wires for three-wire two-phase and four-wire four-phase power lines.

6. Expressions for calculating the compensation of the reactive inductive resistance of a two-phase power transmission line, taking into account the preliminary percentage limitation of the voltage drop values. Theoretical studies have shown that a three-wire two-phase transmission is worse than a three-phase transmission. But if we make 100% compensation of the inductive resistance of the return wire by the capacitive resistance (capacitor bank), we can eliminate the asymmetry of the voltage in the phase conductors and the asymmetry of the angle of shear between them.

From the point of view of comparison, we calculated two-, three- and four-phase transmission lines for a voltage of 220 kV with a throughput of 150 mW, as well as a calculation of a two-phase line for 500 kV. The length of the line is 80 km. The calculation showed that the four-phase line in front of the three-phase line has a large throughput, it was found that the greater the number of phases, the lower the voltage

between phases (line voltage). This makes it possible to bring the phase conductors closer together, and the inductive resistance to decrease. At the same time, the reactive-capacitive resistance increases, which leads to a decrease in the line's wave resistance and a sharp increase in the density of transmitted natural power. In the course of the research, a two-winding three-phase electric machine was developed, the windings are shifted by 90 degrees from each other, it can operate from a three-phase electrical network and generate a three-phase alternating current. For innovative development, we were granted a patent for utility model No. 2017.

The above mentioned problems are solved by innovative and alternative directions:

1. By generating a two-phase current and using a two-phase / four-phase transformer-converter, Also a four-wire overhead power line. At the end of the line we use a four-phase / two-phase transformer converter.
2. Three phase generator (with two windings according to the Scott's scheme). Use of Scott phase transducers. Transmission of four-wire current. At the end of the overhead power line, we will use a four-phase / two-phase converter/.
3. The three-phase generator (patent No.U 1926) is connected to two Scott transformers, which are connected to a four-phase power line. The line is again connected to two Scott transformers, which are connected to a three-phase distribution line, which is the source of electric power for three-phase electric motors manufactured in accordance with our patent.
4. Thanks to the four-phase power transmission, the design of the intermediate and angular supports (masts) is simplified. In mountain areas - the number of corner supports for the two phases will be enough only one. The transmitted power for a four-phase power transmission will be equal to the power when transmitting a two-circuit three-phase system. At the same time, consumption of insulation materials (electric garlands) will be less by 33%.
5. The introduction of a two-phase electrical network with a three-core cable will allow the use of two-phase electric motors in household electrical appliances that will replace single-phase electric motors connected through capacitors. Their cost will be less, reliability is higher and the power will be equal to the power of the three-phase electric motor. Their cost will be less, reliability higher and power will be equal to the power of a three-phase electric motor.
- 6 Alternatively, we can also successfully introduce a three-phase electric machine with two windings (90th phase shift) in industry in accordance with our patent, which will have relatively high reliability and lower costs. If this machine has the same phase voltage as the existing three-phase machine, then its electrical safety will be higher than that of the existing three-phase.

შინაარსი

	83
შესავალი.....	16
თავი 1. ამოცანის დასმა.....	26
1.1. ცვლადი დენის ელექტრული მანქანები.....	26
1.2. ორგრაგნილიანი ორფაზა და ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრული მანქანები.....	31
1.3. ორგრაგნილიანი (ორფაზა) სამფაზა ელექტრომანქანის გრაგნილთა დატვირთულობა.....	37
1.4. ორფაზა და სამფაზა ელექტრომანქანების სიმძლავრეთა შესახებ..	45
1.5. ამოცანის დასმა.....	48
თავი 2. მრავალფაზა სისტემები.....	53
2.1. სამფაზა სიმეტრიული და ორფაზა არასიმეტრიული სისტემის ზოგადი მიმოხილვა.....	53
2.2. ელექტროგადაცემის სამფაზა სისტემის რეჟიმის ანალიზი.....	57
თავი 3. ელექტროგადაცემის ორფაზა სისტემა.....	63
3.1. ორფაზა და სამფაზა სისტემების ურთიერთკავშირის შესაძლებლობა.....	63
3.2. ორფაზა ელექტროგადაცემის განხორციელების პრინციპი.....	67
3.3. ორფაზა ელექტროგადაცემის სადენთა ინდუქციურობა.....	74
თავი 4. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმი.....	82
4.1. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება დატვირთვის დენების მიხედვით.....	82
4.2. რიცხვითი მაგალითების ანალიზი.....	86
4.3. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების	

განგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით.....	111
4.4. ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები.....	134
თავი 5. ელექტროგადაცემის ოთხფაზა სისტემა.....	140
5.1. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის განხორციელების პრინციპები.....	140
5.2. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დატვირთვის ფაზური დენები.....	145
5.3. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენთა ინდუქციურობა.....	147
5.4. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ტევადობა.....	156
დასკვნა:.....	161
ლიტერატურა.....	165

ცხრილების ნუსხა

	83
ცხრილი 3.2.1. თანაფარდობა ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზების ნომინალურ პარამეტრებს შორის.....	72
ცხრილი 3.2.2. სამფაზა და ორფაზა სისტემების ხაზური და ფაზური ძაბვები.....	73
ცხრილი 3.3.1. ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის წინაღობა, ომი/კმ...	80
ცხრილი 4.2. 1–3 რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშების შედეგები.....	110
ცხრილი 4.3.1 ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები (მაგ.4).....	119
ცხრილი 4.3.2. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები კომპენსაციის შემდეგ(მაგ.4).....	123
ცხრილი 4.3.3. რეჟიმის პარამეტრების შედარებითი ცხრილი.....	123
ცხრილი 4.3.4. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები (მაგ.5).....	129
ცხრილი 4.3.5. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები კომპენსაციის შემდეგ (მაგ.5).....	133
ცხრილი 5.3.1. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ფაზური წინაღობა, ომი/კმ.....	153
ცხრილი 5.3.2. თანაფარდობა ოთხფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ნომინალურ პარამეტრებს შორის.....	154

ნახაზების ნუსხა

83.

ნახაზი.1.	ორფაზა–ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი (ფგტ) და არაშეკრული სისტემის ორფაზა ასინქრონული ელექტროძრავა.....	25
ნახაზი.1.1.1.	ასინქრონული ძრავას ჩართვის სქემა: ა- გამშვი წინაღობით; ბ- გამშვი კონდენსატორით.....	27
ნახაზი.1.1.2.	ა -ასინქრონული ძრავა მოკლედ შერთული ხვით სტატორში. ბ-გამშვი და მუშა ონდენსატორით.....	27
ნახაზი.1.1.3.	სამფაზა ასინქრონული ძრავა გამშვი და მუშა კონდენსატორით: ა-გრაგნილების ვარსკვლავური შეერთებით; ბ-გრაგნილების სამკუთხედური შეერთებით.....	28
ნახაზი.1.2.1.	ჩარლზ სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი.....	32
ნახაზი.1.3.2.	ა -ავტონომიური რეზონანსული ორი ორგრაგნილიანი ორფაზა და ბ–ორფაზა-სამფაზა ასინქრონული გენერატორი.	32
ნახაზი.1.2.3.	ორფაზა–სამფაზა ელექტრული მანქანა. ა–ძრავული რეჟიმი, ბ– გენერატორული რეჟიმი.....	33
ნახაზი.1.2.4.	უნივერსალური ორგრაგნილიანი ორფაზა-სამფაზა სინქრონული ძრავას ჩართვის სქემა.....	34
ნახაზი.1.2.5.	ორფაზა ასინქრონული ძრავას ჩართვა ჩვეულებრივი ორფაზა (ა) და სამფაზა (ბ) გამარტივებული სქემის გამოყენებით.....	35
ნახაზი.1.3.1.	მოკლედ შერთულ როტორიანი ასინქრონული ძრავას პრინციპიალური სქემა, სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპით შეერთებული.....	38
ნახაზი.1.3.2.	ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის ვექტორული დიაგრამა.....	39

ნახაზი.1.3.3. ორგრაგნილიანი სამფაზა გენერატორი.....	40
ნახაზი.1.3.4. ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის გრაგნილთა შეერთებისა და ბ-სტატორის გრაგნილთა გაშლილი სქემა...	42
ნახაზი.1.3.5. ორგრაგნილიანი სტატორის გრაგნილთა ტორსული სქემა....	43
ნახაზი.1.3.6. ორგრაგნილიანი სამფაზა სინქრონული ელექტრომანქანის განივი ჭრილი.....	43
ნახაზი.1.3.7 ა-სამგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის გრაგნილთა შეერთების სქემა, ბ - სტატორის გრაგნილთა გაშლილი სქემა. გ - სტატორის გრაგნილთა ტორსული სქემა.....	44
ნახაზი.2.1.1 ფაზური ე.მ.ძ.....	54
ნახაზი.2.1.2 ორფაზა არასიმეტრიული ისტემა.....	56
ნახაზი.2.2.1 სამფაზა სისტემა.....	57
ნახაზი.3.1.1 ჩ. სკოტტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი.....	63
ნახაზი.3.1.2.ა-პირველადი და ბ-მეორეული გრაგნილის დაბეჭდვის ვექტორული დიაგრამა.....	64
ნახაზი.3.1.3 ჩ. სკოტტის ორგრაგნილიანი-სამფაზა სქემა. სამგრაგნილიანი სამფაზა სქემა.....	65
ნახაზი.3.1.4 სამფაზა ქსელი ნულოვანი სადენით.....	65
ნახაზი.3.1.5 სამფაზა ქსელი ნულოვანი სადენის გაარეშე.....	66.
ნახაზი. 3.2.1 ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემა.....	67
ნახაზი.3.3.1 სამსადენიანი ორფაზა ხაზი. სადენებში გამავალი დენების ვექტორული დიაგრამა სადენთა ინდუქციურობის გაანგარიშებისათვის.....	75
ნახაზი.3.3.2 . სადენების განთავსება ტოლგვერდა სამკუთხედის	

წვერობზე (საყრდენებზე).....	78
ნახაზი.3.3.3 სადენების განთავსება ტოლფერდა სამკუთხედის წვერობზე (საყრდენებზე).....	78
ნახაზი.4.1.1 ორფაზა სისტემა მესამე უკუ სადენით და ორივე ბოლოში ჩამიწებული.....	82
ნახაზი.4.2.1 დენების ვექტორული დიაგრამა 220კვ–ი გადამცემი ხაზის დროს.....	90
ნახაზი.4.2.2 ძაბვების ვექტორული დიაგრამა 220კვ–ი გადამცემი ხაზის დროს.....	91
ნახაზი.4.2.3 დენების ვექტორული დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ 220კვ გადამცემი ხაზის დროს.....	97
ნახაზი.4.2.4 ძაბვების დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ 220კვ გადამცემი ხაზის დროს..	98
ნახაზი.4.2.5 დენების ვექტორული დიაგრამა 500–კვ გადამცემი ხაზის დროს უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ 220კვ გადამცემი ხაზის დროს.....	107
ნახაზი.4.2.6 ძაბვების ვექტორული დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული ინდუქციური წინაღობის სრული კომპენსაციისა და 500კვ გადამცემი ხაზის დროს.....	108
ნახაზი.4.3.1 ორფაზა ელექტროგადაცემის სქემა, დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით რეჟიმის პარამეტრების განგარიშებისათვის.....	112
ნახაზი. 4.4.1 ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის სქემა.....	134
ნახაზი.4.4.2 ა–ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი. ბ–სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი.....	135
ნახაზი.4.4.3 ფაზური სადენების ჰორიზონტალური განლაგება.....	136

ნახაზი.4.4.4 კუთხურ-ანკერული საყრდენი, მთიანი რელიეფის პირობებში.....	137
ნახაზი.5.1.1 ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური ძაბვების ვექტორული დიაგრამა.....	140
ნახაზი.5.1.2 სამფაზა-ექვსფაზა ფაზაგადამრთველი ტრანსფორმატორი.....	141
ნახაზი.5.1.2.ა. სამფაზა გენერაციით დაკავშირება ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემასთან, სკოტის ორფაზა-სამფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით.....	142
ნახაზი.5.1.2.ბ. ორფაზა გენერაციით დაკავშირება ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემასთან, ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით.....	143
ნახაზი.5.2.1. ოთხფაზა სისტემა, მეხუთე (ნეიტრალური) სადენით და ორივე ბოლოში ჩამიწებული.....	145
ნახაზი.5.3.1 ოთხფაზა ოთხსადენიანი ხაზი და მისი ვექტორული დიაგრამა სადენთა ინდუქციურობის გაანგარიშებისათვის.....	147
ნახაზი.5.3.2 სადენების განთავსება კვადრატის წვეროებზე (საყრდენებზე).	151
ნახაზი.5.4.1ა,ბ,გ- ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენების საყრდენებზე განლაგების ვარიანტები.....	157
ნახაზი. 5.4.1.დ. სადენების სარკული ანარეკლები.....	157
ნახაზი. 5.4.2 სამფაზა და ოთხფაზა ელექტროგადაცემის პრინციპიალური სქემები: ა – ორჯაჭვა სამფაზა და ბ – ოთხფაზა.....	159

შესავალი

ელექტროენერჯის გადაცემის საწყისი პერიოდი დაკავშირებულია უმთავრესად მუდმივ დენთან, რაც იმით აიხსნება, რომ ელექტროენერჯის მომხმარებლებს წარმოადგენდნენ დანადგარები, რომლებიც მუშაობდნენ მხოლოდ მუდმივ დენზე (რკალური ნათურები, გალვანოპლასტიკის დანადგარები და ა.შ.).

სახელგანთქმულმა ამერიკელმა გამომგონებელმა და სამრეწველო მოღვაწემ თომას ედისონმა 1878 წელს დააფუძნა კომპანია „ედისონ ელექტრიკ ლაით“ (ამჟამად ცნობილი კონცერნი „ჯენერალ ელექტრიკ“). მან 1879 წელს გამოიგონა ელექტრონათურა, ხოლო 1880 წელს დააპატენტა ელექტროენერჯის განაწილება მუდმივი დენის გამოყენებით, რომელიც შეიცავდა სამსადენს: ნულოვანს და ± 110 ვ (ეს ამცირებდა მასალის ხარჯს, ენერჯის იმავე დანაკარგების დროს). 1882 წელს მან გაუშვა პირველი ელექტროსადგური ქ. ლონდონში, ხოლო რამოდენიმე თვის შემდეგ მანჰეტენში. 1887 წელს აშშ-ში უკვე არსებობდა ასზე მეტი მუდმივი დენის ელექტროსადგური, რომელიც მუშაობდა სამი სადენის სისტემით [1].

დიდ ქალაქებში ელექტროგანათება საჭიროებდა ელექტროგენერატორების სიმძლავრის გაზრდას და მათ შემდგომ სრულყოფას. ელექტრორკინიგზის განვითარებამ მნიშვნელოვნად გაზარდა მოთხოვნილება ელექტროძრავებსა და ელექტროგენერატორებზე, რამაც უზრუნველყო მათი შემდგომი სრულყოფა. მე-19 საუკუნის 80-იან წლებში ელექტროენერჯის დიდ მანძილზე გადაცემის აუცილებლობა წარმოიშვა. 1882 წელს ჩატარდა ცდები ელექტროენერჯის გადაცემის მაღალი ძაბვითა და მუდმივი დენით, მაგრამ მუდმივი დენის გენერატორის მუშაობა მაღალ ძაბვაზე კოლექტორის მუშაობას აუარესებდა, რაც იწვევდა ავარიას. ამიტომ ეს პრობლემა იმ დროისათვის ცვლადი დენის მიმართ ელექტროტე-ქნიკოსების ინტერესს აძლიერებდა.

XIX საუკუნის ბოლოს ევროპაში შემუშავდა ერთფაზა დენის მიღების ხერხი და ელექტროენერჯის გადაცემა შესაძლებელი გახდა ჯერ რამდენიმე კილომეტრზე, ხოლო შემდგომ რამდენიმე ათეული კილომეტრის მანძილზე. მისი გამოყენება თავდაპირველად ძირითადად ქალაქების, ქუჩებისა და საცხოვრებელი სახლების განათებისათვის იყო გამიზნული, ნაწილობრივ კი მცირე მანუფაქტურული სამეწარმეო დანიშნულებისათვის, კერძოდ, ელექტროქიმიკაში ტექნოლოგიური პროცესებისათვის. ერთფაზა დენის სისტემამ ვერ შეძლო მრეწველობის მზარდი განვითარებადი პრობლემების დაკმაყოფილება, კერძოდ საჭიროება მოითხოვდა შექმნილიყო ელექტროძრავები, მაგრამ როგორც ცნობილია ერთფაზა ელექტროდენი მხოლოდ პულსიურ მაგნიტურ ველს ქმნის და არა მბრუნავ მაგნიტურ ველს. ეს უკანასკნელი კი აუცილებელი პირობაა ყველაზე მარტივი და საიმედო მოკლედშერთულ როტორიანი ასინქრონული ელექტროძრავას შესაქმნელად.

ცვლადი დენის მომხრეები საფუძვლიანად ფლობდნენ მათემატიკას და ფიზიკას. ამერიკელი მრეწველი, ინჟინერი და მეწარმე ჯორჯ ვესტინჰაუსმა კომპანია „ვესტინჰაუს ელექტრიკ“ დააფუძნა, გაეცნო რა ედისონის პატენტს გამოაშკარავა მისი სისტემის სუსტი მხარეები, სიმძლავრის დიდი დანაკარგები სადენში ელექტროენერჯის დაბალი ძაბვით დიდ მანძილზე გადაცემის დროს. რაც დიდია მანძილი, მით მეტია სადენის წინაღობა და იზრდება კარგვები მის გახურებაზე. ედისონი იყენებდა 100-200 ვ სიდიდის ძაბვას. ამიტომ ელექტროენერჯის გადაცემას იგი ახერხებდა მხოლოდ 2 კილომეტრამდე, გამოსავალი ჩანდა მხოლოდ ცვლადი დენის გამოყენებაში, მაგრამ ამ დროისათვის არ არსებობდა ცვლად დენზე მომუშავე ელექტროძრავები. 80-იან წლებში ელექტროენერჯია ძირითადად გამოიყენებოდა ძალური მოხმარებისათვის, ამიტომ ელექტროტექნიკოსების ძირითად ამოცანას წარმოადგენდა ასეთი ელექტროძრავების შექმნა. იმ დროისათვის ელექტროტექნიკოსების წინაშე დაისვა პრობლემური საკითხი, შემუშავებულიყო მბრუნავი მაგნიტური ველის მიღების ხერხი.

სწორედ ამ პერიოდში და ამ პრობლემის ძიება დაიწყო ნიკოლა ტესლამ. იგი წარმოადგენს იდუმალ (უცნაურ) XX საუკუნის ლეგენდარულ მეცნიერს. ეროვნებით სერბი, დაიბადა 1856 წ. ავსტრო-უნგრეთში, სწავლობდა უმაღლეს ტექნიკურ სასწავლებელში და პრადის უნივერსიტეტში, მუშაობდა ინჟინრად ბუდაპეშტში სატელეფონო საზოგადოებაში, შემდგომ პარიზში ედისონის კომპანიაში, რის შემდეგაც 1884 წ. გადავიდა აშშ-ში, სადაც დაუღალავი შრომის შედეგად 1000-მდე პატენტი მიიღო გამოგონებაზე, რომელთა უმრავლესობა ტექნიკის სხვადასხვა სფეროში დაინერგა. იგი 1943 წ. აშშ-ში გარდაიცვალა. მის სახელთანაა დაკავშირებული მაგნიტური ინდუქციის ერთეულის სახელი - ტესლა. იგი იყო გენიალური გამომგონებელი და მეცნიერი, რომელმაც წინ გაუსწრო თავის ეპოქას [1].

ტესლამ წამოაყენა ზემოთაღნიშნული პრობლემის საფუძვლიანი გადაწყვეტა, რომელიც იმთავითვე აღმოჩნდა მისაღები პრაქტიკული მიზნებისათვის. მან ნათლად წარმოადგინა, რომ თუ ელექტროძრავას მაგნიტური პოლუსების კვებას განვახორციელებთ ორი განსხვავებული ცვლადი დენით, რომლებიც ერთმანეთისგან ფაზათა ძვრით იქნებოდნენ განსხვავებული, მაშინ ამ დენების მონაცვლეობა გამოიწვევს ჩრდილო და სამხრეთ პოლუსების ცვალებად წარმოქმნას, ანუ მაგნიტური ველის ბრუნვას. მბრუნავმა მაგნიტურმა ველმა კი უნდა აიყოლიოს მანქანის როტორის გრაგნილი ბრუნვაში. შექმნა რა სპეციალური ორფაზა კვების წყარო (ორფაზა გენერატორი) და ასეთივე ორფაზა ელექტროძრავა, მან შეძლო განეხორციელებინა თავისი იდეა. განიხილა რა ყველა შესაძლო ფაზათა ძვრა, იგი შეჩერდა 90⁰-იან ფაზათა ძვრაზე და თავის საპატენტო განაცხადში მცირედ შეეხო მრავალფაზა დენებს და მათ შესაძლებლობებს. ამით მან შეძლო ელექტროენერჯის დიდ მანძილზე გადაცემა და შესაბამისად ელექტროსადგურების მშენებლობა ცენტრალიზებული ენერგომომარაგებისათვის. 1883 წ. ნიაგარის ჩანჩქერზე მან ააგო იმ დროისათვის უმსხვილესი ჰესი, რომელიც იძლეოდა ორფაზა დენს 75 მგვტ სიმძლავრით, რომელიც ჰყოფნიდა ე. ბუფალოს

განათებისათვის. ზემოაღნიშნულმა საფუძველი ჩაუყარა მრავალი ტექნიკური მეცნიერების შემდგომ განვითარებას. ორფაზა დენის სისტემის შექმნა უთუოდ წინ გადადგმული ნაბიჯი გახლდათ.

ამავე დროს ბერლინში რუსი ინჟინერი მ.ო. დოლივო-დობროვოლსკი გერმანიაში ფირმა „AEG“-ში იკვლევდა სამფაზა ცვლად დენს. 1889 წელს მან სამფაზა დენის სისტემაზე წამოაყენა წინადადება, შექმნა სამფაზა ასინქრონული ძრავა, სამფაზა ტრანსფორმატორი და გენერატორი. სამფაზა დენზე მომუშავე დანადგარებზე ჩატარებულმა ცდებმა აჩვენა, რომ ამ სახეობის დენს გააჩნია მნიშვნელოვანი უპირატესობები. შეკრული სამფაზა სისტემა მოითხოვდა მხოლოდ სამ ელექტროგადამცემ სადენს, განსხვავებით ნ. ტესლას მიერ შემოთავაზებული არაშეკრული სისტემისაგან, რომელიც მოითხოვდა ოთხ სადენს. 1891 წელს მ. ო. დოლივო-დობროვოლსკიმ დაამთავრა 175 კმ-იანი ელექტროგადამცემის ხაზი 15 კვ ძაბვით და ლაოფენში აღჭურვა ჰესი, რომელზეც დააყენეს სამფაზა გენერატორი 190 კვტ სიმძლავრის სამალღებელი ქვესადგურით და სადაბლებელი ქვესადგურით ფრანკფურტში.

ამასთან დაკავშირებით იზრდება ელექტროსადგურების სიმძლავრეები, იქმნება ტურბოგენერატორები, რომლებიც უშუალოდ მიერთებულია ორთქლის ტურბინასთან. მატულობს გენერატორებისა და ტრანსფორმატორების სიმძლავრეები. თუ 1900 წელს თითოეული გენერატორის სიმძლავრე არ აღემატებოდა 5 მგვტ-ს, 1920 წელს შექმნილი იყო ტურბოგენერატორი 60 მგვტ სიმძლავრით. წყალბადის გაგრილებამ შესაძლებლობა მისცა აგებულიყო ტურბოგენერატორი 500 მგვტ სიმძლავრით. თანამედროვე მძლავრი ტრანსფორმატორების მ.ქ.კ. აღწევს 99%-ს. დღეისათვის შესაძლებელია ელექტროდენის გადაცემა მაგისტრალური ხაზებით საკმაოდ მაღალი ძაბვით დიდ მანძილებზე (რამდენიმე ასეული კილომეტრით).

ელექტროგადამცემის სისტემებში, მიუხედავად თანდათანობით წინ გადა-

დგმული პროგრესული ნაბიჯებისა, არსებობს პრობლემები, რომლებიც მოითხოვენ მათ გადაწყვეტას, კერძოდ:

1. ელექტროგადაცემის ხაზის გამტარუნარიანობის ამაღლება;
2. ელექტროენერგიის მიწოდების საიმედოობის გაზრდა, ელექტროგადაცემის ხაზების ავარიული ამორთვების შემცირების მიმართულებით;
3. მომხმარებლის მხრიდან ელექტროგადაცემის სისტემისადმი წაყენებული მოთხოვნების უზრუნველყოფა მინიმალური დანახარჯების პირობებში - სისტემის ძირითადი ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის გამართვა და საიზოლაციო მასალების ხარჯების შემცირება;
4. გარემოსადმი ნაკლები ეკოლოგიური ზიანის მიყენება.

აღნიშნული საკითხების გადაწყვეტა აქტუალურია, ვინაიდან ხაზის გამტარუნარიანობის ამაღლება არსებული ტექნოლოგიებით (სამფაზა სისტემით) განხორციელების შემთხვევაში მოითხოვენ მრავალჯაჭვიან ზემალ და ულტრამალ ძაბვებზე გადასვლას, ეს კი ართულებს როგორც მისი მშენებლობის და მონტაჟის საკითხებს, ასევე ამცირებს ელექტროგადაცემის საიმედოობას, ზრდის როგორც ფერადი ლითონის ისე შავი ლითონის და საიზოლაციო მასალის ხარჯს, აუარესებს ეკოლოგიას. აქედან გამომდინარე დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს აღნიშნული საკითხების ინოვაციური გზით გადაწყვეტას.

ელექტროგადაცემის ხაზის გამტარუნარიანობის ამაღლების მიმართულებით ბოლო ხანებში ელექტროენერგეტიკაში გაჩნდა ორი ალტერნატიური მიმართულება;

1. ა.შ.შ-ში უკვე ექვსფაზა და თორმეტფაზა ელექტროგადაცემაზე მუშაობენ (<https://www.slideshare.net/naibedyal/six-phase-transmission>). Seminar Report of Six Phase Transmission System. Published on Jan 31, 2015.

2. რუსეთის ფ.რ-ში კი ოთხფაზა ელექტროგადაცემაზე. (Красильникова Т. Г. Автореферат Дисертация. «Разработка четырехфазной технологии передачи эле-

ктроэнергии на дальние расстояния». 2013. «Новосибирский государственный технический университет»).

რაც შეეხება ა.შ.შ-ის 'SIET'-ის ელექტროტექნიკური დეპარტამენტის მიერ ჩატარებულ კვლევებს ექვსფაზა სისტემაზე მიღებული შედეგები შემდეგია:

1. ექვსფაზა სისტემას ისინი ღებულობენ ელექტროტექნიკაში ცნობილი ხერხით სამფაზა სისტემიდან.

2. გადაცემული სიმძლავრე ორჯაჭვა სამფაზა სისტემასთან შედარებით 73%-ით იზრდება.

3. ელქტროგადაცემის დროს ხმაური მცირდება 4–5 db-ით.

4. სიმძლავრის დანაკარგები დაახლოებით 6–ჯერ მცირდება ორჯაჭვა სამფაზა სისტემასთან შედარებით.

ნოვოსიბირსკის ტექნიკური უნივერსიტეტის მეცნიერები მუშაობენ ზემალა და ულტრამალა ძაბვის გადამცემი ხაზებისათვის ოთხფაზა სისტემის მიღებაზე, ჩ. სკოტის ორი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით. მყარი ერთფაზა დაზიანების დროს, ოთხფაზა სისტემა გადაყავთ სამფაზა რეჟიმში. ამ დროს დამატებით იყენებენ სკოტის ერთ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, რაც საშვალეზას იძლევა გადავცეთ ოთხფაზა სისტემის სიმძლავრის 75%-ი. ასეთი შესალებლობის გამო ოთხფაზა ელექტროგადაცემა საიმედობის დონით შეესაბამება ორჯაჭვა სამფაზა გადაცემას სარეზერვო ფაზით, ამასთან ხაზის ქვეშ ელექტრული მაქსიმალური დამაბულობა შეადგენს სამფაზა გადაცემის 35–50%-ს.

ჩვენი აზრით ზემოთაღნიშნული ოთხფაზა და ექვსფაზა სისტემას გააჩნია როგორც დადებითი ისე უარყოფითი მხარეები. აღნიშნული პრობლემების მათ მიერ გადაწყვეტა მხოლოდ ელექტროგადაცემის მიმართულებით შემოიფარგლება. ჩვენი მცდელობა ამ საკითხების კომპლექსურ ჭრილში: გენერაცია–გადაცემა–მოხმარების მიმართულებით მოიაზრება, ვინაიდან ისინი

ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირში არიან და მათი ცალკე განხილვა მიზანშეწონილად არ მიგვაჩნია.

მათგან განსხვავებით, თეორიულად დავამუშავეთ ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპიალური ელექტრული სქემა, რომელიც საშვალეებს მოგვცემს ორფაზა დენის გენერაციით მივიღოთ ოთხფაზა სიმეტრიული ელექტროდენი, რომელიც გამოირჩევა სიმარტივით და ნაკლები თვითღირებულებით. იგი ჩ. სკოტის ორი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის ნაცვლად საჭიროებს მხოლოდ ერთ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ სკოტის ტრანსფორმატორი პირველადი გრაგნილების ხვიათა რიცხვთან მიმართებაში ასიმეტრიულია, კერძოდ ეს ასიმეტრია $\frac{\sqrt{3}}{2}$ -ს შეადგენს. ჩვენი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი ორფაზა-ოთხფაზაა, გამოირჩევა სიმეტრიულობით, მისი ოთხივე ფაზის გრაგნილი შეიცავს ხვიათა ტოლ რაოდენობას.

კვლევის პროცესში დავსვით კითხვა, ხომ არ არის შესაძლებელი არსებული სიმეტრიული სამგრაგნილიანი სამფაზა დენის გენერაცია მიგვეღო ორი გრაგნილით, რომელნიც 90°-იანი კუთხით არიან დაძრულნი, ანუ გენერატორის სტატორის ღრმულებში ჩახვეულიყო ისეთი ორი გრაგნილი 90°-იანი ფაზათა წანაცვლებით, რომელიც გენერაციის დროს მოგვცემდა 120°-იანი კუთხით დაძრულ სიმეტრიულ სამფაზა დენს. აღმოჩნდა, რომ შესაძლებელია. შევქმენით ინოვაციური პრინციპიალური ელექტრული სქემა, რომელიც შემდგომ თეორიულად დავასაბუთეთ. ამის თაობაზე განაცხადი შევიტანეთ საქპატენტში, რომლის საფუძველზეც ჩვენზე გაიცა პატენტი № U1926 დასახელებით „ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანა“. მოგეხსენებათ ელექტრული მანქანა ფუნქციონირებს აგრეთვე ძრავულ რეჟიმშიც. ამიტომ აღნიშნული ელექტრომანქანის დანერგვა შესაძლებელია ასევე მრეწველობის მრავალ სფეროში როგორც ელე-

ქტროძრავა. იგი სამფაზა ელექტროძრავებთან შედარებით გამოირჩევა მეტი საიმედოობით და ნაკლები თვითღირებულებით.

ზემოთ აღნიშნული პრობლემების გადაწყვეტის მცდელობა გვაქვს დასახული სამი ალტერნატიული ვარიანტით:

პირველი ვარიანტი:

1. ვახორციელებთ ორფაზა (90⁰-იანი ფაზური ძვრის კუთხის მქონე) გენერაციას რომელსაც ვაკავშირებთ ჩვენს მიერ შემუშავებული ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზთან შესაბამისი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით, ხოლო ხაზის ბოლოში ისევ ვიყენებთ აღნიშნულ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, შესაბამისი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით, რის შემდეგაც მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით მიღებული ორფაზა დენი სამი სადენის მეშვეობით მიგვყავს როგორც საწარმოო ისე საყოფაცხოვრებო დანიშნულების მომხმარებლებთან.

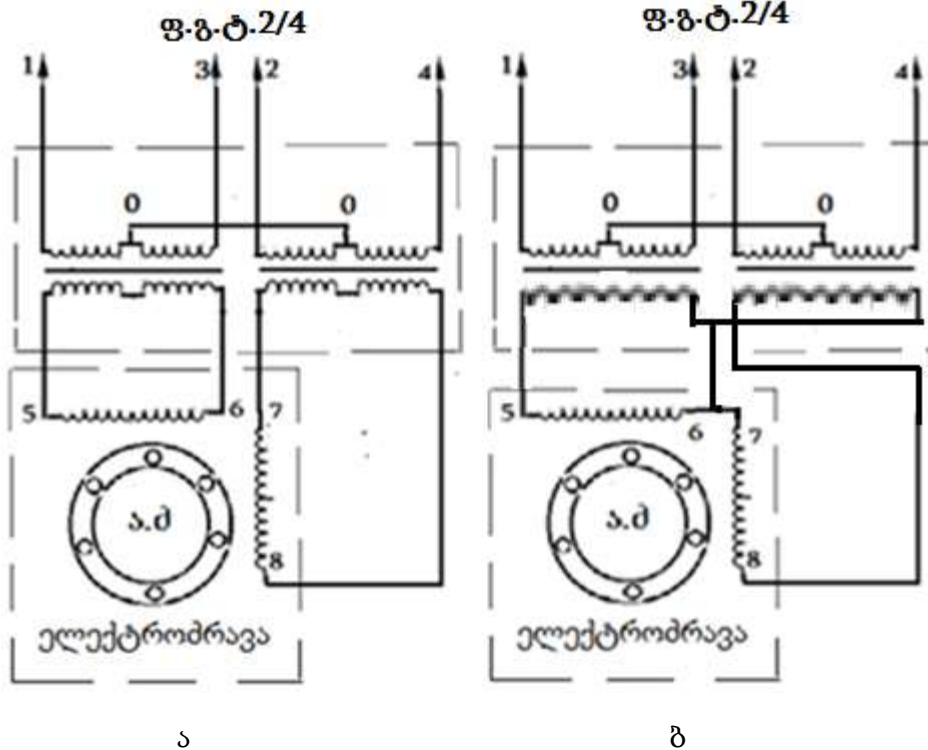
2. ვახორციელებთ ორგრაგნილიან სამფაზა გენერაციას და მას ვაკავშირებთ ჩ. სკოტტის ორი სამფაზა-ორფაზა ფაზოგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზთან ტრანსფორმაციის შესაბამისი კოეფიციენტით. ხაზის ბოლოში კი ვიყენებთ ჩვენს მიერ შემუშავებული ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს ტრანსფორმაციის შესაბამისი კოეფიციენტით, რის შემდეგაც მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით მიღებული ორფაზა დენი სამი სადენის მეშვეობით მიგვყავს როგორც საწარმოო ისე საყოფაცხოვრებო დანიშნულების მომხმარებლებთან.

3. ვახორციელებთ ორგრაგნილიან სამფაზა გენერაციას და მას ვაკავშირებთ ჩ. სკოტტის ორი სამფაზა-ორფაზა ფაზოგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზთან ტრანსფორმაციის შესაბამისი კოეფიციენტით. ხაზის ბოლოში ისევ ვიყენებთ აღნიშნულ ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, შესაბამისი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით, რის შემდეგაც მანაწილებელი ქსელების მეშვეობით მიღებული სამფაზა დენი მიგვყავს

სამფაზა მომხმარებლებთან. ამ შემთხვევაში სასურველია სამფაზა მომხმარებელი დაკომპლექტებული იყოს ჩვენი პატენტით ორგრაგნილიანი-სამფაზა ელექტროძრავებით.

ჩვენი სიახლეა:

- 1.“ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანა“-პატენტი №U 1926;
- 2.სიმეტრიული ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპიალური სქემა;
- 3.სიმეტრიულ ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დროს როგორც შუალედური საყრდენი ანძების კონსტრუქცია ისე კუთხურ-ანკერული საყრდენების კონსტრუქციაც მარტივდება ხოლო მათი რაოდენობა, მთიან რეგიონებში დამონტაჟების დროს მცირდება (სამის ნაცვლად გვექნება ორი საყრდენი) ამასთან თუ ერთჯაჭვა ოთხფაზა გადაცემის სადენების ჯამური კვეთი ტოლი იქნება ორჯაჭვა სამფაზა გადაცემის სადენების ჯამური კვეთის, მაშინ ოთხფაზა გადაცემით გადაცემული სიმძლავრის სიდიდე ტოლი იქნება ორჯაჭვა სამფაზა გადაცემით გადაცემული სიმძლავრის და ამავდროულად საიზოლაციო მასალის – გირლიანდების ხარჯიც შემცირდება თითქმის 33%-ით.
- 4.სიმეტრიული ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გამოყენება საშვალებას მოგვცემს განვახორციელოთ ორფაზა ელექტროძრავების ელექტროკვება (ნახ.1. ა,ბ.). ასეთი ძრავების დანერგვა შესაძლებელი იქნება სამრეწველო (შეკრული და არაშეკრული სისტემით) და საყოფაცხოვრებო (შეკრული სისტემით) დანიშნულებით. მათი საიმედოობა მაღალი იქნება, ვინაიდან ისინი ორგრაგნილიანი ორფაზაა, ხოლო განსაკუთრებით მაღალი საიმედოობა ექნებათ არაშეკრული სისტემის ძრავებს ვინაიდან მათ გრაგნილებს ერთმანეთთან ელექტრული კავშირი არ ექნებათ.
- 5.როგორც ალტერნატიული ვარიანტი შესაძლებელია მრეწველობის მრავალ სფეროში დანერგილი იქნეს ჩვენზე გაცემული პატენტი: № U 1926, რომელიც



ნახ.1. ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი (ფ.გ.ტ.2/4) და ა-არაშეკრული და ბ-შეკრული სისტემის ორფაზა ასინქრონული ელექტროძრავა.

არსებულ სამფაზა ძრავებთან შედარებით მეტი საიმედოობითა და დაბალი თვითღირებულებით გამოირჩევა. თუ აღნიშნულ ორგრაგნილიან-ორფაზა და ორგრაგნილიან-სამფაზა ელექტროძრავების ფაზური ძაბვების სიდიდე მათი არსებული სამფაზა ელექტროძრავების ფაზური ძაბვების ტოლი იქნება, მაშინ ელექტროუსაფრთხოება შედარებით გაიზრდება.

6.თეორიული დამტკიცების გზით დადგენილია სამსადენიანი ორფაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და უკუსადენის ელექტრული პარამეტრები;

7.მიღებულია ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები დატვირთვის დენისა და დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით .

8.მიღებულია ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დატვირთვის ფაზური დენების და სადენთა ტევადობის საანგარიშო გამოსახულებები.

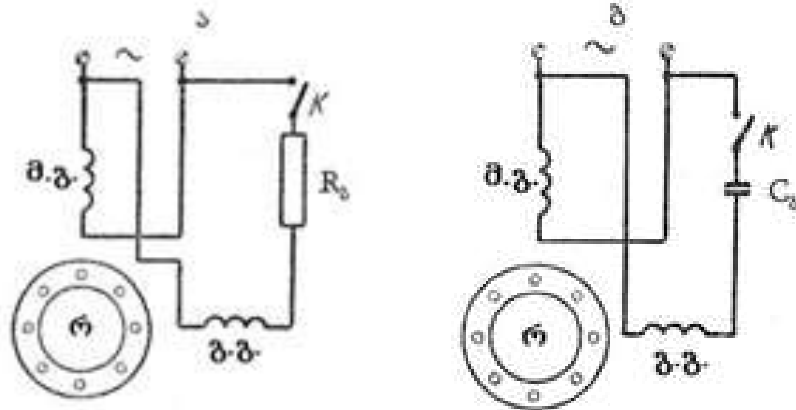
თავი 1. ამოცანის დასმა

1.1. ცვლადი დენის ელექტრომანქანები

ელექტროტექნიკიდან ცნობილია რომ ერთფაზა ელექტროდენი მბრუნავ მაგნიტურ ველს და მასთან დაკავშირებით მბრუნავ მომენტს არ ქმნის. საცხოვრებელ სახლებში კი ერთფაზა ელექტროქსელია შეყვანილი. საყოფაცხოვრებო დანიშნულების პრაქტიკამ მოიტანა იმის აუცილებლობა, რომ ადამიანის ცივილიზებულად არსებობისათვის მან გამოიყენოს მრავალი ელექტრომექანიკური მანქანა–იარაღი და მოწყობილობა. მაგალითად: ტანსაცმლის სარეცხი მანქანა, კონდიციონერი, მაცივარი, ჭურჭლის სარეცხი მანქანა და სხვა მრავალი. ამ მიზნის განხორციელებისათვის თავის დროზე იდგა პრობლემა, თუ ელექტროძრავამ როგორ იფუნქციონიროს ერთფაზა ელექტროქსელიდან.

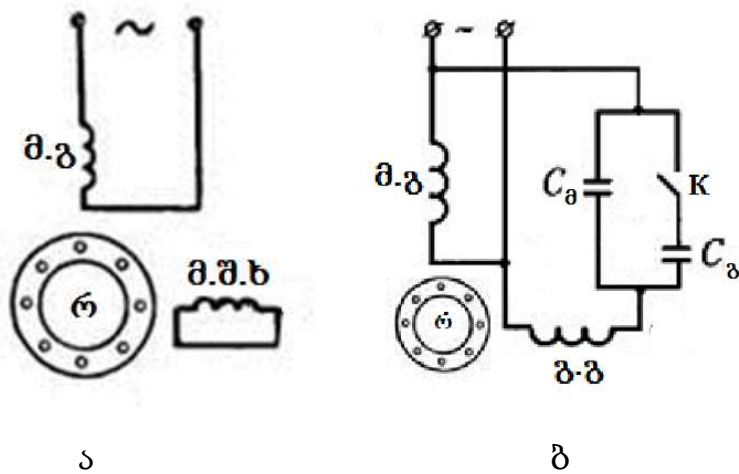
მბრუნავი მომენტი, რომ შექმნას ელექტროძრავამ ამისათვის საჭიროა, რომ იგი შეიცავდეს მინიმუმ ორ გრაგნილს ანუ მისი სტატორი უნდა შედგებოდეს მინიმუმ ორი ფაზისაგან, ხოლო ორფაზიანი ძრავას ასამუშავებლად კი საჭიროა ორფაზა ქსელი. დღეისათვის ორფაზა ქსელი არ არსებობს. ორფაზა ძრავებს ელექტროტექნიკოსები ერთფაზა ქსელიდან შემდეგნაირად ამუშავებენ. ელექტროძრავას სტატორში აახვევენ ორ გრაგნილს, რომლებიც სივრცეში განათავსეს ერთმანეთისაგან 90° -ით წანაცვლებული, ხოლო დროში მათი წანაცვლება მოახდინეს ისევ 90° -ით კონდენსატორის მეშვეობით, მაგრამ ასეთი შესრულებით ელექტროძრავას მექანიკური დატვირთვის ცვალებადობის დროს ფაზებში გადის განსხვავებული სიდიდის არასიმეტრიული დენი, რაც მბრუნავი წრიული მაგნიტური ველის ნაცვლად გვაძლევს ელიფსურ მბრუნავ მაგნიტურ ველს. ამ დროს იზრდება ელექტრული და მაგნიტური კარგვები, მცირდება მ.ქ.კ. გარდა აღნიშნულისა კონდენსატორის არსებობის აუცილებლობა იწვევს მთლიანობაში ელექტროძრავას მოცულობისა და მასის, ასევე თვითღირებულების გაზრდას, მისი დამზადებისა და მომსახურების ტექნოლოგიური პროცესის გართულებას და, შესაბამისად, საიმედოობის შემცირებას.

არსებობს ერთფაზა ქსელიდან მომუშავე შემდეგი სახეობის ასინქრონული ძრავები: გამშვი წინალობით (ბიფილიარული გრაგნილით), გამშვი კონდენსატორით, გამშვი და მუშა კონდენსატორით, მოკლედ შერთული ხვით სტატორში [2] და სტატორის ასიმეტრიული უღელით. ნახ.1.1.1 ა, ბ.-ზე ნაჩვენებია ასინქრონული ძრავა გამშვი წინალობით და გამშვი კონდენსატორით,



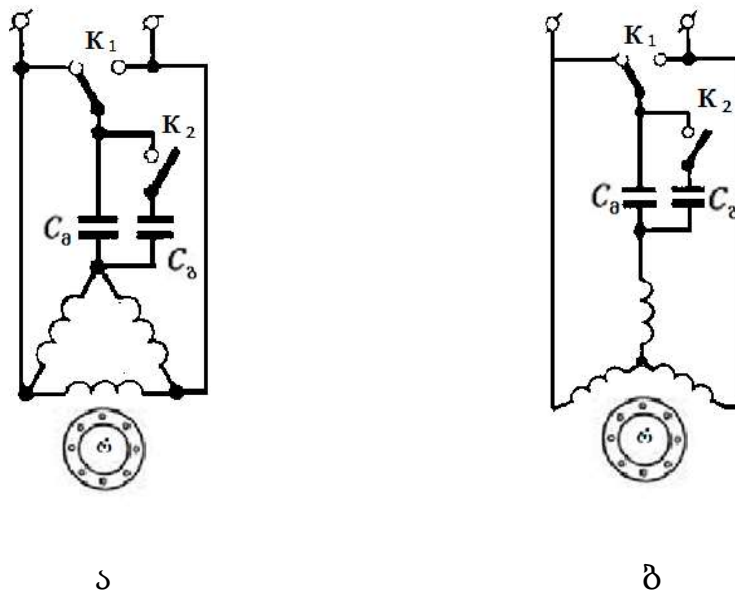
ნახ.1.1.1 ასინქრონული ძრავას ჩართვის სქემა: ა- გამშვი წინალობით; ბ- გამშვი კონდენსატორით.

ხოლო ნახ.1.1.2.ა, ბ-ზე შესაბამისად ასინქრონული ძრავა მოკლედ შერთული ხვით სტატორში და გამშვი და მუშა კონდენსატორით. ამ უკანასკნელი სქემით მაქსიმალური სიმძლავრის მიღება შესაძლებელი.



ნახ.1.1.2.ა -ასინქრონული ძრავა მოკლედ შერთული ხვით სტატორში. ბ-გამშვი და მუშა კონდენსატორით.

ორფაზა ქსელის პირობებში ორფაზა ძრავას ფუნქციონირებისათვის კონდენსატორის საჭიროება არ არის, ანუ იგი ორფაზა ძრავასათვის ზედმეტი ელემენტია. პრაქტიკაში ხშირად სამფაზა ქსელის არ არსებობის დროსაც, სამფაზა ელექტროძრავებსაც ერთფაზა ქსელიდან კონდენსატორის მეშვეობით ამუშავებენ და ამ დროს როგორც წესი გამოყენებული სამფაზა ძრავას სიმძლვრე ერთფაზა ქსელიდან მუშაობის დროს დაახლოებით თავისი ნომინალური სიმძლავრის 35-40%-ს კარგავს, რაც ხშირად დაუშვებელია. ნახ.1.1.3.ა, ბ-ზე ნაჩვენებია სამფაზა ასინქრონული ძრავა გამშვი და მუშა კონდენსატორით [3].



ნახ.1.1.3.სამფაზა ასინქრონული ძრავა გამშვი და მუშა კონდენსატორით:
 ა-გრანულიების ვარსკვლავური შეერთებით; ბ-გრანულიების- სამკუთხედური შეერთებით.

დღეისათვის მცირე საწარმოები საკმაო რაოდენობით არსებობს. მათ უმრავლესობას სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესების განხორციელებისათვის სამფაზა ელექტროქსელი სჭირდებათ. მაგრამ დღეისათვის სამფაზა ელექტროქსელი შედარებით ძვირია, რის გამოც ბევრი მეწარმე როგორც უკვე ზემოთ ავღნიშნეთ სამფაზა ძრავებს ერთფაზა ქსელიდან ამუშავებენ კონდენსატორის მეშვეობით. ე. ი სამფაზა ძრავებსაც რეალურად ორფაზა რეჟიმში უხდებათ

ფუნქციონირება, თანაც არასიმეტრიულ რეჟიმში. ამ დროს ნულოვანი მიმდევრობის დენები წარმოიქმნება რაც დამატებით კარგებს იძლევა. ასეთივე მოცულობის ორფაზა კონდენსატორულ მანქანაში კარგები შედარებით ნაკლებია ვინაიდან აქ ნულოვანი მიმდევრობის დენი არ გვაქვს, ამიტომ ასეთ ძრავებში სიმძლავრე სამფაზა ძრავას სიმძლავრის 80%-ის უტოლდება.[იხ.4, გვ.155]. დღეისათვის გაჩნდა მოთხოვნილება ისეთ გარდამქმნელებზე, რომლებიც ერთფაზა ქსელიდან მოგვცემენ სამფაზა ან ორფაზა დენს. ასეთი გარდამქმნელები კი ან საკმაოდ ძვირია მცირე მეწარმესათვის ან საკმაოდ ძნელად საშოვარია, ანუ პრობლემას წარმოადგენს. სამფაზა სისტემის დამონტაჟება დამატებით მოითხოვს სამფაზა მრიცხველის დამონტაჟებასაც, რაც დამატებით აძვირებს მის ღირებულებას. მაგრამ დღეისათვის არც ორფაზა ძრავები არსებობს, გამონაკლის წარმოადგენს მცირე სიმძლავრის რამდენიმე ერთეული ან ათეული ვატი სიმძლავრის მქონე ძრავები, რომლებიც ავტომატური მართვის სისტემებში ან სამხედრო დანიშნულებისთვისაა განკუთვნილი ან კოსმოსური ხომალდებისათვის. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგჯერ ასეთი ორფაზა ელექტროძრავები სამფაზა დენის წყაროდანაც იკვებება, მაგალითად (АКИ-1000М) კოსმოსურ საფრენ აპარატებში 40 ვოლტი ძაბვისა და 1000 ჰვ სიხშირის დროს, რაც მიზანშეწონილი არ არის.

დღეისათვის მსოფლიოში მთელი წარმოებული ელექტროძრავების 80%-ს ასინქრონული ძრავები წარმოადგენს, რომელთა ასეთი გავრცელება განპირობებულია მათი კონსტრუქციისა და დამზადების ტექნოლოგიის სიმარტივით, დაბალი თვითღირებულებითა და მაღალი საიმედოობით. სამფაზა ასინქრონული ძრავების მწყობრიდან გამოსვლის შემთხვევაში ადვილი შესაძლებელია მათი გადაკეთება ორფაზა სისტემაზე. მათი დამზადების ტექნოლოგია ანალოგიურია არსებული სამფაზა ძრავების, იმ განსხვავებით, რომ მათში განხორციელდება სამი გრაგნილის ნაცვლად ორი გრაგნილის ჩახვევა, რაც შედარებით ამარტივებს დამზადების ტექნოლოგიას, ამცირებს მის თვითღირებულებასა და

კიდევ უფრო ზრდის საიმედოობას. ამასთან, შედარებით ნაკლები ფაზათაშორისი იზოლაცია და გამომყვანი ხუნდების ნაკლები რაოდენობა იქნება საჭირო. ჩახვეული გრაგნილის გამომყვანი წვეროების სქემის შეერთებისათვის ორფაზა ძრავას შემთხვევაში ნაკლები გამომყვანი წვეროების შედუღებაა საჭირო, რაც ტექნოლოგიური დამზადების პროცედურას ამარტივებს.

ორფაზა ძრავას კვებისათვის ორფაზა დენის წყაროა საჭირო, ამისათვის კი ორფაზა დენის გენერატორის ან ნახევარგამტარული გარდამქმნელის აუცილებლობის საკითხი დგება. ასეთ შემთხვევაში უკვე კონდენსატორების გამოყენება აღარ დაგვჭირდება. ამით კი ჩვენ იმას მივალწევთ, რომ ორფაზა ძრავას სიმძლავრე გადახვეული სამფაზა ძრავას კონსტრუქციაში (ანუ იგივე მოცულობაში) მისი სიმძლავრე 35-40%-ით არა თუ არ დაიკლებს, არამედ სამფაზა ძრავას სიმძლავრეს გაუტოლდება, ვინაიდან მის მიერ შექმნილი მბრუნავი მაგნიტური ველი ელიფსურის ნაცვლად, აუცილებლად წრიული იქნება, თუ მის ელექტროკვებას სიმეტრილი ძაბვით მოვახდენთ. გარდა ამისა, ორფაზა ძრავას სიმძლავრე, არსებულ ე.წ. „ერთფაზა ძრავებზე“ (ერთფაზა ქსელიდან მომუშავეზე) მეტია, რადგან იგი სიმეტრიულ რეჟიმში მუშაობს განსხვავებული სიმეტრიული დატვირთვების დროსაც, განსხვავებით ერთფაზა ქსელიდან მომუშავე (ორ გრაგნილიანი) ძრავებისაგან.

ორფაზა ასინქრონული ძრავების ორფაზა დენით კვება შესაძლებელია ორი გზით:

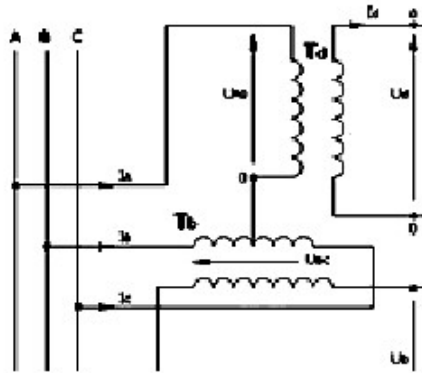
1. გამოჩენილი ამერიკელი ინჟინრის, ჩ. სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გამოყენებით, რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელია სამფაზა სისტემიდან ორფაზა დენის მიღება.
2. ორფაზა დენის გენერაციით, ანუ ორფაზა (90⁰-იანი ფაზათა ძვრით) გენერატორის გამოყენებით, სადაც გენერაცია ორი გრაგნილის საშუალებით მოხდება. სამფაზა გენერატორისაგან განსხვავებით, ორფაზა გენერატორში ნაკლები ფაზათაშორისი იზოლაცია იქნება საჭირო და ნაკლები რაოდენობის

გამომყვანი ხუნდები და რადგან ორფაზა გენერატორი ორ გრაგნილს შეიცავს, ამიტომ მისი საიმედოობა სამფაზა გენერატორთან შედარებით მაღალი იქნება. ორფაზა დენით კვების დროს ორფაზა დენის მრიცხველების დამონტაჟება გახდება საჭირო, რაც შედარებით ნაკლები თვითღირებულების იქნება და მისი მომსახურებაც გაადვილდება.

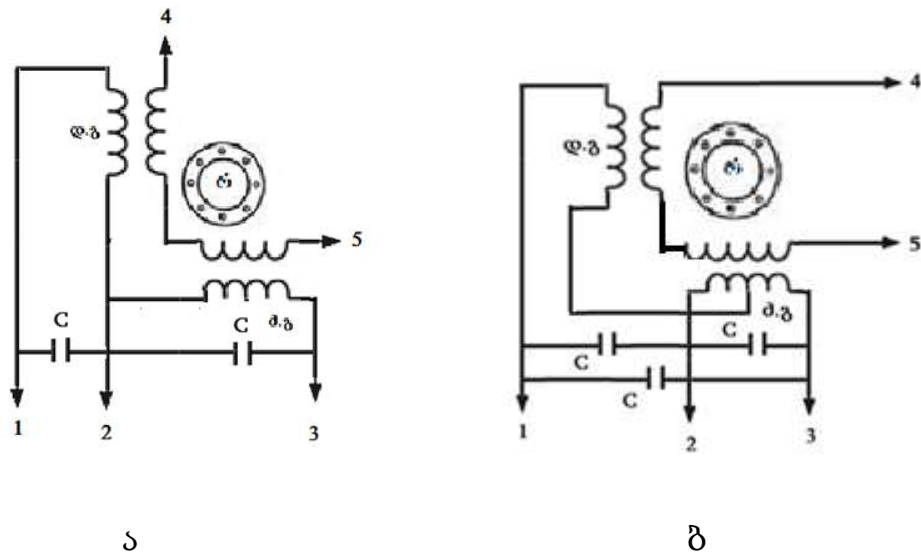
1.2. ორგრაგნილიანი ორფაზა და ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანები

იქ სადაც ელექტროფიცირებული ქსელი არ გაგვაჩნია ავტონომიური კვების წყაროდ, განსაკუთრებით მისაღებია მცირე და საშუალო სიმძლავრის ასინქრონული (რეზონანსული-კონდენსატორული აგზნებით) გენერატორის გამოყენება, ვინაიდან მის მიერ გენერირებული ძაბვის ფორმა, სინქრონული გენერატორთან შედარებით უფრო მიახლოებულია სინუსოიდის ფორმას. გარდა ამისა თუ ასინქრონული გენერატორი სწორადაა დაპროექტებული, გადატვირთვისაგან ავტომატურად დაცული გამოდის, ვინაიდან გადატვირთვის დროს მისი მაგნიტური ველი ავტომატურად გაქრება (მოხდება მაგნიტური წრედის განმაგნიტება) და გენერატორი მწყობრიდან არ გამოვა. ეს გარემოება მის ერთერთ დადებით თვისებას წარმოადგენს [5]. ასინქრონული გენერატორი კარგად ფუნქციონირებს ორი სამფაზა გრაგნილიანი და ორი ორფაზა გრაგნილიანი სქემით [6]. იგი საშუალებას გვაძლევს მასში გამოყენებული იქნეს ჩ. სკოტის ცნობილი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის სისტემა-სქემა, განსაკუთრებით მაშინ, როცა მოთხოვნაა დაბალ ძაბვაზე, კერძოდ საამშენებლო სფეროში ელექტროინსტრუმენტების და სოფლის მეურნეობაში (მეცხოველეობაში) მცირე მექანიზაციის ელექტროფიცირებული ხელსაწყო-ინსტრუმენტების ელექტროუსაფრთხო კვებისათვის [7], რაც საშუალებას მოგვცემს ერთ კონსტრუქციაში მივიღოთ ორფაზა-სამფაზა გენე-

რატორი. ჩ. სკოტის ტრანსფორმატორის სისტემა-სქემა ნაჩვენებია ნახ.–
1.2.1. -ზე[8].

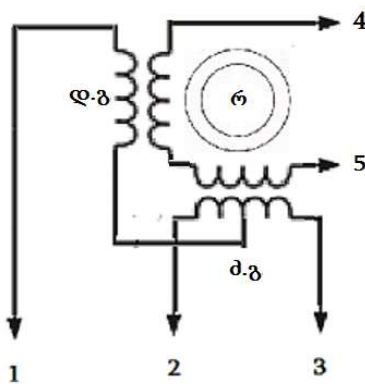


ნახ.1.2.1. ჩარლზ სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორი ავტონომიური ორი ორგრაგნილიანი (ორფაზა და ორფაზა-სამფაზა) ასინქრონული (რეზონანსული აგზნებით) გენერატორი კი მოცემულია ნახ.1.3.2.,ა,ბ-ზე, როდესაც გენერატორის გამომყვანებზე ძაბვა ნაკლებია 110 ვოლტზე.

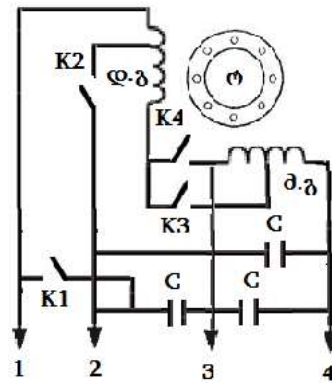


ნახ.1.2.2.ა -ავტონომიური რეზონანსული ორი ორგრაგნილიანი ორფაზა და ბ-ორფა-
ზა-სამფაზა ასინქრონული გენერატორი, ტრანსფორმატორული სქემით), როდესაც
გენერატორის გამომყვანებზე ძაბვა < 110 ვოლტზე. აქ, 1; 2; 3 - აგზნების რაგნილის
გამომყვანი წვეროები; 4-5 – სამუშაო გრაგნილის გამომყვანი წვეროები, რ -როტორი,
ხოლო C- კონდენსატორები.

სკოტის ტრანსფორმატორის მუშაობის პრინციპი საშუალებას გვაძლევს ზემოთ აღნიშნული გამოყენებული იქნეს დინამიურ (როტორიან) ელექტრულ მანქანებში (ძრავებსა და გენერატორებში), მათ შორის, განსაკუთრებით ასინქრონულ და სინქრონულ მანქანებში. ასინქრონული მანქანა გარკვეულ წილად დინამიურ ტრანსფორმატორს წარმოადგენს. სკოტის ტრანსფორმაციის პრინციპი საშუალებას იძლევა ერთ კონსტრუქციაში შევექმნათ, ორფაზა-სამფაზა ელექტრული მანქანა. დღემდე ეს პრინციპი დინამიურ ელექტრულ მანქანებში განხორციელებული არ არის. აღნიშნული საშუალებას იძლევა ერთი და იგივე ელექტრომანქანამ იფუნქციონიროს ხან ორფაზა და ხან სამფაზა რეჟიმში, რაც მას უნივერსალურ თვისებას ანიჭებს. ამისათვის საჭიროა ელექტრული მანქანის (ძრავას, გენერატორის,) სტატორის ღრმულებში ჩაიხვეს ორი ორფაზა გრაგნილი, რომლის ელექტრული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 1.2.3. ა; ბ-ზე.



ა

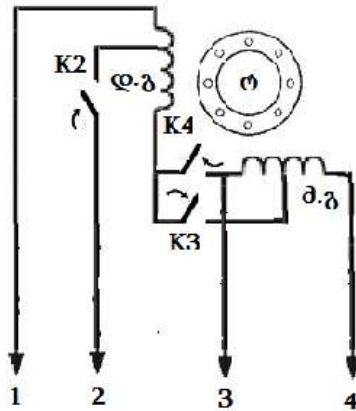


ბ

ნახ.1.2.3. ორფაზა-სამფაზა ელექტრული მანქანა. ა-ძრავული რეჟიმი, ბ- გენერატორული რეჟიმი. სადაც ა-ზე 4 და 5 ტრანსფორმატორული სქემის ორფაზა გრაგნილის გამომყვანი წვერიებია, ხოლო 1; 2 და 3 მისივე სამფაზა გამომყვანი წვერიები. დ.გ-დამხმარე გრაგნილი, ხოლო მ.გ ძირითადი გრაგნილი (ძრავული რეჟიმისათვის). ბ-ზე 1, 3, 4 გენერატორის გამომყვანებია ორფაზა რეჟიმისათვის, 2, 3, 4 -გამომყვანებია სამფაზა რეჟიმისათვის, K1 - K4 და K2 - K3 შესაბამისად ორფაზა და სამფაზა რეჟიმებისათვის ჩამრთველ-გამთიშველებია, C- კონდენსატორებია.

4 - 5 ორფაზა გრაგნილი შედგება ორი ერთფაზა გრაგნილისაგან, რომლებიც ერთმანეთისაგან 90⁰-ით არის (ელექტრულად) დაძრული. ამ 4-5-ორფაზა გრაგნილის თითოეულ ფაზაში ხვიათა რიცხვი ერთმანეთის ტოლია, ხოლო მეორე 1; 2; 3-ორფაზა გრაგნილის თითოეული გრაგნილი ერთმანეთისაგან ასევე 90⁰-ით არის (ელექტრულად) დაძრული, ხოლო ერთი ფაზის გრაგნილის (ძირითადის) ხვიათა რიცხვი მეორე გრაგნილის (დამხმარეს) ხვიათა რიცხვზე $\frac{2}{\sqrt{3}}$ -ჯერ მეტია.

ნახ. 1.2.3.ა-ზე მოყვანილი სქემა შესაძლოა გავამარტივოთ, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ელექტრომანქანამ იფუნქციონიროს ერთი ორგრაგნილიანი სქემით როგორც ორფაზა ისე სამფაზა რეჟიმში, ანუ მივიღოთ ისევ უნივერსალური სქემა. ეს უკანასკნელი მოყვანილია ნახ.1.2.4-ზე.

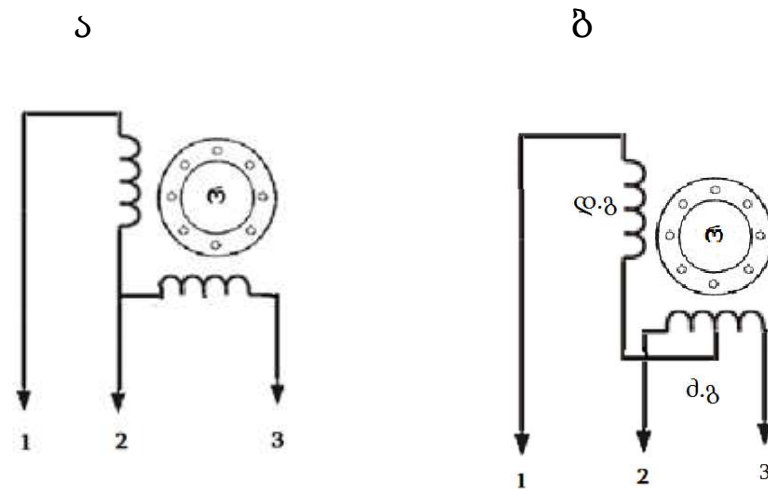


ნახ.1.2.4- უნივერსალური ორგრაგნილიანი ორფაზა-სამფაზა ასინქრონული ძრავას ჩართვის სქემა .

აქ ოთხი გამომყვანი წვერი იქნება მომჭერ ხუნდებზე გამოყვანილი პლუს და-მატებით ერთი გამომყვანი, ძირითადი გრაგნილის შუა წერტილიდან. აღნიშნული გრაგნილის შუა წერტილის გამოყენების გარეშე ელექტრული მანქანა (გენერატორი ან ძრავა) იფუნქციონირებს როგორც ორფაზა, ხოლო ამ გრაგნილის შუა წერტილიდან გამოყვანილი წვეროს გამოყენების შემთხვევაში იგი იმუშავებს, როგორც სიმეტრიული სამფაზა სისტემა. ეს უკანასკნელი გენერატორულ რეჟი-

მში ორფაზა და სიმეტრიულ სამფაზა ელექტრულ დენს მოგვცემს, ხოლო იგივე მანქანა ელექტროქსელიდან კვებისას იმუშავებს როგორც ორფაზა ან სამფაზა ელექტროძრავა, ამისათვის კი სტატორში გრაგნილის გამომყვანი წვეროების ტრანსპოზიცია იქნება მხოლოდ განსახორციელებელი K_1 და K_2 გადამრთველის საშუალებით, რაც სირთულეს არ წარმოადგენს. ზემოთქმულიდან გამომდინარე ერთი და იგივე ასინქრონული ან სინქრონული ელექტროძრავა საჭიროების და მიხედვით შეძლებენ ორფაზა და სამფაზა რეჟიმებში მონაცვლეობით ფუნქცი-ონირებას მათი კონსტრუქციული გადაკეთების გარეშე. ე.ი აღნიშნული სისტემით ორგრაგნილიანი (ორი ერთფაზა) სქემით შესაძლებელია მივიღოთ სიმეტრიული სამფაზა ელექტრომანქანა.

ნახ.1.2.5.ა,ბ-ზე მოცემულია ორფაზა ასინქრონული ძრავას ჩართვა ჩვეულებრივი ორგრაგნილიანი ორფაზა (ნახ.1.2.5.ა) და გამარტივებული ორგრაგნილიანი-სამფაზა (ნახ.1.2.5.ბ) სქემა [9. 10].



ნახ.1.2.5. ორფაზა ასინქრონული ძრავას ჩართვა ჩვეულებრივი ორფაზა(ა) და სამფაზა (ბ) გამარტივებული სქემის გამოყენებით.

ასინქრონული ელექტრომანქანების უპირატესობა სინქრონულ მანქანებთან მით უფრო იჩენს თავს, რაც უფრო დიდ ბრუნვით სიხშირეებზეა იგი გათვლილი. მოკლედ შერთული როტორის ბალანსირება ადვილია და მას შეუძლია დიდი წრიული სიჩქარეები განავითაროს.

ზემოთაღნიშნული ასინქრონული გენერატორი პრაქტიკულად განხორციელებადია ძალზე ადვილად, ვინაიდან მისი დამზადება შესაძლებელია არსებული სერიული წარმოების სამფაზა ასინქრონული ძრავების ბაზაზე. ე.ი მისი დამზადება სრულიად ახალ პროექტირებას არ მოითხოვს და დამზადების ტექნოლოგიაც ცნობილია. აქ მხოლოდ მისი გადაანგარიშებაა საჭირო. დღეისათვის შესაძლებელია ზემოთაღნიშნული სქემით დაპროექტდეს და დამზადდეს ელექტროგენერატორები და ელექტროძრავები არსებული სერიული ელექტროძრავების ბაზაზე. განსხვავება ორგრაგნილიან სამფაზა ელექტრომანქანის სქემასა (ნახ.1.2.3.ბ და ნახ. 1.2.4) და სკოტის ტრანსფორმატორის სქემას შორის მასშია, რომ ელექტრომანქანაში მეორადი გრაგნილის როლს მოკლედ შერთული როტორი ასრულებს.

მსოფლიო მეცნიერთა მიერ დაგროვილი თეორიული ცოდნიდან გამომდინარე თუ შევადარებთ ერთმანეთს ორფაზა და სამფაზა სისტემას, დავინახავთ, რომ ორივე ეს სისტემა სრულფასოვნად ქმნიან მბრუნავ წრიულ მაგნიტურ ველს და შესაბამისად მბრუნავ მომენტს ცვლადი დენის ასინქრონულ და სინქრონულ მანქანებში. ამიტომ, XX ს-ის დასაწყისში ორფაზა სისტემის უარყოფით შეცდომა იყო დაშვებული, ვინაიდან ელექტროენერჯის გადაცემა ორფაზა დენითაც შესაძლებელია, ანუ მას სამფაზა გადამცემ სისტემასთან შედარებით არა მარტო ეკონომიკური, არამედ ეკოლოგიური და საიმედოობის მხრივაც გააჩნია უპირატესობა, ამიტომ საწარმოებში შესაბამისად ორფაზა ელექტრომანქანები უნდა იქნეს დანერგული, მათი საიმედოობა კი სამფაზა სისტემასთან შედარებით დიდია.

იმ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა ორფაზა ქსელიდან მივიღოთ სამფაზა დენი, როგორც აღნიშნეთ XIX ს-ის ბოლოს იყენებდნენ სკოტის ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს, მაგრამ ამისათვის თვით ორფაზა ქსელი უნდა არსებობდეს. მთლიანობაში ეს სისტემა შედარებით რთულია. ელექტრომანქანების გამოყენების შემთხვევაში კი აღნიშნული სისტემა მარტივდება. თუ აღნიშნუ-

ლი პრინციპით დავაპროექტებთ და შემდგომ დავამზადებთ ორგრაგნილიან (ორფაზა) სამფაზა სისტემის ელექტროგენერატორს, მაშინ სკოტის ტრანსფორმატორის გამოყენების აუცილებლობის საკითხი ელექტროენერგეტიკაში მოიხსნება და მის მაგივრად ჩვეულებრივი სტანდარტული ტრანსფორმატორი შეიძლება გამოვიყენოთ. ხოლო ელექტროქსელის დაბალი სიდიდის ძაბვების შემთხვევაში სკოტის ტრანსფორმატორის გამოყენების საჭიროება საერთოდ არ იქნება, რადგან მას ორგრაგნილიანი (ორფაზა) სამფაზა ელექტროგენერატორი ჩაანაცვლებს. აღნიშნული, პრაქტიკულ მნიშვნელობას მაშინ უფრო იძენს, როდესაც მოთხოვნა არა სამრეწველო სიხშირის მიღებაზე, მაგალითად ზოგიერთ ქვეყნებში (აშშ) ელექტრორკინიგზაში (ტრამვაი) 25 კვ-ის და 16 $\frac{2}{3}$ კვ (ევროპაში) გამოყენების დროს. ამ ბოლო ხანებში რუსეთმაც დაიწყო სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორების გამოყენება ელექტრორკინიგზაში 27,5 კვ სიდიდის ძაბვით, ანუ ორფაზა ელექტროგადაცემას იყენებენ [11].

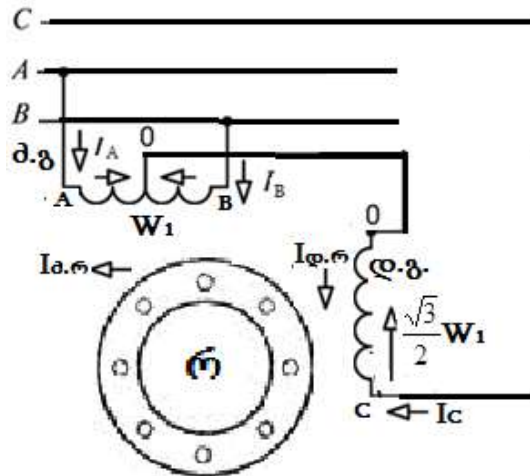
1.3. ორგრაგნილიანი (ორფაზა) სამფაზა ელექტრომანქანის

გრაგნილთა დატვირთულობა.

დამუშავებულია ორგრაგნილიანი-სამფაზა (90° გრადუსიანი ფაზათა ძვრის კუთხის მქონე) ელექტრომანქანა და მისი სამფაზა სისტემაში ჩართვის ელექტრული სქემა, რომელიც გენერატორულ რეჟიმში მოგვცემს 120°-იანი ფაზური ძვრის კუთხის მქონე სიმეტრიულ სამფაზა დენებს, ხოლო ძრავულ რეჟიმში კი გამორიცხავს გამშვი და მუშა კონდენსატორების გამოყენებას და უზრუნველყოფს ძრავას მუშაობის საიმედოობის ამაღლებას, რაზედაც მიღებულია პატენტი № U 1926 სასარგებლო მოდელზე [12] (ნახ. 1.3.1.).

მაგალითისათვის განვიხილოთ მოკლედ შერთულ როტორიანი ასინქრონული ძრავა, რომლის სტატორის გრაგნილები სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპით არის შეერთებული (ნახ. 1.3.1.). თუ მათ ერთმანეთის მიმართ სივრცეში დავძრავთ 90°-ელექტრული გრადუსით და ჩა-

ვრთავთ სამფაზა ელექტროქსელში მაშინ გრაგნილების A, B, C წერტილებში მივიღებთ სამფაზა სიმეტრიულ, ტოლი სიდიდის ხაზურ ძაბვებს, რომლებიც დაძრულნი იქნებიან 120° -ით და მათ გრაგნილებში შესაბამისად გაივლის 120° -ით დაძრული დენები. დავამტკიცოთ ეს უკანასკნელი. AB გრაგნილს ვუწოდოთ ძირითადი გრაგნილი, OC გრაგნილს კი დამხმარე. AB გრაგნილის ხვიათა რიცხვი ტოლია W_1 , ხოლო OC გრაგნილის ხვიათა რიცხვი ტოლია $\frac{\sqrt{3}}{2} W_1$. სტატორის ძირითადი და დამხმარე გრაგნილის მაგნიტური ველები მოკლედ შერთულ როტორში აღძრავენ ე.მ.ძ-ს, რომლებიც მასში შექმნიან ტოლი სიდიდის დენებს, რომლებიც ერთმანეთის მიმართ დაძრულნი იქნებიან დროში



ნახ. 1.3.1.– მოკლედ შერთულ როტორიანი ასინქრონული ძრავას სქემა, სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპით შეერთებული.

90° გრადუსით , ე.ი $I_{d.r} = -jI_{a.r}$ (1)

სადაც: $I_{a.r}$ და $I_{d.r}$ —როტორის გრაგნილში გამავალი დენები.

0-წერტილის მიმართ დავწეროთ კირხჰოფის კანონი

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (2)$$

მაგნიტომამოძრავებელი ძალების წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე სტატორის ძირითადი, დამხმარე და მოკლედ შერთული როტორის გრაგნილის მიმართ დავწეროთ:

$$I_C \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot W_1 - I_{\text{ფ.რ}} \cdot W_2 = 0 \quad (3)$$

$$I_A \cdot \frac{W_1}{2} - I_B \cdot \frac{W_1}{2} - I_{\text{ფ.რ}} \cdot W_2 = 0 \quad (4)$$

$$I_C = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} \quad (5)$$

(2) - (4)-ის გარდაქმნით და (1)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ :

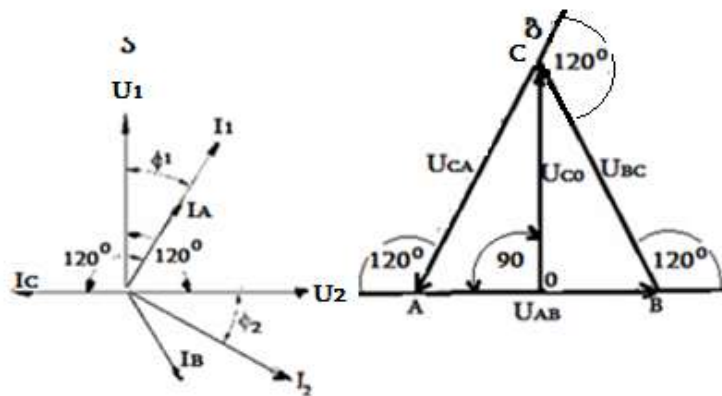
$$I_A + I_B = -I_C = -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1}$$

$$I_A - I_B = 2 \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} = -j \cdot 2 I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} \quad \text{ანუ}$$

$$I_A = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} - j \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (6)$$

$$I_B = -I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{W_2}{W_1} + j I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{ფ.რ}} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (7)$$

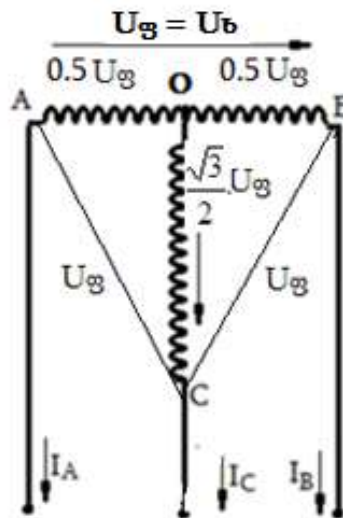
(5)-(7)- დან ჩანს, რომ მიღებული დენების მოდულები ერთმანეთის ტოლია და დენები ერთმანეთის მიმართ თანაბრად მობრუნებულია $\frac{2\pi}{3}$ კუთხით, ანუ ელექტროძრავას ორგრაგნილიანი სამფაზა სისტემა იტვირთება თანაბრად. (ნახ. 1.3.2 – ვექტორული დიაგრამა).



ნახ.1.3.2. ა-პირველადი და ბ-მეორეული გრაგნილის ძაბვებისა და დენების ვექტორული დიაგრამა.

ამრიგად გამოთვლების გზით განვსაზღვრეთ სამფაზა ძრავას ძირითადი და დამხმარე გრაგნილებში გამავალი დენების სრული სიმეტრიულობა. სადაც - (6) და (7)-გამოსახულებაში $\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ და $\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ ფაზური მობრუნების ოპერატორია.

თუ განვიხილავთ ორგრაგნილიან – სამფაზა გენერატორს, ნახ,1.3.3. რომლის სტატორის გრაგნილები სკოტის ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპით არის შეერთებული და ერთმანეთის მიმართ წანაცვლებულია 90° -ელექტრული გრადუსით, მაშინ გენერაციის დროს გრაგნილების A, B, C წერტილებში აღიძვრება სამფაზა სიმეტრიული, ტოლი სიდიდის ხაზური ძაბვები, რომლებიც დაძრულნი იქნებიან 120° -ით:



ნახ,1.3.3. ორგრაგნილიანი სამფაზა გენერატორი.

ორფაზა სისტემის ფაზური ძაბვებით წარმოქმნილი სამფაზა სისტემის ხაზური ძაბვები ჩაიწერება შემდეგი სახით: $U_{AB} = U_{AO} + U_{BO} = U_b = U_g$;

$$U_{AC} = \sqrt{U_{AO}^2 + U_{CO}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}U_g\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_g\right)^2} = U_b = U_g$$

$$U_{BC} = \sqrt{U_{BO}^2 + U_{CO}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}U_{\text{ფ}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\text{ფ}}\right)^2} = U_b = U_{\text{ფ}};$$

ხოლო ამ ძაბვების მყისი მნიშვნელობები და მათ მიერ წარმოქმნილი დენების მნიშვნელობები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{\text{ფ}} = U_{ABm} \cdot \sin \omega t & i_{AB} &= I_{ABm} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ U_{AC} &= U_{\text{ფ}} = U_{ACm} \cdot \sin(\omega t - 120) & i_{AC} &= I_{ACm} \cdot \sin(\omega t - 120 - \varphi) \\ U_{BC} &= U_{\text{ფ}} = U_{BCm} \cdot \sin(\omega t + 120) & i_{BC} &= I_{BCm} \cdot \sin(\omega t + 120 - \varphi) \end{aligned}$$

სადაც $I_{ABm} = I_{ACm} = I_{BCm} = I_{\text{ფ}m}$

ფაზურ სადენებში გამავალი დენების ამპლიტუდური მნიშვნელობებია.

გენერატორის თითოეული ფაზის მყისი სიმძლავრე გამოითვლება:

$$\begin{aligned} P_{AB} &= u_{AB} \cdot i_{AB} = U_{ABm} \cdot \sin \omega t \cdot I_{ABm} \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ფ}} \cdot \sin \omega t \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ფ}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) = 2U_{\text{ფ}} \\ &\cdot \frac{1}{2} [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \omega t - \varphi)] = U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{AC} &= u_{AC} \cdot i_{AC} = U_{ACm} \cdot \sin(\omega t - 120) \cdot I_{ACm} \cdot \sin(\omega t - 120 - \varphi) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ფ}} \cdot \sin(\omega t - 120) \cdot \\ &\sqrt{2} I_{\text{ფ}} \cdot \sin(\omega t - 120 - \varphi) = 2 \cdot U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} \frac{1}{2} [\cos(\omega t - 120 - \omega t + 120 + \varphi) - \cos(\omega t - 120 + \\ &\omega t - 120 - \varphi)] = U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi - 240)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{BC} &= u_{BC} \cdot i_{BC} = U_{BCm} \cdot \sin(\omega t + 120) \cdot I_{BCm} \cdot \sin(\omega t + 120 - \varphi) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ფ}} \cdot \sin(\omega t + 120) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ფ}} \\ &\cdot \sin(\omega t + 120 - \varphi) = U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} \cdot \frac{1}{2} [\cos(\omega t + 120 - \omega t - 120 + \varphi) - \cos(\omega t + 120 + \\ &\omega t + 120 - \varphi)] = U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi + 240)]. \end{aligned}$$

რადგან თითოეული ფაზის მყისი სიმძლავრის მეორე წევრთა ჯამი ნულის

$$\text{ტოლია: } -\cos(2\omega t - \varphi) - \cos(2\omega t - \varphi - 240) - \cos(2\omega t - \varphi + 240) = 0$$

მივიღეთ, რომ გენერატორის ჯამური მყისი სიმძლავრე:

$$P = P_{AB} + P_{AC} + P_{BC} = 3 \cdot U_{\text{ფ}} \cdot I_{\text{ფ}} \cdot \cos \varphi$$

ე.ი. ორგრაგნილიანი სამფაზა (ორფაზა-სამფაზა) გენერატორის სიმძლავრე შეიცავს დროზე დამოუკიდებელ და დროზე დამოკიდებულ შემდგენს. დროზე დამოუკიდებელი შემდგენი ენერგეტიკული თვალსაზრისით მონაწილეობს შეუქცევად პროცესებში და აქტიურ სიმძლავრეს წარმოადგენს. დროზე დამოკიდებული შემდგენი კი ირხევა 2ω კუთხური სიხშირით და დენის რხევის ნახევარი პერიოდის ინტერვალში გენერატორიდან შედის წრედის ინდუქციურ ელემენტში, ხოლო იმავე ნახევარი პერიოდის შემდგომ ინტერვალში ინდუქციური ელემენტიდან უბრუნდება გენერატორს, ეს სიმძლავრე რეაქტიულ სიმძლავრეს წარმოადგენს.

ნახ. 1.3.4. -ზე მოცემულია ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის სტატორის საგრაგნილე მონაცემები და მისი შეერთების სქემა:

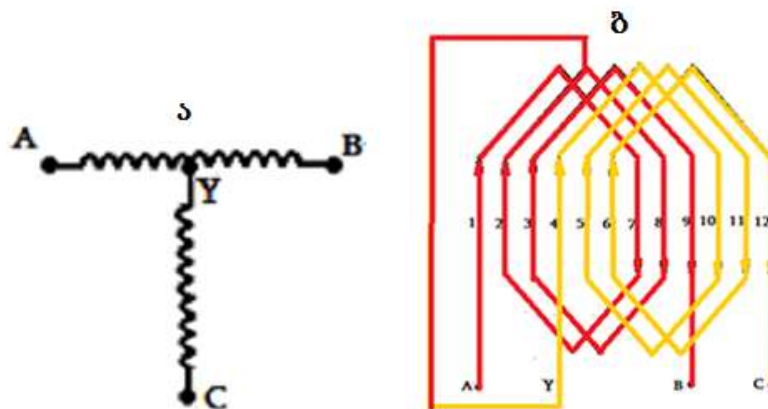
სიმარტივის მიზნით სტატორის ღრმულთა რიცხვი $Z = 12$.

პოლუსთა რაოდენობა $2p = 2$.

ღრმულთა რიცხვი მოსული ფაზაზე და პოლუსზე $q = \frac{Z}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{12}{2 \cdot 2} = 3$.

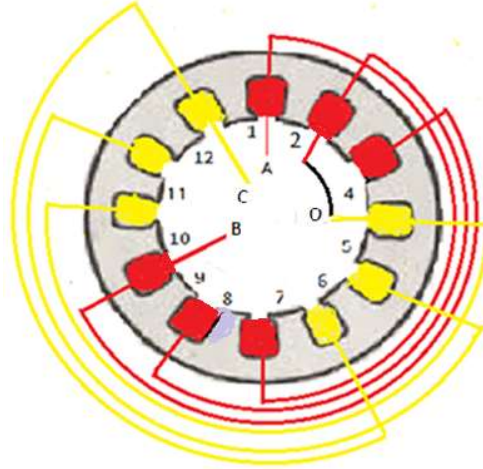
გრაგნილის ბიჯი $Y = \frac{Z}{2 \cdot p} = \frac{12}{2 \cdot 1} = 6(1-7)$

ღრმულებს შოპრის ელექტრული კუთხე $\alpha = p \cdot \frac{360}{Z} = 1 \cdot \frac{360}{12} = 30^\circ$

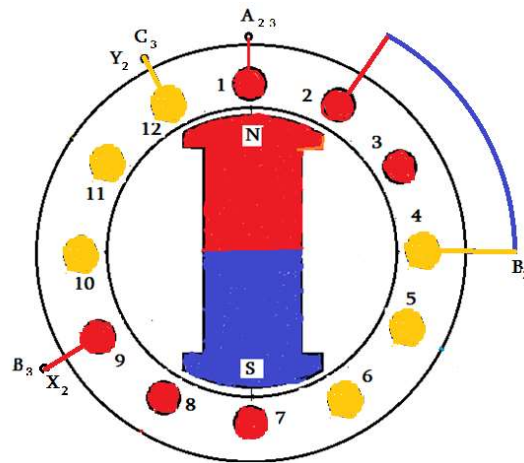


ნახ.1.3.4. ა - ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის გრაგნილთა შეერთებისა და ბ-სტატორის გრაგნილთა გაშლილი სქემა.

ნახ. 1.3.5. -ზე და1.3.6-ზე შესაბამისად მოცემულია ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის სტატორის ტორსული სქემა და სინქრონული ელექტრომანქანის განივი ჭრილი.



ნახ.1.3.5. ორგრაგნილიანი სამფაზა სინქრონული ელექტრომანქანის განივი ჭრილი.



ნახ.1.3.6. - ორგრაგნილიანი სტატორის გრაგნილთა ტორსული სქემა. გამომყვანი წვეროები A—B — C უერთდება სამფაზა ელექტროქსელს.

ნახ. 1.3.7.ა,ბ,გ-ზე შედარების მიზნით მოცემულია სამგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის საგრაგნილე მონაცემები და მისი შეერთების სქემები: სიმარტივის მიზნით სტატორის ღრმულთა რიცხვი $Z = 12$.

პოლუსთა რაოდენობა

$$2p = 2.$$

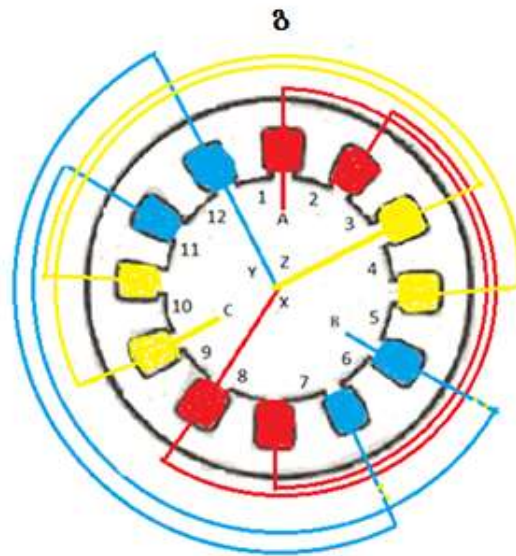
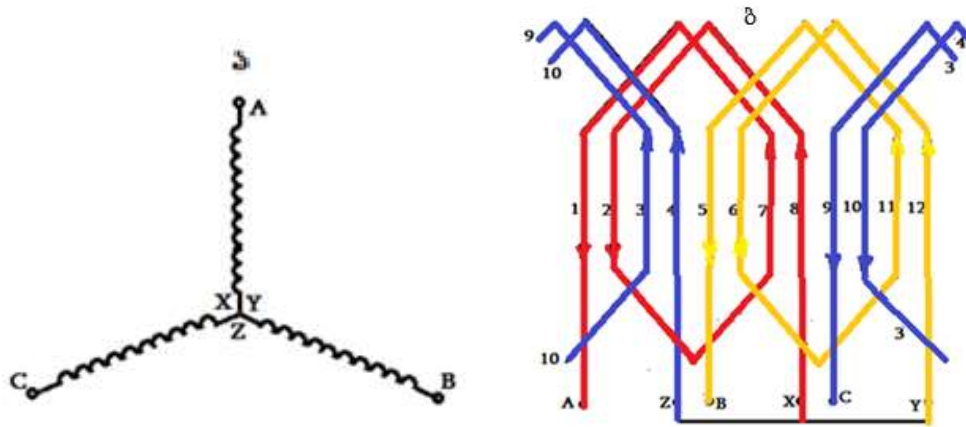
ღრმულთა რიცხვი მოსული ფაზაზე და პოლუსზე $q = \frac{Z}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2.$

გრაგნილის ბიჯი

$$Y = \frac{Z}{2 \cdot p} = \frac{12}{2 \cdot 1} = 6(1-7)$$

ღრმულებს შოპრის ელექტრული კუთხე

$$\alpha = p \cdot \frac{360}{Z} = 1 \cdot \frac{360}{12} = 30^\circ$$



ნახ.1.3.7. ა - სამგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანის გრაგნილთა შეერთების სქემა, ბ - სტატორის გრაგნილთა გაშლილი სქემა. გ - სტატორის გრაგნილთა ტორსული სქემა. გამომყვანი A-B-C წვეროები უერთდება სამფაზა ელექტროქსელს ვარსკვლავური შეერთებით.

1.4. ორფაზა და სამფაზა ელექტრომანქანების სიმძლავრეთა შესახებ

გენერირებულ ორფაზა და სამფაზა ელექტროენერჯის სიმძლავრის სიდიდე ერთი და იგივე ელექტრომანქანის კონსტრუქციასა და მოცულობაში პრაქტიკულად ერთმანეთის ტოლია. თუმცა ზოგიერთი ინჟინერი და მეცნიერი თვლის, რომ რაც მეტია ფაზათა რაოდენობა ერთი და იგივე მანქანის მოცულობაში მით პროპორციულად მეტია მისი სიმძლავრე, კერძოდ, სამფაზა ელექტრომანქანის სიმძლავრე მეტია ორფაზა მანქანის სიმძლავრეზე. მაგრამ არც ერთი მათგანი არ ასაბუთებს ამ უკანასკნელს. შევეცადოთ დავამტკიცოთ ზემოაღნიშნული დებულების უსაფუძვლობა. თეორიული ელექტროტექნიკიდან ცნობილია, რომ m -ფაზა ელექტრომანქანის აქტიური სიმძლავრე ტოლია გამოსახულების

$$P = m \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

სადაც, m - ფაზათა რიცხვი, E და I - ფაზური ე.მ.ძალა და დენი, $\cos \varphi$ - სიმძლავრის კოეფიციენტი. ორფაზა და სამფაზა ელექტროგენერატორის სიმძლავრეების შესადარებლად საჭიროა მათში მაგნიტური ინდუქცია და შესაბამისად გენერირებული ფაზური ძაბვის სიდიდე U_{Φ} , აგრეთვე დატვირთვის ხასიათი ანუ $\cos \varphi$ და როტორის ბრუნვის სიხშირე იყოს ერთნაირი. როგორც ცნობილია სამფაზა ცვლადი დენის მბრუნავი მაგნიტური ინდუქციის ჯამური სიდიდე ტოლია $\frac{3}{2} \cdot B_m$, სადაც B_m -მაგნიტური ინდუქციის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა, ხოლო ორფაზა ელექტრულ მანქანაში მბრუნავი მაგნიტური ველის ჯამური სიდიდე ტოლია მისი ამპლიტუდური სიდიდის - B_m . მაგრამ ორფაზა და სამფაზა ელექტრულ მანქანაში მაგნიტური ინდუქცია B_m და შესაბამისად გენერირებული ფაზური ძაბვის სიდიდე U_{Φ} ტოლი რომ იყოს, ამისათვის საჭიროა ერთი და იგივე მოცულობის მანქანაში მათ თითოეულ ფაზაში ხვიათა რიცხვის სიდიდე იყოს ტოლი. ერთნაირი კონსტრუქციის ორფაზა და სამფაზა

ელექტროგენერატორის სტატორის ღრმულთა რიცხვი ავლნიშნოთ Z -ით, წყვილ პოლუსთა რიცხვი p -თი. ერთი და იგივე სიხშირის დენის მისაღებად ამ მანქანების ბრუნვათა სიხშირე უნდა იყოს ერთნაირი. შესაბამისად, მაგნიტური ინდუქცია და ფაზური ე.მ.ძ ტოლი. ელექტრომანქანის სტატორში პოლუსზე და ფაზაზე მოსული ღრმულთა რიცხვი

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (2)$$

ორფაზა ელექტროანქანაში სამფაზასთან შედარებით q , 1.5 ჯერ მეტია. ხვიათა იმავე რიცხვის შემთხვევაში (იმავე სიდიდის ე.მ.ძ-ის მისაღებად) იმავე ღრმულეებში შესაძლებელია 1.5-ჯერ მეტი განიკვეთის მქონე გამტართა რიცხვის მოთავსება, რაც ფაზური დენის, ასევე 1.5-ჯერ გაზრდის საშუალებას გვაძლევს და (1)-ის თანახმად, ერთნაირი კონსტრუქციის პირობებში ფაზათა რიცხვის ცვლილებით მანქანის სიმძლავრე არ იცვლება.

გამტარის განიკვეთის 1.5-ჯერ გაზრდა მისი აქტიური წინაღობის 1.5-ჯერ შემცირებას იწვევს. შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ ასევე 1.5-ჯერ მცირდება მისი ინდუქციური წინაღობაც. მართლაც, სტატორის მთავარი ინდუქციური წინაღობა გამოითვლება ფორმულით [13]

$$X_{r1} = \frac{4 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu \cdot \tau \cdot l \cdot W_1^2 \cdot K_0^2}{\pi \cdot K\mu \cdot K\delta \cdot \delta \cdot p} \quad (3)$$

სადაც m_1 - ფაზათა რიცხვია; W_1 - ხვიათა რიცხვი; f_1 - დენის სიხშირე; μ - მაგნიტური მუდმივა; K_0 -საგრაგნილე კოეფიციენტი; τ -საპოლუსო დანაყოფი; l -მაგნიტოგამტარის სიგრძე; $K\mu$ მაგნიტური წრედის გაჯერების კოეფიციენტი; $K\delta$ - კარტერის კოეფიციენტი; δ -საჰაერო ღრეჩო; p - წყვილ პოლუსთა რიცხვი.

ფანტვის ინდუქციური წინაღობა კი ტოლია [11]

$$X_\sigma = 4\pi \cdot \frac{W^2}{p \cdot q} \cdot \mu_0 \cdot f \cdot l \cdot (\lambda_\pi + \lambda_\kappa + \lambda_\pi + \lambda_\delta + \lambda_c) \quad (4)$$

სადაც $\lambda_{II}, \lambda_K, \lambda_{II}, \lambda_{II}$ და λ_c შესაბამისად ღრმულის, კბილის გვირგვინის, შუბლური ნაწილის, დიფერენციალური და კბილის დახრის ფანტვის გამტარობები. (3) და (4) ფორმულებიდან ჩანს, რომ სტატორის ინდუქციური წინაღობა, რომელიც m -ზე და q -ზეა დამოკიდებული, ორფაზა ე.მ-ში 1.5-ჯერ მცირეა.

შესაბამისად, 1.5-ჯერ მცირეა მისი სრული წინაღობაც. აქედან გამომდინარე, ნომინალური დატვირთვის დენის დროს, გენერატორის ძაბვა სიდიდით იგივეა.

ერთი და იგივე კონსტრუქციისა და მოცულობის, ორფაზა და სამფაზა ელექტრულ მანქანაში, მაგნიტური და ელექტრული კარგვებიც ტოლი უნდა იყოს, ვინაიდან მაგნიტური დანაკარგები შედგება: ჰისტერეზისული და გრიგალური დენებით გამოწვეული დანაკარგებისაგან, რომლებიც დამოკიდებულია ელექტროტექნიკურ მასალაზე, მის სისქეზე, სიხშირეზე და ინდუქციაზე. ეს უკანასკნელნი კი როგორც ზემოთ ვაჩვენეთ შეიძლება მივიღოთ ერთი და იგივე სიდიდის, ერთიდაიმავე კონსტრუქციისა და მოცულობის პირობებში, ამიტომ მაგნიტური დანაკარგები ტოლია. ორფაზა და სამფაზა მანქანაში ელექტრული დანაკარგებიც ტოლია

$$\Delta P_3 = 3 \times i_3^2 \times R_3, (5) \text{ და } \Delta P_2 = 2 \times i_2^2 \times R_2 = 2(1.5i_3)^2 \times \frac{R_3}{1.5} = 3 \times i_3^2 \times R_3. (6)$$

$$\text{ე.ი } \Delta P_2 = \Delta P_3$$

ელექტრომანქანის ე.მ.ძ-ზე გავლენას ახდენს საგრანგილე კოეფიციენტი

$$K_o = K_p \cdot K_y \cdot K_c,$$

სადაც K_p, K_y, K_c გრანგილის განაწილების, დამოკლების და ღრმულის დახრის კოეფიციენტი. ამ კოეფიციენტებიდან ძირითადათ ორფაზა და სამფაზა გრანგილის განაწილების კოეფიციენტშია განსხვავება. იგი ტოლია :

$$K_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2mq}} \quad (7)$$

ამ ფორმულით გამოთვლილი სამფაზა და ორფაზა გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტების შეფარდება ტოლია 1.06-ის, რაც ნიშნავს, რომ ორფაზა ელექტრული მანქანის ე.მ.ძ 6%-ით ნაკლებია სამფაზიანზე, მეცნიერთა ერთი ჯგუფის მიერ ექსპერიმენტულად მიღებულია, რომ ორფაზა (კონდენსატორული) ელექტრული მანქანის სიმძლავრე სამფაზა ელექტრულ მანქანასთან შედარებით 5%-ით ნაკლებია [14], ხოლო მეორე ჯგუფის მიერ 7% -ით [15]. ორფაზა მანქანის სტატორის ღრმულეებში გამტარები 1.5-ჯერ მეტ ღრმულეებშია განაწილებული, ამიტომ ერთი და იგივე დენის სიმკვრივის დროს ორფაზა სტატორის გრაგნილიდან სითბოს ართმევა უმჯობესდება [16], რაც დატვირთვის დენის გაზრდის საშვალეებს იძლევა და შესაბამისად, რამდენადმე გაკომპენსირდება სიმძლავრის საშუალოდ 6%-იანი დანაკლისი [17].

1.5. ამოცანის დასმა

ორგრაგნილიანი ორფაზა ელექტრომანქანების (გენერატორების, ძრავების) დამზადება პრაქტიკულად შესაძლებელია და, ამასთან ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით მომგებიანია. ამიტომ მეცნიერულ ინტერესს წარმოადგენს განვიხილოთ ორფაზა/ოთხფაზა ელექტროგადაცემა და ჩავატაროთ მათი რეჟიმების ანალიზი.

ენერგეტიკისა და ელექტრომანქანათმშენებლობის განვითარების საწყის ეტაპზე პრაქტიკაში დანერგილი იყო ჯერ ერთფაზა, შემდგომ ორფაზა და ორფაზა-სამფაზა (გენერაცია ორფაზა, ხოლო გადაცემა სამფაზა) ელექტროდენის სისტემა. დღეისთვის მთელ მსოფლიოში სამფაზა სისტემაა გავრცელებული და, შესა-

ბამისად, მრეწველობის მრავალ სფეროში დანერგილია სამფაზა ელექტროგენერატორები, ტრანსფორმატორები, ელექტროძრავები და ა.შ.

ელექტროენერჯის ორფაზა გადაცემა ოთხი სადენის საშუალებით ხორციელდებოდა (ნ. ტესლას პროექტით), რაც იმ დროისათვის ეკონომიკურად არახელსაყრელი აღმოჩნდა. ცნობილმა ელექტროტექნიკოსმა მ.ო. დოლივოდობროვოლსკიმ თეორიულად დაამუშავა და დაასაბუთა სამფაზა დენის გამოყენების უპირატესობა ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემასთან შედარებით. მან შექმნა სამფაზა ასინქრონული ძრავა და სამფაზა ელექტროგადაცემის სისტემა. ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემაში ორი სადენი ფაზური სადენების ფუნქციას ასრულებდა, ხოლო დანარჩენი ორი უკუ სადენის ფუნქციას. თუ ამ ორ სადენს ერთ სადენად გავაერთიანებთ, გვექნება სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემა, რომლის უკუ (მესამე) სადენში გამავალი დენი $\sqrt{2}$ -ჯერ მეტია, ვიდრე ფაზურ სადენში გამავალი დენი. ეს მესამე სადენი პრაქტიკულად ნულოვანი პოტენციალის მქონე სადენია და, ამიტომ მის გარშემო სივრცეში გვირგვინის წარმოქმნის ალბათობა გამორიცხულია და, ამასთან, იგი ხაზებზე შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც მეხდამცავი გვარლი.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე არ არის გამორიცხული, რომ სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის გამოყენება ზემადალი ნომინალური ძაბვის (330 კვ და უფრო მაღალი) ხაზებზე ეკონომიურად ხელსაყრელიც კი აღმოჩნდეს. კერძოდ, დღეს 500კვ და მეტი ძაბვის სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზებზე გამოიყენება ჰორიზონტალურ სიბრტყეში განთავსებული სამად გახლეჩილი ფაზური სადენები (ცხრა ცალი ფოლად-ალუმინის სადენი) და ორი მეხდამცავი გვარლი, აქედან სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის შემთხვევაში ექვსი შექმნის სამადგახლეჩილ ორფაზას, ხოლო დანარჩენი სამი შეასრულებს უკუ სადენისა და მეხდამცავი გვარლის ფუნქციას. ამრიგად, ელექტროგადაცემის ხაზზე გვექნება ორი მეხდამცავი გვარლის ეკონომია.

მეხდამცავი გვარლის რაოდენობის შემცირება, შეამცირებს შავი ლითონის

ხარჯს; მნიშვნელოვნად გაამარტივებს საყრდენების კონსტრუქციას; თითქმის 33%-ით შეამცირებს სახაზო იზოლატორებისა და სახაზო არმატურის ხარჯს; თითქმის ორჯერ შეამცირებს ხაზის ტრასის განივ ზომას, რაც მეტად მნიშვნელოვანია ერთი მხრივ, მაღალი ღირებულების ტყის მასივებში და მეორე მხრივ, მაღალმთიან ვიწრო ხეობებში გამავალი ხაზების შემთხვევაში.

მთაგორიან რეგიონებში გამავალ ხაზებზე დიდი ხვედრითი წილი აქვს კუთხურ საყრდენებს, რომლებიც სამი დამოუკიდებელი საყრდენისაგან (თითოეული ფაზისთვის) შედგება. ორფაზა გადაცემისას კი საკმარისი იქნება ერთი საყრდენი (ორი ფაზისთვის). ხაზზე საყრდენების რაოდენობის შემცირება და მათი კონსტრუქციის გამარტივება შავი ლითონის მნიშვნელოვან ეკონომიას მოგვცემს.

უნდა აღინიშნოს, რომ ფაზური სადენების რაოდენობიდან გამომდინარე, ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ავარიული ამორთვის ალბათობა სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ავარიული ამორთვის ალბათობის $2/3$ -ს ანუ 66,7% შეადგენს. ეს იმას ნიშნავს, რომ ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის უავარიო მუშაობის ხანგრძლივობა 33%-ით მეტია.

ელექტროგადაცემის ორფაზა სისტემის შექმნა სტიმულს მისცემს ელექტრომანქანათმშენებლობაში სამფაზა ელექტრომანქანების ნაცვლად შეიქმნას ორფაზა ელექტრომანქანები, რაც გაამარტივებს მათი დამზადების ტექნოლოგიას და, შესაბამისად, შემცირდება საჭირო მასალების ხარჯიც.

წინასწარი შეფასებით ორფაზა ელექტროგადაცემა უფრო ხელსაყრელია, რადგანაც მას გააჩნია მთელი რიგი დადებითი მომენტები: ზემოაღნიშნული ხაზებზე შავი ლითონის ეკონომია; ხაზების მშენებლობით გარემოსადმი ნაკლები ეკოლოგიური ზიანი; ელექტრომანქანათმშენებლობაში საიზოლაციო მასალის და გამომყვანი ხუნდების ნაკლები ხარჯი.

ბოლო ხანებში გაჩნდა აზრი ოთხფაზა ელექტროგადაცემის შესახებ (Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов, Фазопреобразующий трансформатор для четырех

фазных электропередач, Научный вестник НГТУ, - 2010, - № 3(40)).

ორფაზა/ოთხფაზა გენერაცია-გადაცემა-მოხმარების საკითხების წინ წამოწევა განპირობებულია შემდეგი მოთხოვნებით:

1. მეტი ელექტროენერჯის მიღება;
2. უფრო საიმედო და დაბალი თვითღირებულების გენერაცია გადაცემა-მოხმარების სისტემების შექმნა;
3. უფრო ეკოლოგიური და ნაკლები ზიანის მომტანი ენერგოსისტემების დანერგვა;
4. გამარტივებული მომსახურების ენერგეტიკული კვანძების შექმნა.

დასმული ამოცანის მიზანია თეორიულად დამუშავდეს ელექტროენერჯის გადაცემის ორფაზა და ოთხფაზა სისტემები. გაანალიზდეს მათი მუშაობის რეჟიმული პარამეტრები და ეს პარამეტრები შეფასდეს ტექნიკო-ეკონომიკური მაჩვენებლების თვალსაზრისით. გამოვლინდეს ამ სისტემების დადებითი და უარყოფითი მხარეები.

დასმული ამოცანის დამუშავების პროცესში ჩატარდა მეცნიერული კვლევა შემდეგი ძირითადი საკვანძო საკითხების დამუშავებით:

1. ორფაზა და ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური ელექტრული პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებების მიღება;
2. ფაზურ სადენებსა და უკუ სადენში გამავალი დენების საანგარიშო გამოსახულებების მიღება და ანალიზი;
3. მიმღების სალტეებზე მუშა ძაბვის საწყის მონაცემებზე დამოკიდებულების საანგარიშო გამოსახულებების მიღება და ორფაზა/სამფაზა/ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემების ურთიერთშედარებითი ანალიზი, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეების თეორიული დასაბუთებით;

აგრეთვე მიღებულია ოთხფაზა სიმეტრიული ელექტროგადაცემის როგორც სადენტა ინდუქციური წინააღობის გამოსათვლელი ისე სადენტა გასაშუალოებული ტევადობის საანგარიშო გამოსახულებები. ამასთან შედარების თვა-

ლსაზრისიდან გამომდინარე ჩატარებული გვაქვს როგორც ორფაზა და ოთხფაზა ისე სამფაზა ელექტროგადაცემის ანგარიში 220კვ - იანი ძაბვის ხაზზე, 150 მგვა სიმძლავრის გადაცემის დროს, აგრეთვე ჩატარებული გვაქვას ორფაზა ელექტროგადაცემის ანგარიში 500კვ-ი ძაბვის გადამცემი ხაზისათვის. ანგარიშმა აჩვენა, რომ ორფაზა ელექტროგადაცემა სამფაზიანთან შედარებით ნაკლები გამტარუნარიანობით ხასიათდება.

დამუშავებულია ორგრაგნილიანი-სამფაზა ელექტრომანქანის და ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპიალური სქემა. რეკომენდირებულია მათი პრაქტიკული გამოყენება.

დასკვნა თავი 1-ის მიმართ

ამ თავში განხილულია ცვლადი დენის ერთფაზა, ორფაზა და სამფაზა ელექტრომანქანები, ჩატარებულია მათი შედარებითი ანალიზი, რის საფუძველზეც გაკეთებულია შემდეგი დასკვნა:

1. აღნიშნულია ორგრაგნილიანი ორფაზა და ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანების გამოყენების შესაძლო სფეროები და მათი უპირატესობა ორგრაგნილიან კონდენსატორულ ელექტრულ მანქანებთან მიმართებაში.
2. დასაბუთებულია ორგრაგნილიანი (90⁰-იანი ფაზური ძვრის კუთხის მქონე) სამფაზა ელექტრომანქანის სამფაზა ელექტროქსელში ჩართვის შესაძლებლობა, რომლის დროსაც მისი სტატორის გრაგნილები სიმეტრიულად იტვირთება.
3. დასაბუთებულია ორფაზა და სამფაზა ელექტრომანქანების სიმძლავრეთა ტოლობა.
4. ორგრაგნილიანი ორფაზა და ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანები, სამფაზა ელექტრომანქანებთან შედარებით მეტი საიმედოობით, დამზადების ნაკლები შრომატევადობითა და თვითღირებულებითა, გაადვილებული მომსახურეობით გამოირჩევა.

თავი 2. მრავალფაზა სისტემები

2.1. სამფაზა სიმეტრიული და ორფაზა არასიმეტრიული

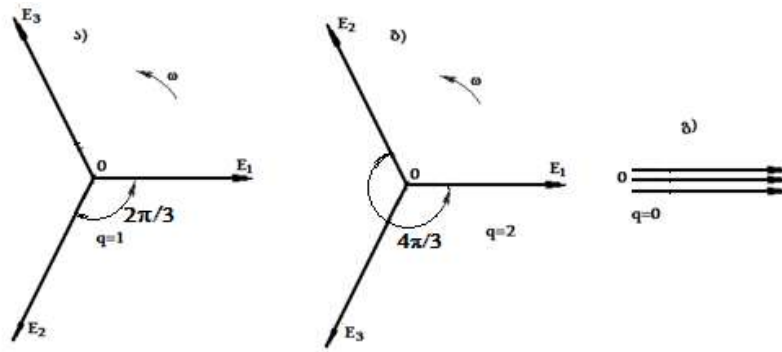
სისტემის ზოგადი მიმოხილვა

ელექტრული წრედების იმ ერთობლიობას, სადაც მოქმედებს ერთი და იგივე სიხშირისა და ერთმანეთის მიმართ ფაზით დაძრული ერთი და იგივე წყაროს მიერ შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველები (ე.მ.დ.), უწოდებენ მრავალფაზა სისტემას. ამ სისტემაში შემავალი ცალკეული ელექტრული წრედი წარმოადგენს ფაზას. ფაზების რიცხვის მიხედვით პრაქტიკულად შეიძლება გვევლინოს ექვსფაზა ოთხფაზა, სამფაზა, ორფაზა და, კერძო შემთხვევაში, ერთფაზა სისტემები.

მრავალფაზა სისტემა შეიძლება იყოს სიმეტრიული და არასიმეტრიული. სიმეტრიულია მრავალფაზა სისტემა, თუ ცალკეული ფაზის ე.მ.დ. (ძაბვა, დენი) სიდიდით ტოლია და ერთმანეთისაგან დაძრულია ერთნაირი კუთხით, რომელიც $k \cdot \frac{2\pi}{m}$ სიდიდის ტოლია. აქ m -ფაზების რიცხვი და k -ნებისმიერი მთელი რიცხვი. მრავალფაზა სისტემა არასიმეტრიულია თუ არ სრულდება ზემოთ აღნიშნული პირობიდან ერთი მაინც.

სიმეტრიული მრავალფაზა სისტემის ერთერთი მახასიათებელი ნიშანია ის, რომ ამ სისტემის ფაზური სიდიდეების (ე.მ.დ., ძაბვა, დენი) ჯამი ნულის ტოლია. სამფაზა ($m=3$) სიმეტრიული სისტემისთვის, როცა $k=1$ ვღებულობთ, რომ ფაზური ე.მ. ძალები ერთმანეთის მიმართ დაძრულია $2\pi/3$ კუთხით (ნახ.2.1.1):

$$e_1 = E_{\text{ფაზი}} \sin \omega t, \quad e_2 = E_{\text{ფაზი}} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad e_3 = E_{\text{ფაზი}} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$



ნახ.2.1.1. ფაზური ე.მ.ძ.

როგორც ნახ.2.1.1-დან ჩანს ($k=1$) ფაზური ე. მ. ძალები თავიანთ მაქსიმალურ (ამპლიტუდურ) მნიშვნელობებს ღებულობენ რიგრიგობით, თავიანთი ნომრების მიხედვით (1, 2, 3, 1, 2, . .). აქ ფაზებს შორის ძვრის კუთხე 120° -ია. პირველ ფაზას მეორე ფაზა ჩამორჩება 120° -ით, მეორეს მესამე იმავე კუთხით და ა.შ. ასეთ სისტემას პირდაპირი მიმდევრობის სისტემას უწოდებენ. 2,ბ ნახაზიდან ჩანს ($k=2$) ფაზური ე. მ. ძალები მაქსიმალურ მნიშვნელობებს ღებულობენ რიგრიგობით შებრუნებული მიმდევრობით (1, 3, 2, 1, 3, . .). აქ პირველ ფაზას მეორე ფაზა ჩამორჩება 240° კუთხით. მეორეს მესამე ასევე 240° -ით და ა.შ. ასეთ სისტემას უკუ მიმდევრობის სისტემას უწოდებენ. $k = 0$ შემთხვევაში (ნახ.2,გ) ფაზური ე. მ. ძალები მაქსიმალურ მნიშვნელობებს ერთდროულად ღებულობენ. ასეთ სისტემას ნულოვანი მიმდევრობის სისტემას უწოდებენ.

შესაბამისად, ე. მ. ძალების მოქმედი მნიშვნელობები კომპლექსურ სახეში ჩაიწერება შემდეგნაირად:

ა. პირდაპირი მიმდევრობის სისტემა

$$E_1 = E_1; \quad E_2 = E_1 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad E_3 = E_1 \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}};$$

ბ. უკუ მიმდევრობის სისტემა

$$E_1 = E_1; \quad E_3 = E_1 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad E_2 = E_1 \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}};$$

გ. ნულოვანი მიმდევრობის სისტემა

$$E_1 = E_1; \quad E_2 = E_1; \quad E_3 = E_1;$$

მრავალფაზა სისტემის კლასიფიკაციისას გამოიყენებენ ტერმინს: გაწონასწორებული და გაუწონასწორებელი მრავალფაზა სისტემა. მრავალფაზა სისტემა გაწონასწორებულია, თუ სისტემის ჯამური სიმძლავრის მყისი მნიშვნელობა არ არის დამოკიდებული დროზე და, პირიქით, მრავალფაზა სისტემა გაუწონასწორებელია, თუ სისტემის ჯამური სიმძლავრის მყისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია დროზე. გაწონასწორებულობა მრავალფაზა სისტემის ერთერთი მნიშვნელოვანი ნიშანია. ამ დროს მრავალფაზა გენერატორის (ძრავის) ღერძზე მომენტი მუდმივი სიდიდეა დროში (არ პულსირებს). ეს გენერატორის (ძრავის) სტაბილური მუშაობისათვის მეტად მნიშვნელოვანი ფაქტორია.

მრავალფაზა სისტემა ($m > 2$), სიმეტრიული ფაზური ე. მ. ძალებისა და სიმეტრიული ფაზური დატვირთვის დენების დროს, გაწონასწორებული მრავალფაზა სისტემაა. მართლაც, ასეთი სისტემის k -ური ფაზის მყისი სიმძლავრე გამოითვლება ფორმულით

$$p_k = e_k \cdot i_k = \sqrt{2} \cdot E \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{m}] \cdot \sqrt{2} \cdot I \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{m} - \varphi] = \\ = EI \cos \varphi - EI \cos[2\omega t - 2(k-1)\frac{2\pi}{m} - \varphi].$$

ე.ი. თითოეული ფაზის მყისი სიმძლავრე შეიცავს მუდმივ შემდგენს და დროზე დამოკიდებულ შემდგენს. დროზე დამოკიდებული შემდგენები ერთმანეთისაგან დაძრულია $2\pi / m$ კუთხით და მათი შესაბამისი ვექტორები ქმნიან სიმეტრიულ ვარსკვლავს. აქედან გამომდინარე, ამ ვექტორების ჯამი ანუ ყველა ფაზური მყისი სიმძლავრის დროზე დამოკიდებული შემდგენების ჯამი ნულის ტოლია და, შესაბამისად, $m > 2$ მრავალფაზა სისტემის ჯამური მყისი სიმძლავრე

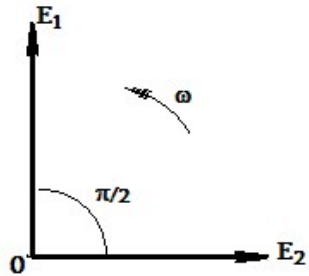
$$P = \sum_{k=1}^m p_k = mEI \cos \varphi$$

არ არის დროზე დამოკიდებული. ე.ი. როცა მრავალფაზა სისტემის ე.მ. ძალები და ფაზური დატვირთვის დენები სიმეტრიულია, მაშინ ასეთი მრავალფაზა სი-

სტემა გაწონასწორებული სისტემაა.

შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ ორფაზა ($m=2$) არასიმეტრიული სისტემა (ნახ. 2.1.2), რომლის ელექტრომაგნიტურ ძალებს შორის ძვრის კუთხე $\pi/2$ -ის ტოლია, გაწონასწორებული სისტემაა, როცა ფაზური დატვირთვა თანაბარია. ამ სისტემისთვის:

$$e_1 = E_{\text{ფაქს}} \sin \omega t, \quad e_2 = E_{\text{ფაქს}} \sin(\omega t - \pi/2)$$



ნახ.2.1.2. ორფაზა არასიმეტრიული სისტემა

და

$$i_1 = I_{\text{ფაქს}} \sin(\omega t - \varphi), \quad i_2 = I_{\text{ფაქს}} \sin(\omega t - \pi/2 - \varphi)$$

თითოეული ფაზის მყისი სიმძლავრე:

$$p_1 = e_1 \cdot i_1 = \sqrt{2} \cdot E \sin \omega t \cdot \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \varphi) = EI \cos \varphi - EI \cos(2\omega t - \varphi).$$

$$p_2 = e_2 \cdot i_2 = \sqrt{2} \cdot E \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cdot \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi) = EI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \pi - \varphi)]$$

ორფაზა სისტემის ჯამური მყისი სიმძლავრე

$$\begin{aligned} p &= \sum_{k=1}^m p_k = 2EI \cos \varphi - EI [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(2\omega t - \pi - \varphi)] = \\ &= 2EI \cos \varphi - EI [2 \cdot \cos(2\omega t - \pi/2 - \varphi) \cdot \cos(\frac{\pi}{2})] = 2EI \cos \varphi. \end{aligned}$$

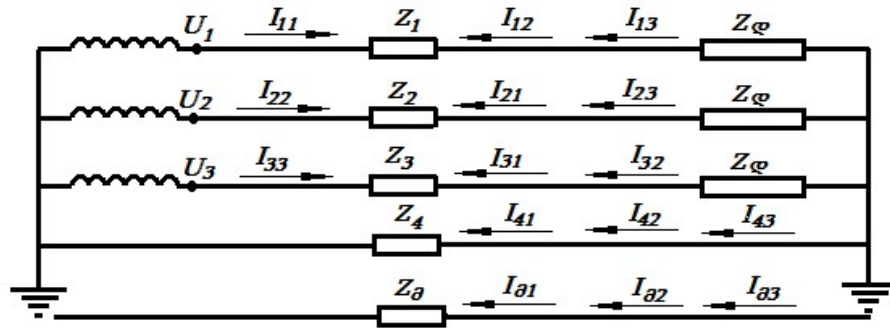
ე.ი. ნახ.2.1.2-ზე ნაჩვენები ორფაზა სისტემა გაწონასწორებული სისტემაა.

2.2. ელექტროგადაცემის სამფაზა სისტემის რეჟიმის ანალიზი

განვიხილოთ სამფაზა სისტემა, რომელსაც გააჩნია მეოთხე (ნეიტრალური) სადენი და ორივე ბოლოში ჩამიწებულია (ნახ.2.2.1). ფაზებში გამავალი დენები გამოვთვალოთ ზედდების მეთოდით [18].

ამ ნახაზზე: I_{11}, I_{22}, I_{33} - დენები ფაზებში, გამოწვეული შესაბამისი ფაზური ძაბვებით;

I_{12}, I_{13} - დენები პირველ ფაზაში, გამოწვეული U_2 და U_3 ფაზური ძაბვებით;



ნახ.2.2.1 სამფაზა სისტემა

I_{21}, I_{23} - დენები მეორე ფაზაში, გამოწვეული U_1 და U_3 ფაზური ძაბვებით;

I_{31}, I_{32} - დენები მესამე ფაზაში, გამოწვეული U_1 და U_2 ფაზური ძაბვებით;

I_{41}, I_{42}, I_{43} - დენები მეოთხე სადენში, გამოწვეული ფაზური ძაბვებით;

I_{01}, I_{02}, I_{03} - დენები მიწაში, გამოწვეული ფაზური ძაბვებით;

Z_6 - დატვირთვის წინაღობა;

Z_0 - მიწის წინაღობა ცვლადი დენის მიმართ;

$Z_1=Z_2=Z_3=Z_4=Z_b$ - გადაცემის ხაზის ფაზური სადენებისა და მეოთხე სადენის წინაღობა.

მეოთხე სადენი და მიწა წარმოადგენს პარალელურ შტოებს და მათი ეკვივალენტური წინაღობა ანუ ნულოვანი სადენის წინაღობა

$$Z_6 = \frac{Z_4 \cdot Z_0}{Z_4 + Z_0}.$$

გამოვთვალოთ სადენებში გამავალი დენები, გამოწვეული თითოეული ფაზური ძაბვით:

$$1. \quad U_1 \neq 0, \quad U_2 = 0, \quad U_3 = 0 \quad \text{მაშინ}$$

$$I_{11} = \frac{U_1}{Z + \frac{(Z/2) \cdot Z_6}{(Z/2) + Z_6}} = \frac{U_1(Z + 2Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}, \quad \frac{I_{21} + I_{31}}{I_{61}} = \frac{Z_6}{Z/2} = \frac{2Z_6}{Z} \quad \text{ანუ}$$

$$\frac{I_{21} + I_{31} + I_{61}}{I_{61}} = \frac{Z + 2Z_6}{Z} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{11}}{I_{61}} = \frac{Z + 2Z_6}{Z} \quad \text{აქედან} \quad I_{61} = \frac{I_{11} \cdot Z}{Z + 2Z_6} = \frac{U_1 \cdot Z}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

$$\text{და } I_{21} = I_{31} = \frac{U_1 \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} \quad \frac{I_{41}}{I_{\partial 1}} = \frac{Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{41} + I_{\partial 1}}{I_{\partial 1}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{61}}{I_{\partial 1}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4}$$

$$\text{აქედან} \quad I_{\partial 1} = \frac{I_{61} \cdot Z_4}{Z_4 + Z_{\partial}} = \frac{U_1 \cdot Z \cdot Z_4}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)} \quad \text{და}$$

$$I_{41} = \frac{I_{\partial 1} \cdot Z_{\partial}}{Z_4} = \frac{U_1 \cdot Z \cdot Z_{\partial}}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)}$$

$$2. \quad U_2 \neq 0, \quad U_1 = 0, \quad U_3 = 0, \quad \text{მაშინ}$$

$$I_{22} = \frac{U_2}{Z + \frac{(Z/2) \cdot Z_6}{(Z/2) + Z_6}} = \frac{U_2(Z + 2Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}, \quad I_{62} = \frac{U_2 \cdot Z}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} \quad \text{და}$$

$$I_{32} = I_{12} = \frac{U_2 \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

$$\frac{I_{42}}{I_{\partial 2}} = \frac{Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{42} + I_{\partial 2}}{I_{\partial 2}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{62}}{I_{\partial 2}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{აქედან}$$

$$I_{\partial 2} = \frac{I_{62} \cdot Z_4}{Z_4 + Z_{\partial}} = \frac{U_2 \cdot Z \cdot Z_4}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)} \quad \text{და} \quad I_{42} = \frac{I_{\partial 2} \cdot Z_{\partial}}{Z_4} = \frac{U_2 \cdot Z \cdot Z_{\partial}}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)}$$

$$3. \quad U_3 \neq 0, \quad U_1 = 0, \quad U_2 = 0 \quad \text{მაშინ}$$

$$I_{33} = \frac{U_3}{Z + \frac{(Z/2) \cdot Z_6}{(Z/2) + Z_6}} = \frac{U_3(Z + 2Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}, \quad I_{63} = \frac{U_3 \cdot Z}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} \quad \text{და} \quad I_{13} = I_{23} = \frac{U_3 \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

$$\frac{I_{43}}{I_{\partial 3}} = \frac{Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{43} + I_{\partial 3}}{I_{\partial 3}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{63}}{I_{\partial 3}} = \frac{Z_4 + Z_{\partial}}{Z_4} \quad \text{აქედან}$$

$$I_{\partial 3} = \frac{I_{63} \cdot Z_4}{Z_4 + Z_{\partial}} = \frac{U_3 \cdot Z \cdot Z_4}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)} \quad \text{და} \quad I_{43} = \frac{I_{\partial 3} \cdot Z_{\partial}}{Z_4} = \frac{U_3 \cdot Z \cdot Z_{\partial}}{(Z_4 + Z_{\partial}) \cdot (Z^2 + 3Z \cdot Z_6)}$$

ამ გამოსახულებებში Z წარმოადგენს ფაზური სადენის ჯამურ წინაღობას

$$Z = Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_b + Z_{\text{ფ}}$$

ნახ.2.3-ის მიხედვით და ზედდების მეთოდის გამოყენებით გამოვთვალოთ სადენებში გამავალი დენები:

პირველ სადენში

$$I_1 = I_{11} - I_{12} - I_{13} = \frac{U_1(Z + 2Z_6) - U_2 Z_6 - U_3 Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

მეორე სადენში

$$I_2 = I_{22} - I_{23} - I_{21} = \frac{U_2(Z + 2Z_6) - U_3 Z_6 - U_1 Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

მესამე სადენში

$$I_3 = I_{33} - I_{31} - I_{32} = \frac{U_3(Z + 2Z_6) - U_1 Z_6 - U_2 Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

მეოთხე სადენში

$$I_4 = I_{41} + I_{42} + I_{43} = \frac{(U_1 + U_2 + U_3)ZZ_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

მიწაში გამავალი დენი

$$I_{\partial} = I_{\partial 1} + I_{\partial 2} + I_{\partial 3} = \frac{(U_1 + U_2 + U_3)ZZ_4}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

მიღებული გამოსახულებების საფუძველზე გამოვთვალოთ დენები, როცა დაბათა სისტემა ქმნის სამფაზა სიმეტრიულ სისტემას ფაზურ ძაბვებს შორის

$$\alpha = -\frac{2\pi}{3} \quad \text{ძვრის კუთხით:}$$

$$U_1 = U; \quad U_2 = U \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad U_3 = U \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}};$$

აქ: $e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$ და $e^{-j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U_1(Z + 2Z_6) - U_2Z_6 - U_3Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} = \frac{U(Z + 2Z_6) - U\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot Z_6 - U\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} =$$

$$= \frac{U(Z + 3Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{U_2(Z + 2Z_6) - U_3Z_6 - U_1Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} = \frac{U\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(Z + 2Z_6) - U\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot Z_6 - U \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} =$$

$$= \frac{U(Z + 3Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = I_1 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

დენი მესამე სადენში

$$I_3 = \frac{U_3(Z + 2Z_6) - U_1Z_6 - U_2Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} = \frac{U\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(Z + 2Z_6) - U \cdot Z_6 - U\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot Z_6}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} =$$

$$= \frac{U(Z + 3Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = I_1 \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}$$

როგორც მოსალოდნელი იყო, სამივე ფაზურ სადენში გამავალი დენები წარმოადგენს დენების სამფაზა სიმეტრიულ სისტემას.

მაბვათა სისტემის სიმეტრიულობის გამო მეოთხე სადენში და მიწაში გამავალი დენები ნულის ტოლია.

რადგანაც სამფაზა სიმეტრიულ მაბვათა სისტემის დროს ნულოვან სადენში

დენი არ გაედინება, მეოთხე სადენი საჭირო არ არის, ხოლო გადაცემის ორივე ბოლოში ნეიტრალის ჩამიწება ქვესადგურზე ჩამიწების კონტურისთვის რაიმე დამატებით მოთხოვნებს არ აყენებს. აქ ჩამიწების კონტურის მიმართ ძალაში რჩება მხოლოდ ის მოთხოვნები, რომელთაც ადგილი აქვს არასიმეტრიული მოკლე შერთვების შემთხვევებში.

სამფაზა ელექტროგადაცემაში;

$$i_A = I_{\text{მ.აქს.}} \sin \omega t, u_A = U_{\text{მ.აქს.}} \sin(\omega t + \varphi);$$

$$i_B = I_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), u_B = U_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right);$$

$$i_C = I_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right), u_C = U_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi\right).$$

შესაბამისად ფაზური სიმძლავრე

$$P_A = u_A \cdot i_A = U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}} \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t = \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos(2\omega t + \varphi);$$

$$P_B = u_B \cdot i_B = U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = \\ = \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi\right);$$

$$P_C = u_C \cdot i_C = U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi\right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \\ = \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right).$$

ამ გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ თითოეული ფაზით გადაცემული სიმძლავრე შეიცავს ორ შემდგენს, რომელთაგანაც პირველი შესაკრები დროზე დამოუკიდებელი (მუდმივი) სიდიდეა და მას აქტიურ სიმძლავრეს უწოდებენ

$$P_{\text{ფ}} = \frac{U_{\text{მ.აქს.}} I_{\text{მ.აქს.}}}{2} \cos \varphi,$$

მეორე შესაკრები დროში იცვლება ორმაგი სიხშირით და პერიოდის განმავლობაში ნულის ტოლია. ეს მეორე შესაკრები რეაქტიულ სიმძლავრეს წარმოადგენს, რომელიც წყაროსა და მომხმარებელს შორის ცირკულირებს.

სამფაზა აქტიური სიმძლავრე

$$P_{(3)} = \frac{3 \cdot U_{\text{აქს}} I_{\text{აქს}}}{2} \cos \varphi = 3 \cdot U_{(3)} I_{(3)} \cos \varphi$$

სადაც: $U_{(3)}$ – სამფაზა სისტემის ფაზური ძაბვის მოქმედი (ეფექტური) მნიშვნელობა;

$I_{(3)}$ – ფაზაში გამავალი დენის მოქმედი (ეფექტური) მნიშვნელობა.

შესაბამისად, სრული და რეაქტიული სამფაზა სიმძლავრე

$$S_{(3)} = 3U_{(3)}I_{(3)} \quad \text{და} \quad Q_{(3)} = 3U_{(3)}I_{(3)} \sin \varphi.$$

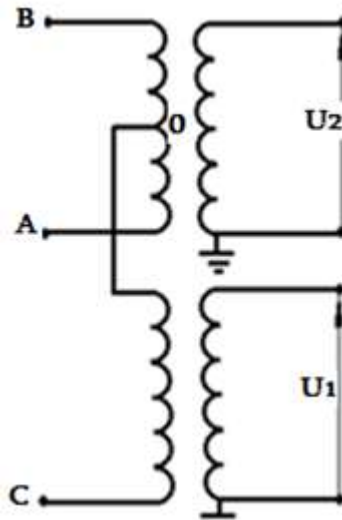
დასკვნა თავი 2-ის მიმართ

ამ თავში ჩატარებულია მრავალფაზა (სამფაზა და ორფაზა) სისტემის ზოგადი მიმოხილვა. მიღებულია სიმეტრიული სამფაზა სისტემის სადენებში გამავალი დენების საანგარიშო გამოსახულებები.

თავი 3. ელექტროგადაცემის ორფაზა სისტემა

3.1. ორფაზა და სამფაზა სისტემების ურთიერთ კავშირის შესაძლებლობა.

ორფაზა და სამფაზა სისტემების დაკავშირება შესაძლებელია სპეციალური ფაზაგარდაქმნელი ტრანსფორმატორებით, რომელთა საშუალებით ძაბვათა ორფაზა სისტემა გადაყვანილი იქნება ძაბვათა სამფაზა სისტემაზე და პირიქით. ასეთი ფაზაგარდაქმნელი ტრანსფორმატორი როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ შემოთავაზებული იყო 1893 წელს ამერიკელი ინჟინრის ჩ. სკოტის (ნ. ტესლას ასისტენტის) მიერ [7]. ეს ფაზაგარდაქმნელი ტრანსფორმატორი ნიაგარის ჰიდროსადგურს, (სადაც დამონტაჟებული იყო ნ. ტესლას მიერ ორფაზა გენერატორი), აკავშირებდა სამფაზა სისტემასთან, რომლის მეშვეობითაც მოხდა ორფაზა დენის გარდაქმნა მაღალი ძაბვის სამფაზა დენად, რომელიც შედგომ მომხმარებელთან ისევ გარდაიქმნა დაბალი ძაბვის ორფაზა დენად, ვინაიდან მომხმარებელი ორფაზა ელექტროძრავები გახლდათ. დღემდე ეს ტრანსფორმატორები სკოტის სახელით არის ცნობილი (ნახ.3.1.1).



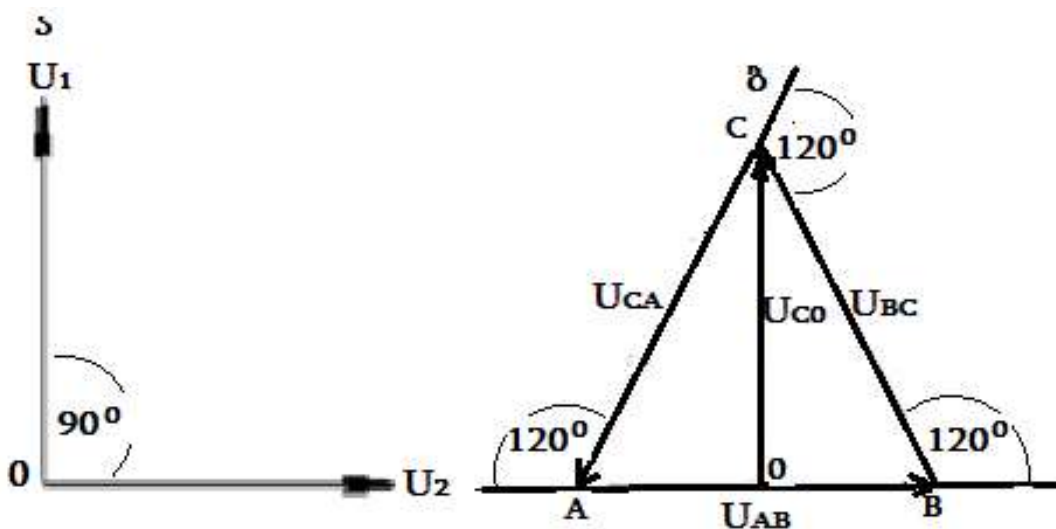
ნახ. 3.1.1.- ჩ. სკოტის ფაზაგარდაქმნელი ტრანსფორმატორი.

იგი შედგება ორი ერთფაზა ტრანსფორმატორისგან რომელთა სიმძლავრე ტოლია და გააჩნიათ განსხვავებული ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი. ისინი სამფაზა სისტემაში ჩართულია შემდეგი სქემით: ერთი ტრანსფორმატორის

მეორეული გრაგნილის შუა წერტილში გაკეთებულია გამომყვანი და მიერთებულია მეორე ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ბოლოსთან. შესაბამისად პირველადი და მეორეული ძაბვების ვექტორულ დიაგრამას აქვს ნახ.

3.1.2 ბ,გ-ზე ნაჩვენები სახე.

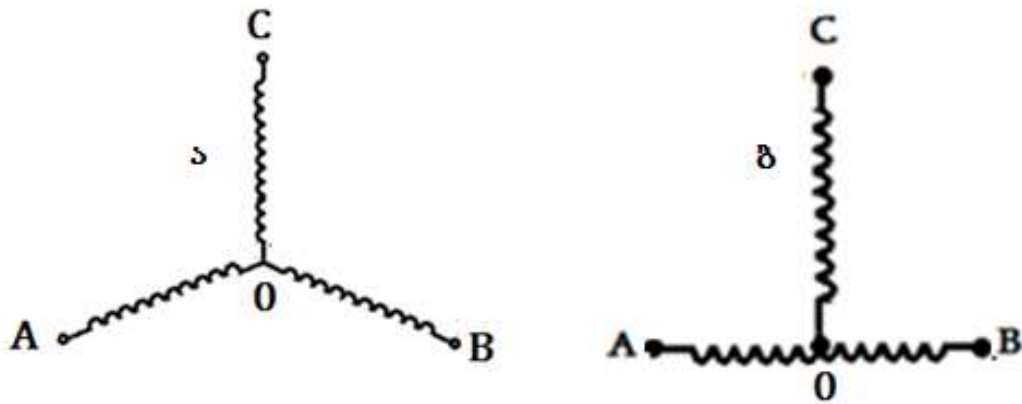
ამ შემთხვევაში პირველადი ძაბვები (U_1 და U_2) ერთმანეთის მიმართ დაძრულია 90° გრადუსით. მეორეული გრაგნილების ხვიათა რიცხვის შესაბამისი შერჩევით მიიღწევა ამ ძაბვების სიდიდით ტოლობა (ნახ .3.1.2,ა,ბ).



ნახ. 3.1.2.ა-პირველადი და ბ-მეორეული გრაგნილის ძაბვების ვექტორული დიაგრამა.

თუ შევადარებთ ჩ. სკოტის ორგრაგნილიან - სამფაზა ტრანსფორმატორის სქემას სამგრაგნილიან სამფაზა სქემას (ნახ,3.1.3.), დავინახავთ, რომ მან OA და OB გრაგნილი წაანაცვლა OC გრაგნილისაგან 120° -ის ნახცვლად ელექტრული 90° -ი გრადუსით.

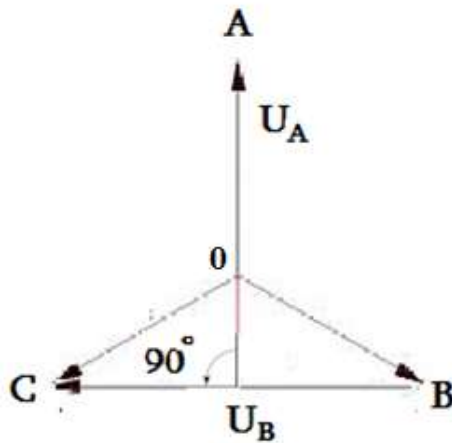
ორფაზა 90 -გრადუსით დაძრული სისტემის მიღება სამფაზა ქსელიდანაც შესაძლებელია შემდეგი ხერხით. მაგალითად, თუ სამფაზა ქსელს რომელსაც ნულოვანი სადენი გააჩნია ადვილად შესაძლებელია მივიღოთ ორფაზა ძაბვის



ნახ.3.1.3.ა – სამგრანლიანი სამფაზა სქემა

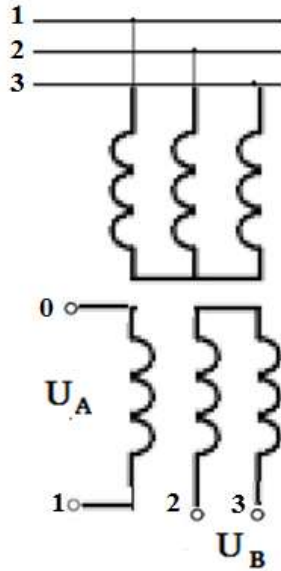
ბ – სკოტის ორგრანლიანი-სამფაზა სქემა.

სისტემა, რომელშიც ძაბვები 90° -ით დროში დაძრული იქნება. მისი პრინციპი-ალური სქემა ნაჩვენებია ნახ.3.1.4.-ზე [19]. მაგრამ ამ სქემაში მიღებული თითო-ეული ფაზური ძაბვის სიდიდე ტოლი არ იქნება.



ნახ.3.1.4. სამფაზა ქსელი ნულოვანი სადენით.

თუ სამფაზა ქსელს ნულოვანი სადენი არ გააჩნია, იგი შეიძლება შევქმნათ სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორეული გრანგნილების მეშვეობით (ნახ. 3.1.5.). აქ ორფაზა სისტემის მისაღებად საჭიროა, რომ ერთი ფაზის ძაბვა, სიდიდით, მიღებულ იქნეს სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორეული გრანგნილის ფაზური



ნახ.3.1.5. სამფაზა ქსელი ნულოვანი სადენის გაარეშე.

ძაბვის ტოლად $U_A = U_{01}$, ხოლო ორფაზა სისტემის მეორე ფაზის ძაბვის სიდიდედ მივიღოთ სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ხაზური ძაბვა $U_B = U_{23}$. ამ ორფაზა სისტემაში ტოლი სიდიდის ფაზური ძაბვების მისაღებად ($U_A = U_B$) საჭიროა, რომ სიმეტრიული სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილის ნებისმიერ ორ ფაზაში, ხვიათა რიცხვის რაოდენობა ტოლი იყოს $\frac{W}{\sqrt{3}}$ სიდიდის, ხოლო მესამე ფაზაში ხვიათა რიცხვის რაოდენობა კი ტოლი იყოს W –სიდიდის. მაშინ მივიღებთ

$$U_{01} = U_{23}$$

სამფაზა ქსელიდან, რომ ნამდვილად მიიღება ორფაზა 90° -ით დროში დაძრული ძაბვები, რომლებიც სიდიდით ტოლია, შეიძლება მარტივად დავასაბუთოთ. სამფაზა ქსელში ძაბვათა სიდიდეების მყისი მნიშვნელობები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$u_1 = U_{1m} \cdot \sin \omega t$$

$$u_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega t - 120)$$

$$u_3 = U_{3m} \cdot \sin(\omega t + 120)$$

სადაც $U_{1m} = U_{2m} = U_{3m} = U_m$. სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორეული გრაფნი-
ლის მე-2 და მე-3 ფაზის ძაბვათა სხვაობა (ხაზური ძაბვა) ტოლია:

$$U_B = \frac{U_{23}}{\sqrt{3}} = \frac{U_2 - U_3}{\sqrt{3}} = \left[\frac{U_{2m}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t - 120) - \frac{U_{3m}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t + 120) \right] = -U_m \cdot \cos \omega t = -U_{01} \cdot \cos \omega t$$

ე.ი. $U_A = -jU_B$

3.2. ორფაზა ელექტროგადაცემის განხორციელების პრინციპი

ორფაზა ელექტროგადაცემის ფაზურ ძაბვებს შორის კუთხე 90° -ია ნახ.3.2.1).
თუ მივიღებთ, რომ პირველ ფაზაში გამავალი დენი

$$i_1 = I_{\text{მაქს}} \sin \omega t,$$

მაშინ ძაბვა u_1 იცვლება კანონით.

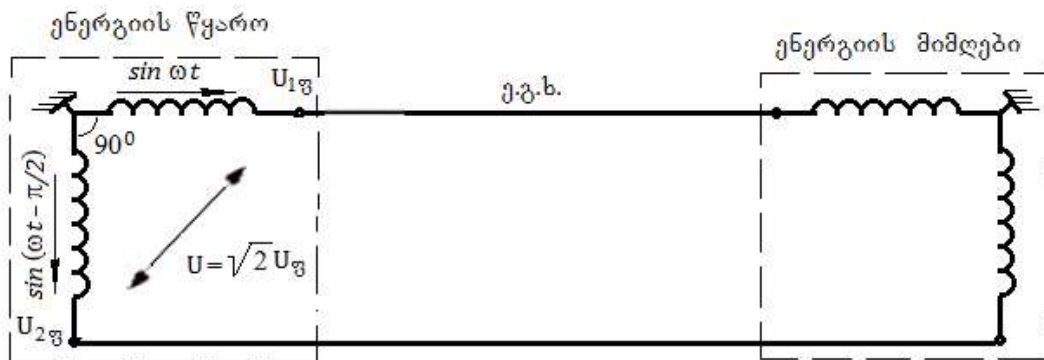
$$u_1 = U_{\text{მაქს}} \sin(\omega t + \varphi)$$

შესაბამისად, მეორე ფაზასი გამავალი დენი და ძაბვა

$$i_2 = I_{\text{მაქს}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ და}$$

$$u_2 = U_{\text{მაქს}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi\right).$$

ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემაში ცვლადი დენის ენერჯის გადა-
ცემა ხორციელდება ორი სადენით (ორი ფაზა) და ენერჯის მიმღებიც, ასევე, ორფაზა
მომხმარებელია. უკუ სადენს წარმოადგენს მიწა (ნახ. 3.2.1).ამ



ნახ.3.2.1. ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემა

ნახაზიდან ჩანს, რომ ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზური ძაბვა

$$U = \underline{U}_{1ფ} - \underline{U}_{2ფ} = \sqrt{2}U_{ფ} \quad (3.2.1)$$

ორფაზა ელექტროგადაცემისას:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{ფკს} \sin \omega t, & u_1 &= U_{ფკს} \sin(\omega t + \varphi); \\ i_2 &= I_{ფკს} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), & u_2 &= U_{ფკს} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi); \end{aligned}$$

შესაბამისად, ფაზური სიმძლავრე

$$p_1 = u_1 \cdot i_1 = U_{ფკს} I_{ფკს} \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t = \frac{U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos(2\omega t + \varphi);$$

$$\begin{aligned} p_2 &= u_2 \cdot i_2 = U_{ფკს} I_{ფკს} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi) \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \\ &= \frac{U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos \varphi + \frac{U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos(2\omega t + \varphi); \end{aligned}$$

ამ გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ თითოეული ფაზით გადაცემული სიმძლავრე შეიცავს ორ შემდგენს, რომელთაგანაც პირველი შესაკრები დროზე დამოუკიდებელი (მუდმივი) სიდიდეა და მას აქტიურ სიმძლავრე ეწოდება

$$P_{ფ} = \frac{U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos \varphi,$$

მეორე შესაკრები დროში იცვლება ორმაგი სიხშირით და პერიოდის განმავლობაში ნულის ტოლია. ეს მეორე შესაკრები რეაქტიულ სიმძლავრეს წარმოადგენს, რომელიც წყაროსა და მომხმარებელს შორის ცირკულირებს.

ორფაზა აქტიური სიმძლავრე

$$P_{(2)} = \frac{2 \cdot U_{ფკს} I_{ფკს}}{2} \cos \varphi = 2U_{(2)} I_{(2)} \cos \varphi, \quad (3.2.2)$$

სადაც: $U_{(2)}$ – ორფაზა სისტემის ფაზური ძაბვის მოქმედი (ეფექტური) მნიშვნელობა;

$I_{(2)}$ – ფაზაში გამავალი დენის მოქმედი (ეფექტური) მნიშვნელობა.

შესაბამისად, სრული და რეაქტიული ორფაზა სიმძლავრე

$$S_{(2)} = 2U_{(2)} I_{(2)} \quad \text{და} \quad Q_{(2)} = 2U_{(2)} I_{(2)} \sin \varphi \quad (3.2.3)$$

იმისათვის, რომ ორფაზა გადაცემით მომხმარებელს მიეწოდოს იგივე სიმძლავრე

ვრე, რაც სამფაზა გადაცემისას, საჭიროა დაცული იქნეს შემდეგი ტოლობა

$$2S_{\text{ფ}(2)} = 3S_{\text{ფ}(3)} \quad \text{ანუ} \quad S_{\text{ფ}(2)} = 1,5S_{\text{ფ}(3)} \quad (3.2.4)$$

ამ გამოსახულების შესაბამისად, გვაქვს: ორფაზა და სამფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვების ტოლობის პირობებში თუ ფაზური სადენის განიკვეთს დავტოვებთ იგივეს, რაც სამფაზა გადაცემის ხაზში გვექნება, ანუ

$$R_{(2)} = R_{(3)},$$

მაშინ ორფაზა გადაცემაში სიმძლავრის დანაკარგი

$$\begin{aligned} \Delta P_{(2)} &= 2 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} + (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ფ}(2)})^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot (1,5 \cdot I_{\text{ფ}(3)})^2 \cdot R_{(2)} = \\ &= 9 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot R_{(3)} = 3 \cdot (3 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot R_{(3)}) = 3 \cdot \Delta P_{(3)}. \end{aligned}$$

ამრიგად, ორფაზა გადაცემისა და სამფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვების ტოლობის, იმავე განიკვეთის (F) ფაზური სადენის გამოყენებისა და მომხმარებლის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრის უზრუნველყოფის პირობებში, ორფაზა გადაცემისას დანაკარგები იზრდება 3-ჯერ. მაგრამ ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი (V) დარჩება იგივე, რაც სამფაზა გადაცემისას და, ამასთან, ორფაზა გადაცემის მესამე სადენი (უკუსადენი) იმავდროულად შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც მეხდამცავი გვარლი. გარდა ამისა, საყრდენებზე ორი ფაზური სადენის განთავსებით, მნიშვნელოვნად შემსუბუქდება საყრდენების კონსტრუქცია და შემცირდება ამ საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯი.

თუ სადენის განიკვეთს გავზრდით დატვირთვის დენის ნაზრდის პროპორციულად, მაშინ

$$R_{(2)} = \frac{R_{(3)}}{1,5}$$

და სიმძლავრის დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იქნება

$$\begin{aligned} \Delta P_{(2)} &= 2 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} + (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ფ}(2)})^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot (1,5 \cdot I_{\text{ფ}(3)})^2 \cdot R_{(2)} = \\ &= 9 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot \frac{R_{(3)}}{1,5} = 2 \cdot (3 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot R_{(3)}) = 2 \cdot \Delta P_{(3)}. \end{aligned}$$

ე.ი. ამ ბოლო შემთხვევისას ორფაზა გადაცემაში სამფაზა გადაცემასთან შედარებით სიმძლავრის დანაკარგები გაიზრდება 2-ჯერ და ფერადი ლითონის ხარჯი კი გაიზრდება 1.5-ჯერ. ხოლო საყრდენების კონსტრუქციის შემსუბუქებისა და ამ საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯი შემცირდების ხარისხი დარჩება იგივე.

(3.2.4) გამოსახულებიდან გამომდინარე, თუ მომხმარებლის დატვირთვის ფაზური წინაღობა ერთნაირი იქნება

$$Z_{ფ(2)} = Z_{ფ(3)},$$

მაშინ ორფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვა $\sqrt{1,5}$ -ჯერ მეტი უნდა იყოს, ვიდრე სამფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვა

$$U_{ფ(2)} = \sqrt{1,5} \cdot U_{ფ(3)} = 1,225 \cdot U_{ფ(3)} \quad (3.2.5)$$

ამ შემთხვევაში ფაზურ სადენში დენი ამდენჯერვე გაიზრდება

$$I_{ფ(2)} = 1,225 \cdot I_{ფ(3)} \quad (3.2.6)$$

თუ ფაზური სადენის განიკვეთს დავტოვებთ იგივეს, რაც სამფაზა გადაცემის ხაზში გვაქვს ანუ

$$R_{(2)} = R_{(3)},$$

მაშინ ორფაზა გადაცემაში სიმძლავრის დანაკარგი

$$\begin{aligned} \Delta P_{(2)} &= 2 \cdot I_{ფ(2)}^2 \cdot R_{(2)} + (\sqrt{2} \cdot I_{ფ(2)})^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot I_{ფ(2)}^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot (1,225 \cdot I_{ფ(3)})^2 \cdot R_{(2)} = \\ &= 6 \cdot I_{ფ(3)}^2 \cdot R_{(3)} = 2 \cdot (3 \cdot I_{ფ(3)}^2 \cdot R_{(3)}) = 2 \cdot \Delta P_{(3)}. \end{aligned}$$

ე.ი. ამ პირობებში ორფაზა გადაცემაში დანაკარგები გაიზრდება 2-ჯერ, ფერადი ლითონის ხარჯი არ იცვლება, ხოლო საყრდენების კონსტრუქციის შემსუბუქებისა და ამ საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯი შემცირდების ხარისხი დარჩება იგივე, რაც წინა შემთხვევაში.

თუ სადენის განიკვეთს გავზრდით დატვირთვის დენის ნაზრდის პროპორციულად, მაშინ

$$R_{(2)} = \frac{R_{(3)}}{1,225} \quad (3.2.7)$$

და სიმძლავრის დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იქნება

$$\begin{aligned} \Delta P_{(2)} &= 2 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} + (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ფ}(2)})^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot I_{\text{ფ}(2)}^2 \cdot R_{(2)} = 4 \cdot (1,225 \cdot I_{\text{ფ}(3)})^2 \cdot R_{(2)} = \\ &= 6 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot \frac{R_{(3)}}{1,225} = \frac{2}{1,225} \cdot (3 \cdot I_{\text{ფ}(3)}^2 \cdot R_{(3)}) = 1,63 \cdot \Delta P_{(3)}. \end{aligned}$$

ამ ბოლო შემთხვევისას ორფაზა გადაცემაში სამფაზა გადაცემასთან შედარებით სიმძლავრის დანაკარგები გაიზრდება 1,63-ჯერ. ფერადი ლითონის ხარჯი კი გაიზრდება 1.225-ჯერ. ხაზის ხაზური ძაბვა იგივე რჩება, შესაბამისად, საყრდენების კონსტრუქციის შემსუბუქებისა და ამ საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯის შემცირების ხარისხი დარჩება იგივე.

ამრიგად, სამფაზა ელექტროგადაცემის სისტემიდან ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემაზე გადასვლისას, ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნების პირობებში, შესაბამისი მოთხოვნები და აქედან გამომდინარე შედეგები შეიძლება წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.3.2.1).

ჩატარებული კვლევის საერთო ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ორფაზა გადაცემის სისტემის განხორციელებისას, ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისა და ტექნიკური უსაფრთხოების წესების მოთხოვნების დაცვის მიზნით, ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის ნომინალურ პარამეტრებს შორის შესრულებული უნდა იქნეს 3.2.1 ცხრილში ნაჩვენები თანაფარდობებიდან მეოთხე. კერძოდ:

1. ორფაზა სისტემის ფაზური ძაბვა სამფაზა სისტემის ფაზურ ძაბვასთან შედარებით გაიზარდოს 1,225-ჯერ;
2. ფაზური სადენის განიკვეთი, დენის იგივე სიმკვრივის შენარჩუნების მიზნით, ასევე გაიზარდოს 1,225-ჯერ;
3. ორფაზა ელექტროგადაცემა ჩამიწდეს მხოლოდ ერთ ბოლოში.

თანაფარდობა ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზების ნომინალურ პარამეტრებს შორის. ცხრ.3.2.1

№	ძირითადი მოთხოვნა	შესაბამისად	გამომდინარეობს	შედეგი
1	$S_{(2)}=S_{(3)}$	$S_{ფ(2)}=1,5S_{ფ(3)}$	$U_{ფ(2)}=U_{ფ(3)},$ $I_{ფ(2)}=1,5I_{ფ(3)}$	$U_{ბ(2)}=0,82U_{ბ(3)}$ $F_{(2)}=F_{(3)}, V_{(2)}=V_{(3)}$ $\Delta P_{(2)} = 3\Delta P_{(3)},$
2	$S_{(2)}=S_{(3)}$	$S_{ფ(2)}=1,5S_{ფ(3)}$	$U_{ფ(2)}=U_{ფ(3)},$ $I_{ფ(2)}=1,5I_{ფ(3)}$	$U_{ბ(2)}=0,82U_{ბ(3)}$ $F_{(2)}=1,5F_{(3)}, V_{(2)}=1,5V_{(3)}$ $\Delta P_{(2)} = 2\Delta P_{(3)},$
3	$S_{(2)}=S_{(3)}$	$S_{ფ(2)}=1,5S_{ფ(3)}$	$U_{ფ(2)}=1,225U_{ფ(3)},$ $I_{ფ(2)}=1,225I_{ფ(3)}$	$U_{ბ(2)}=U_{ბ(3)}$ $F_{(2)}=F_{(3)}, V_{(2)}=V_{(3)}$ $\Delta P_{(2)} = 2\Delta P_{(3)},$
4	$S_{(2)}=S_{(3)}$	$S_{ფ(2)}=1,5S_{ფ(3)}$	$U_{ფ(2)}=1,225U_{ფ(3)},$ $I_{ფ(2)}=1,225I_{ფ(3)}$	$U_{ბ(2)}=U_{ბ(3)}$ $F_{(2)}=1,225F_{(3)}, V_{(2)}=1,225V_{(3)}$ $\Delta P_{(2)} = 1,63\Delta P_{(3)}$

ამ პრინციპის უზრუნველყოფის პირობებში ორფაზა ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობა იქნება იგივე, რაც სამფაზა ელექტროგადაცემისა. სამფაზა ელექტროგადაცემასთან შედარებით ორფაზა ელექტროგადაცემაში სიმძლავრის დანაკარგები გაიზრდება მხოლოდ 1,63-ჯერ, ფერადი ლითონის ხარჯი გაიზრდება მხოლოდ 1,225-ჯერ. მნიშვნელოვნად შემსუბუქდება საყრდენების კონსტრუქცია და შემცირდება ამ საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯი.

ორფაზა და სამფაზა სისტემების ხაზური ძაბვების ტოლობის მოთხოვნიდან გამომდინარე ორფაზა გადაცემის ხაზის ფაზური ძაბვების მნიშვნელობები ნაჩვენებია ქვემოთ ცხრილში (ცხრ.3.2.2).

ჩამიწების წერტილების გავლით მიწაში გაედინება $i=i_1+i_2$ სიდიდის დენი

$$I=i_1+i_2=I_{მ\text{ა}\text{ქ}\text{ს}} \sin \omega t, + I_{მ\text{ა}\text{ქ}\text{ს}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2} I_{მ\text{ა}\text{ქ}\text{ს}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$$

რაც ფაზურ სადენში გამავალ დენთან შედარებით $\sqrt{2}$ -ჯერ მეტია.

სამფაზა და ორფაზა სისტემების ხაზური და ფაზური ძაბვები ცხრ. 3.2.2

სამფაზა სისტემა		ორფაზა სისტემა	
ხაზური ძაბვა, კვ	ფაზური ძაბვა, კვ	ხაზური ძაბვა, კვ	ფაზური ძაბვა, კვ
10	5,78	10	7,1
35	20,2	35	24,8
110	63,6	110	77,9
220	127	220	155,6
330	191	330	233,7
500	289	500	354

არაიდეალური გამტარი მიწის შემთხვევაში $f=50$ ჰერცი ცვლადი დენის მიმართ $\gamma=10^{-2}$ სიმ/მ ხვედრითი გამტარობის მქონე მიწის ერთეულოვანი სიგრძის წინაღობა $r_{მიწა}=0,05$ ომი/კმ შესაბამისად, უკუდენის გავლის გამო მიწაში ადგილი აქვს სიმძლავრის დამატებით დანაკარგებს, რომელიც 220 კვ და უფრო მაღალი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზების შემთხვევაში მიახლოებით ფაზურ სადენში (ერთ სადენში) დანაკარგის თანაზომადი სიდიდეა, ხოლო უფრო დაბალი ძაბვის ხაზების შემთხვევაში კი შედარებით უფრო ნაკლებია.

თუ ჩამიწებასთან ერთად გამოვიყენებთ მესამე საჰაერო სადენს, მაშინ უკუდენი გადანაწილდება ამ სადენსა და მიწას შორის. შესაბამისად შემცირდება დანაკარგები, მაგრამ გაიზრდება ფერადი ლითონის ხარჯი ხაზზე, თუმცა ეს მესამე სადენი შეიძლება გამოყენებული იქნეს აგრეთვე, როგორც მეხდამცავი გვარლი. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, ჩამიწებულ ნეიტრალიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემისას მიწაში გაედინება $\sqrt{2}$ მეტი დენი, ვიდრე ფაზურ სადენებში. ეს გარემოება მნიშვნელოვნად გაამკაცრებს ქვესადგურზე ჩამიწების კონტურის მიმართ მოთხოვნებს. აქედან გამომდინარე, ორფაზა ელექტროგა-

დაცემა მიზანშეწონილია ჩამიწდეს მხოლოდ ერთ ბოლოში და უკუსადენად გამოვიყენოთ მესამე სადენი, რომელიც იმავდროულად მეხდამცავი გვარლის ფუნქციასაც შეითავსებს.

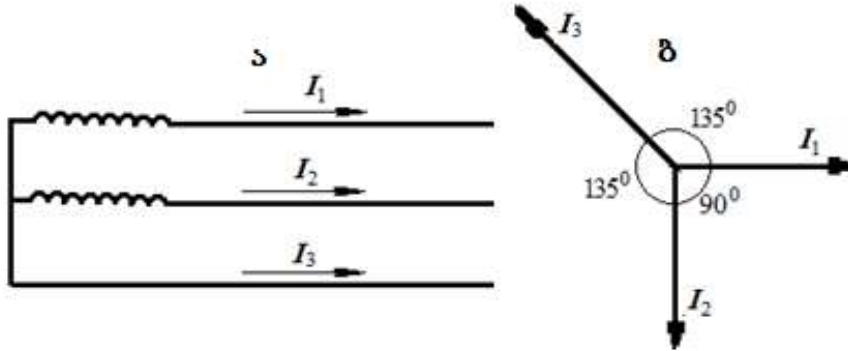
იმ შემთხვევაში, როცა ორფაზა გადაცემა განხორციელებული იქნება უკუ-სა-დენტან (მესამე სადენი მეხდამცავი გვარლის ფუნქციით) ერთად და ჩამიწე-ბული იქნება ორივე ბოლოში, მაშინ მიწაში გამავალი უკუდენი ფაზურ სადენში გამავალი დენის თითქმის 50%-ს შეადგენს, ხოლო უკუ სადენში (მესამე სადე-ნში) გამავალი დენი კი ფაზური დენის თითქმის 90%-ის ტოლია. მიუხედავად იმისა, რომ ამ შემთხვევაში მიწაში გამავალი დენი მნიშვნელოვნად შემცირდა, მაინც ისეთ მნიშვნელობას აღწევს, რომ ჩამიწების კონტურის მიმართ გამკა-ცრებული მოთხოვნები არ შემსუბუქდება.

სამფაზა ელექტროგადაცემის სისტემასთან შედარებით ერთ ბოლოში ჩამი-წებულ ნეიტრალიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის სისტემის უპირატესობა მდგომარეობს მასში, რომ მნიშვნელოვად მარტივდება საჰაერო ხაზების საყრ-დენების კონსტრუქცია; თითქმის ორჯერ მცირდება ხაზის ტრასის განივი ზო-მები; თითქმის 33%-ით მცირდება სახაზო იზოლატორისა და სახაზო არმატუ-რის ხარჯი; ხაზზე საკმარისია ერთი მეხდამცავი გვარლი სამფაზა ელექტროგა-დაცემის სისტემის ფაზური საყრდენების ჰორიზონტალურად განლაგებისას აუცილებელია ორი მეხდამცავი გვარლი). უნდა აღინიშნოს, რომ ხაზის ტრასის განივი ზომების შემცირება ხელსაყრელ პირობებს ქმნის მთიანი რეგიონის ვი-წრო ხეობაში შემავალი ძაბვის მეორე ხაზის გაყვანა-მშენებლობის თვალსა-ზრისით. ამასთან, ხაზის ტრასის განივი ზომების შემცირება მნიშვნელოვანია მაღალი ღირებულების ტყის მასივებში გამავალი ხაზებისთვის.

3.3. ორფაზა ელექტროგადაცემის სადენტა ინდუქციურობა.

მრავალფაზა ელექტრო გადაცემის თითოეულ სადენში ინდუქტირდება ამავე სადენში გამავალი დენით განპირობებული თვითინდუქციის ე.მ.ძ და და-

ნარჩენ სადენში გამავალი დენებით განპირობებული ურთიერთინდუქციის ე.მ.ძალა. განვიხილოთ სამსადენიანი ხაზი (ნახ.3.3.1.ა), რომლის მესამე სადენი დანარჩენ ორ ფაზაში გამავალი დენისთვის წარმოადგენს უკუ სადენს. შესაბამისად სადენებში გამავალი დენების ვექტორულ დიაგრამას აქვს ნახ.3.3.1.ბ-ზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.3.3.1. ა – სამსადენიანი ორფაზა ხაზი.ბ – სადენებში გამავალი დენების ვექტორული დიაგრამა სადენთა ინდუქციურობის გაანგარიშებისათვის.

თუ ჩავთვლით, რომ ფაზური დენები ტოლია და ფაზა 1-ში გამავალი დენია I_1 , მაშინ ნახაზის 3.4.1.ბ-ს თანახმად

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-j90} = -jI_1 \quad \text{და} \quad I_3 = \sqrt{2} I_1 \cdot e^{j135} = (-1 + j)I_1. \quad (3.3.1)$$

სადენებში გამავალი დენები იცვლება სინუსოიდის კანონით

სადენებში გამავალი დენები იცვლება სინუსოიდის კანონით

$$i_1 = I_{\text{მაქს}} \sin \omega t, \quad i_2 = I_{\text{მაქს}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad \text{და} \quad i_3 = -(i_1 + i_2) = \sqrt{2} I_{\text{მაქს}} \sin(\omega t + \frac{3\pi}{4}) \quad (3.3.2)$$

და, შესაბამისად, თითოეულ სადენში ძაბვის ვარდნის საანგარიშო გამოსახულება შეგვიძლია ჩავწეროთ სიმბოლური მეთოდის გამოყენებით [20] და გვაქვს:

$$\begin{aligned} U_1 &= (r + j\omega L)I_1 + j\omega M_{1,2}I_2 + j\omega M_{1,3}I_3 \\ U_2 &= (r + j\omega L)I_2 + j\omega M_{2,3}I_3 + j\omega M_{2,1}I_1 \\ U_3 &= (r + j\omega L)I_3 + j\omega M_{3,1}I_1 + j\omega M_{3,2}I_2 \end{aligned}$$

(3.3.2) თანაფარდობიდან გამომდინარე ბოლო გამოსახულებები მიიღებს სახეს;

$$U_1 = [r + j\omega(L - jM_{1,2} + (-1 + j)M_{1,3})]I_1$$

$$U_2 = [r + j\omega(L + (-1 - j)M_{2,3} + jM_{2,1})]I_2$$

$$U_3 = [r + j\omega(L + (-0,5 - j0,5)M_{3,1} + (-0,5 + j0,5)M_{3,2})]I_3$$

მრგვალ ფრჩხილებში მდგომი გამოსახულებები შეიძლება განვიხილოთ როგორც თითოეული სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა შესაბამისად

$$L'_1 = (L - jM_{1,2} - M_{1,3} + jM_{1,3})$$

$$L'_2 = (L - M_{2,3} - jM_{2,3} + jM_{2,1})$$

$$L'_3 = (L - 0,5M_{3,1} - j0,5M_{3,1} - 0,5M_{3,2} + j0,5M_{3,2})$$

ℓ სიგრძისა და R რადიუსის სადენის L თვითინდუქციურობა გამოითვლება გამოსახულებით

$$L = L_{\text{გარე}} + L_{\text{შიგა}} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi},$$

სადაც μ_0 - მაგნიტური ველის მუდმივა $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ ჰნ/მ;

μ - სადენის მასალისაბსოლუტური მაგნიტური შეღწევადობა (ფერადი ლითონისათვის $\mu = \mu_0$).

საჰაერო ხაზების სადენები მზადდება ფერადი ლითონისაგან (ალუმინისაგან) სიგრძის 1 კმ ამ სადენის შიგა ინდუქტივობა

$$L_{0, \text{შიგა}} = \frac{1,257 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 3,14} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ ჰნ/კმ}$$

ანუ სასდენის შიგა რეაქტიული წინაღობა

$$X_{0, \text{შიგა}} = \omega L_{0, \text{შიგა}} = 0,0157 \text{ ომი/კმ.}$$

D მანძილზე დაშორებული სიგრძის ($D \ll \ell$) პარალელური სადენების ურთიერთინდუქცია

$$M = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right).$$

ბოლო ორი გამოსახულების გათვალისწინებით სადენთა ეკვივალენტური ინდუქციურობის საანგარიშო გამოსახულებები ჩაიწერება შემდეგ სახეში:

$$L'_1 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,2}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,3}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,3}} - 1 \right)$$

$$L'_2 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,3}} - 1 \right) - j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,3}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,1}} - 1 \right)$$

$$L'_3 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,1}} - 1 \right) - j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,1}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,2}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,2}} - 1 \right)$$

ანუ 1 კმ სიგრძის სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა

$$L'_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{1,3}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{1,2}}{D_{1,3}}$$

$$L'_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{2,3}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{2,3}}{D_{2,1}}$$

$$L'_3 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D_{1,3} D_{3,2}}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \frac{D_{1,3}}{D_{2,3}}$$

მივიღეთ, რომ სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა, ზოგადად, კომპლექსური სიდიდეა. მისი ნამდვილი ნაწილი, გამრავლებული $j\omega$ - ზე, გვაძლევს 1 კმ სიგრძის ამ სადენის რეაქტიულ წინაღობას, ხოლო წარმოსახვითი ნაწილი, გამრავლებული $j\omega$ - ზე, გვაძლევს 1კმ სიგრძის ამავე სადენის აქტიურ დამატებით (ომური წინაღობის ზევით) წინაღობას.

50 ჰერცი ცვლადი დენის საჰაერო ხაზების ალუმინის სადენებისათვის გვაქვს:

$$x_{0,1} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{1,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,1,დამატ.} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{1,3}}{D_{1,2}} \text{ ომი/კმ}; \quad (3.3.3)$$

$$x_{0,2} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{2,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,2,დამატ.} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{2,1}}{D_{2,3}} \text{ ომი/კმ}; \quad (3.3.4)$$

$$x_{0,3} = 0,0628 \cdot \ln \frac{\sqrt{D_{1,3} D_{3,2}}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,3,დამატ.} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{2,3}}{D_{1,3}} \text{ ომი/კმ}. \quad (3.3.5)$$

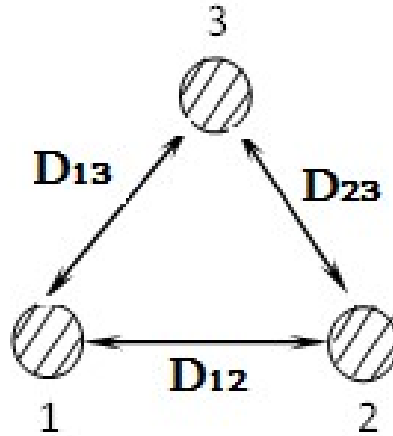
თუ ნატურალური ლოგარითმიდან გადავალთ ათობით ლოგარითმზე, მივიღებთ

$$x_{0,1} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{1,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,1,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{1,3}}{D_{1,2}} \text{ ომი/კმ} \quad (3.3.6)$$

$$x_{0,2} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,2,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,1}}{D_{2,3}} \text{ ომი/კმ} \quad (3.3.7)$$

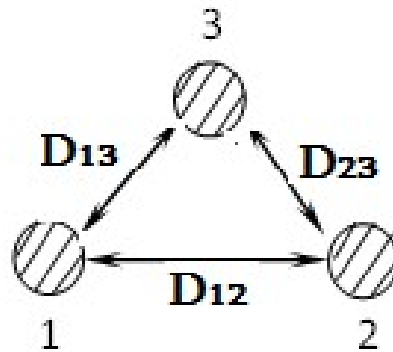
$$x_{0,3} = 0,145 \cdot \lg \frac{\sqrt{D_{1,3} D_{3,2}}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,3,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,3}}{D_{1,3}} \text{ ომი/კმ} \quad (3.3.8)$$

როცა სადენების სივრცეში განთავსებულია ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებზე (ნახ.3.3.2.) ანუ $D_{1,2}=D_{2,3}=D_{3,1}$



ნახ.3.3.2. სადენების განთავსება ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებზე (საყრდენებზე)

მაშინ მათი აქტიური დამატებითი წინაღობები ნულის ტოლია. როცა ორფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური სადენები განლაგდება ჰორიზონტალურ სიბრტყეში, ხოლო მესამე სადენი კი შეითავსებს მეხსარიდი გვარლის ფუნქციას (ნახ. 3.3.3). ამ შემთხვევაში $D_{13} = D_{23} < D_{12}$



ნახ.3.3.3. სადენების განთავსება ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებზე (საყრდენებზე)

აქედან გამომდინარე,

$$r_{0,1,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{1,3}}{D_{1,2}} < 0;$$

$$r_{0,2,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,1}}{D_{2,3}} > 0;$$

და

$$r_{0,3,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,3}}{D_{1,3}} = 0.$$

ეს იმას ნიშნავს, რომ ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით სადენებს შორის ადგილი აქვს აქტიური სიმძლავრის მიმიცვლას. ანუ ერთი სადენიდან ელექტროენერგია გაედინება და იმავე ოდენობის ენერგია შემოედინება მეორე სადენში. თუმცა ორივე სადენის დამატებითი აქტიური წინაღობა ნულის ტოლია

$$r_{0,1,დამატ.} + r_{0,2,დამატ.} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,1} D_{1,3}}{D_{1,3} D_{2,1}} = 0,145 \cdot \lg 1 = 0.$$

როცა ფაზაში გვაქვს რამდენიმე სადენი (გახლეჩილი ფაზა), მაშინ გამოსახულებებში (3.3.6-3.3.8) უნდა ჩავსვათ ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი

$$R_{333} = \sqrt[n]{R \cdot a^{n-1}}$$

სადაც R - გახლეჩილი ფაზის სადენის რადიუსი.

a – ფაზაში სადენებს შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილი (გახლეჩის ბიჯი);

n – ფაზაში სადენთა რაოდენობა.

ქვემოთ ცხრილში (ცხრ. 3.3.1) მოცემულია სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ორფაზა ელექტროგადაცემის სადენების რეაქტიული წინაღობები. ამ ცხრილში 330 და 500კვ ძაბვის ხაზებისთვის ნაჩვენებია გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი. ამ ცხრილიდან ჩანს, ორფაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობა, პრაქტიკულად, სამფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური სადენების რეაქტიული წინაღობების ტოლია.

აქედან გამომდინარე, შემდგომში რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშებისა და გაანალიზების დროს 1კმ ხაზის სადენების რეაქტიული წინაღობები აიღება 0,4 ომი/კმ-ის ტოლად [21].

ორფაზა გადაცემის ხაზის რეაქტიული წინაღობა, ომი/კმ. ცხრ. 3.3.1

ნომინალური ხაზური ძაბვა, კვ	სადენთა განლაგება	სადენის მარკა	სადენის გარე დიამეტრი, მმ	ფაზურ სადენებს შორის მანძილი D_{12} , მ	ფაზურ სადენსა და უკუსადენს შორის მანძილი $D_{13}=D_{23}$, მ	1 კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული წინაღობა, ომი/კმ		
						ფაზა 1	ფაზა 2	უკუ სადენი
35	ტოლფერდა სამკუთხედი	AC-50/8	9,6	3	2,45	0,408	0,408	0,408
		AC-70/11	11,4	3	2,45	0,398	0,398	0,398
		AC-95/16	13,5	3	2,45	0,389	0,389	0,389
110		AC-70/11	11,4	5	4,09	0,430	0,430	0,430
		AC-95/16	13,5	5	4,09	0,419	0,419	0,419
		AC-120/27	15,6	5	4,09	0,410	0,410	0,410
		AC-150/19	16,8	5	4,09	0,405	0,405	0,405
220		AC-185/24	18,9	5	4,09	0,398	0,398	0,398
		AC-240/32	21,6	8	6,54	0,419	0,419	0,419
		AC-300/67	24,5	8	6,54	0,411	0,411	0,411
	AC-400/51	27,5	8	6,54	0,404	0,404	0,404	
330	AC-500/64	30,6	8	6,54	0,397	0,397	0,397	
	2xAC-240/32	113,84	11	8,99	0,334	0,334	0,334	
	2xAC-300/67	121,24	11	8,99	0,331	0,331	0,331	
	2xAC-400/51	128,46	11	8,99	0,326	0,326	0,326	
500	3xAC-300/67	199,48	14	11,44	0,314	0,314	0,314	
	3xAC-400/51	214,72	14	11,44	0,310	0,310	0,310	

დასკვნა მე-3 თავის მიმართ

ამ თავში ჩატარებული კვლევისა და შესაბამისი ანალიზის საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა:

1. იმისათვის, რომ ორფაზა გადაცემით მომხმარებელთან მიწოდებული იქნეს იგივე სიმძლავრე, რაც სამფაზა გადაცემისას, საჭიროა დაცული იქნეს შემდეგი ტოლობა

$$2S_{ფ(2)} = 3S_{ფ(3)}; \quad \text{ანუ} \quad S_{ფ(2)} = 1,5S_{ფ(3)};$$

2.ორფაზა გადაცემისა და სამფაზა გადაცემის ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნების დროს თუ ორფაზა და სამფაზა გადაცემების ხაზური ძაბვები ტოლია ამ შემთხვევაში ხაზზე იმავე განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორფაზა გადაცემის დროს იზრდება 2-ჯერ. ხოლო ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი დარჩება იგივე, რაც სამფაზა გადაცემისას;

4.ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისას, თუ ორფაზა და სამფაზა გადაცემების ხაზური ძაბვები ტოლია და ამ ხაზზე 1,225-ჯერ მეტი განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იზრდება 1,63-ჯერ. ხოლო ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი ასევე იზრდება 1,225-ჯერ;

5.ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის სისტემების დაკავშირება შესაძლებელია სპეციალური ტრანსფორმატორებით, რომელთა საშუალებით ძაბვათა ორფაზა სისტემა გადავა იქნება ძაბვათა სამფაზა სისტემაზე და პირიქით;

6.თეორიული დამტკიცების გზით დადგენილია სამსადენიანი ორფაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და უკუსადენის ელექტრული პარამეტრები;

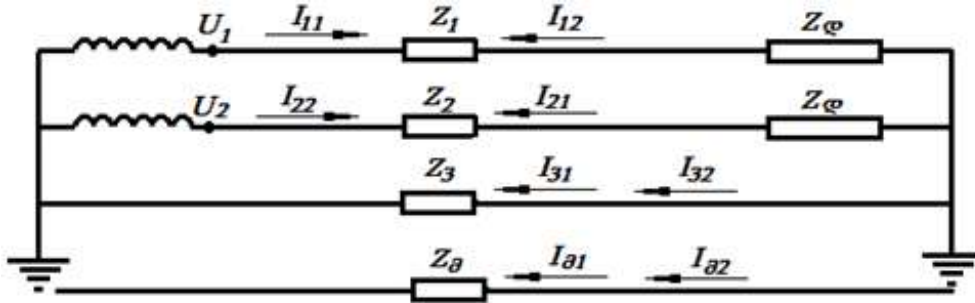
7.ორფაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობა, პრაქტიკულად, სამფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური სადენების რეაქტიული წინაღობების ტოლია.

თავი 4. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმი

4.1. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება

დატვირთვის დენების მიხედვით

განვიხილოთ ორფაზა სისტემა, რომელსაც გააჩნია მესამე (ნეიტრალური) სადენი და ორივე ბოლოში ჩამიწებულია (ნახ.4.1.1). ფაზებში გამავალი დენები გამოვთვალოთ ზედდების მეთოდით.



ნახ.4.1.1. ორფაზა სისტემა, მესამე უკუ სადენით და ორივე ბოლოში ჩამიწებული.

ნახაზზე: I_{11} , I_{22} - ფაზური დენები, გამოწვეული შესაბამისი ფაზური ძაბვებით;

I_{12} - დენი პირველ ფაზაში, გამოწვეული U_2 ფაზური ძაბვით;

I_{21} - დენი მეორე ფაზაში, გამოწვეული U_1 ფაზური ძაბვით;

I_{31} , I_{32} - დენები მესამე სადენში, გამოწვეული U_1 და U_2 ფაზური ძაბვებით;

I_{a1} , I_{a2} - დენები მიწაში, გამოწვეული U_1 და U_2 ფაზური ძაბვებით;

Z_c - დატვირთვის წინაღობა;

Z_a - მიწის წინაღობა ცვლადი დენის მიმართ;

$Z_1=Z_2=Z_3=Z_b$ - გადაცემის ხაზის ფაზური სადენებისა და მესამე სადენის წინაღობა.

მესამე სადენი და მიწა წარმოადგენს პარალელურ შტოებს და მათი ეკვივალენტური წინაღობა ანუ ნულოვანი სადენის წინაღობა

$$Z_6 = \frac{Z_3 \cdot Z_a}{Z_3 + Z_a}.$$

გამოვთვალოთ სადენებში გამავალი დენები, გამოწვეული თითოეული

ფაზური ძაბვით:

1. $U_1 \neq 0, \quad U_2 = 0, \quad$ მაშინ

$$I_{11} = \frac{U_1}{Z + \frac{Z \cdot Z_6}{Z + Z_6}} = \frac{U_1(Z + Z_6)}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}, \quad I_{21} = \frac{Z_6}{Z} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{21} + I_{61}}{I_{61}} = \frac{Z + Z_6}{Z} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{11}}{I_{61}} = \frac{Z + Z_6}{Z}$$

აქედან $I_{61} = \frac{I_{11} \cdot Z}{Z + Z_6} = \frac{U_1 \cdot Z}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$ და $I_{21} = \frac{U_1 \cdot Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6} \quad \frac{I_{31}}{I_{\theta 1}} = \frac{Z_{\theta}}{Z_3}$ ანუ

$$\frac{I_{31} + I_{\theta 1}}{I_{\theta 1}} = \frac{Z_3 + Z_{\theta}}{Z_3} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{61}}{I_{\theta 1}} = \frac{Z_3 + Z_{\theta}}{Z_3} \quad \text{აქედან} \quad I_{\theta 1} = \frac{I_{61} \cdot Z_3}{Z_3 + Z_{\theta}} = \frac{U_1 \cdot Z \cdot Z_3}{(Z_3 + Z_{\theta}) \cdot (Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

და $I_{31} = \frac{I_{\theta 1} \cdot Z_{\theta}}{Z_3} = \frac{U_1 \cdot Z \cdot Z_{\theta}}{(Z_3 + Z_{\theta}) \cdot (Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$

2. $U_2 \neq 0, \quad U_1 = 0, \quad$ მაშინ

$$I_{22} = \frac{U_2}{Z + \frac{(Z) \cdot Z_6}{(Z) + Z_6}} = \frac{U_2(Z + Z_6)}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}, \quad I_{62} = \frac{U_2 \cdot Z}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6} \quad \text{და} \quad I_{12} = \frac{U_2 \cdot Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$$

$$\frac{I_{32}}{I_{\theta 2}} = \frac{Z_{\theta}}{Z_3} \quad \text{ანუ} \quad \frac{I_{32} + I_{\theta 2}}{I_{\theta 2}} = \frac{Z_3 + Z_{\theta}}{Z_3} \quad \text{ანუ}$$

$$\frac{I_{62}}{I_{\theta 2}} = \frac{Z_3 + Z_{\theta}}{Z_3} \quad I_{\theta 2} = \frac{I_{62} \cdot Z_3}{Z_3 + Z_{\theta}} = \frac{U_2 \cdot Z \cdot Z_3}{(Z_3 + Z_{\theta}) \cdot (Z^2 + 2Z \cdot Z_6)} \quad \text{ქედან}$$

$$I_{32} = \frac{I_{\theta 2} \cdot Z_{\theta}}{Z_3} = \frac{U_2 \cdot Z \cdot Z_{\theta}}{(Z_3 + Z_{\theta}) \cdot (Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

ამ გამოსახულებებში Z წარმოადგენს ფაზური სადენის ჯამურ წინააღობას

$$Z = Z_1 = Z_2 = Z_b + Z_d$$

ზედღების მეთოდის გამოყენებით გამოვთვალოთ სადენებში დენები:

პირველ სადენში

$$I_1 = I_{11} - I_{12} = \frac{U_1(Z + Z_6) - U_2 Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$$

ეორე სადენში

$$I_2 = I_{22} - I_{21} = \frac{U_2(Z + Z_6) - U_1 Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$$

უკუ სადენში

$$I_3 = I_{31} + I_{32} = \frac{(U_1 + U_2)ZZ_6}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

მიწაში გამავალი დენი

$$I_3 = I_{31} + I_{32} = \frac{(U_1 + U_2)ZZ_3}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

დენი ნულოვან სადენში

$$I_6 = I_3 + I_3 = \frac{(U_1 + U_2)Z}{(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

მიღებული გამოსახულებების საფუძველზე გამოვთვალოთ დენები, როცა ძაბვათა სისტემა ქმნის ორფაზა არასიმეტრიულ სისტემას ფაზურ ძაბვებს შორის $\alpha = -\pi/2$ ძვრის კუთხით:

$$U_1 = U; \quad U_2 = U \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}};$$

$$\text{აქ: } e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j1, \quad \text{ე.ი. } U_2 = -jU.$$

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{UZ + U(1 + j1)Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6} = \frac{U(Z + Z_6) + jU \cdot Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-jUZ + (-jU - U_1)Z_6}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6} = \frac{-UZ_6 - jU \cdot (Z + Z_6)}{Z^2 + 2Z \cdot Z_6}$$

დენი უკუ სადენში

$$I_3 = \frac{(U - jU)ZZ_3}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)} = \frac{U(1 - j1)ZZ_3}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

მიწაში გამავალი დენი

$$I_3 = \frac{(U - jU)ZZ_3}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)} = \frac{U(1 - j1)ZZ_3}{(Z + Z_3)(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

დენი ნულოვან სადენში

$$I_6 = I_3 + I_9 = \frac{U(1-j1)Z}{(Z^2 + 2Z \cdot Z_6)}$$

მივიღეთ, რომ უკუ სადენში და მიწაში გამავალი დენები ნულისგან განსხვავებულია. რადგანაც უკუ სადენის წინაღობა დატვირთვის წინააღმდეგობასთან შედარებით მნიშვნელოვნად ნაკლებია, უკუ სადენში გამავალი დენის მოქმედი მნიშვნელობა, ანუ უკუ სადენში და მიწაში გამავალი დენების ჯამის მოქმედი მნიშვნელობა, თითქმის $\sqrt{2}$ -ჯერ მეტია, ვიდრე ფაზურ სადენში გამავალი დენის მოქმედი მნიშვნელობა. ამასთან, ეს დენი მიწასა და უკუ სადენს შორის მათი წინააღმდეგობის უკუპროპორციულად ნაწილდება. შესაბამისად, როგორც გამოთვლებმა აჩვენა, მიწაში გამავალი დენის მოქმედი მნიშვნელობა ფაზური დენის მოქმედი მნიშვნელობის თითქმის (50-60)%-ს აღწევს, რაც ქვესადგურზე ჩამიწების კონტურისთვის დამატებით მოთხოვნებს განაპირობებს.

თუ უსაფრთხოების თვალსაზრისით, ორფაზა გადაცემა ჩამიწებული იქნება მხოლოდ ერთ ბოლოში, მაშინ ნორმალურ რეჟიმში მიწაში არ იქნება და ფაზურ სადენებსა და უკუ სადენში გამავალი დენები იქნება

პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z^2 + 2Z \cdot Z_3}$$

მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z^2 + 2Z \cdot Z_3}$$

უკუ სადენში

$$I_3 = \frac{U(1-j1)Z}{Z^2 + 2Z \cdot Z_3}$$

თუ უკუ სადენი არ გვექნება, მაშინ ფაზურ სადენებში გამავალი დენები იქნება:

$$I_1 = \frac{U(1+j1)}{2Z} \quad \text{და} \quad I_2 = \frac{-U(1+j1)}{2Z}$$

4.2. რიცხვითი მაგალითების ანალიზი

მაგალითი 1. დავუშვათ, რომ 220 კვ ძაბვის სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის საშუალებით გადავცემთ სამფაზა სიმძლავრეს $3 \times (50 + j20)$ მგვა. ხაზის თავში მოდებული ძაბვა წარმოადგენს ძაბვათა სიმეტრიულ სისტემას. ხაზზე გამოყენებულია AC-300 მარკის სადენი და ხაზის სიგრძეა 80 კმ. ფაზური ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა

$$U = 220\sqrt{3} \text{ კვ}$$

და, შესაბამისად, ფაზური სადენისა და მომხმარებლის ფაზური დატვირთვის წინაღობა ერთად აღებული) შეადგენს

$$Z = Z_b + Z_g = R + jX = U^2 \left(\frac{P + jQ}{P^2 + Q^2} \right) = \frac{220^2}{3} \cdot \left(\frac{50 + j20}{50^2 + 20^2} \right) = 278,2 + j111,3 \text{ ომი}$$

ხაზის ფაზური სადენის წინაღობა

$$Z_b = R_b + jX_b = (0,1 + j0,4) \cdot 80 = 8 + j32 \quad \text{ომი}$$

დატვირთვის ფაზის წინაღობა

$$Z_g = R_g + jX_g = Z - Z_b = 278,29 + j111,3 - (8 + j32) = 270,29 + j79,3 \quad \text{ომი}$$

მიწის წინაღობა

$$Z_g = R_g + jX_g = (0,05 + j0,7) \cdot 80 = 4 + j56 \quad \text{ომი}$$

ჩავთვალოთ, რომ ელექტროგადაცემა ჩამიწებულია მხოლოდ ერთ ბოლოში. მაშინ ნულოვანი სადენის წინაღობა Z_6 უსასრულობის ტოლია და ფაზურ სადენებში გამავალი დენები იქნება:

პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + 3Z_6)}{Z^2 + 3Z \cdot Z_6} = \frac{U}{Z} = \frac{220/\sqrt{3}}{(278,29 + j111,3)} = 0,394 - j0,158 \quad 3a$$

მეორე სადენში

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = (0,394 - j0,158) \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -0,334 - j0,262 \quad 3a$$

მესამე სადენში

$$I_3 = I_1 \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} = (0,394 - j0,158) \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -0,06 + j0,42 \quad 3a$$

დენის მოქმედი მნიშვნელობა ფაზებში

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = 0,425 \quad 3a$$

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში

$$\text{პირველ სადენში } \Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,394 - j0,158) \cdot (8 + j32) = 8,21 + j1,35 \quad 3b$$

$$\text{მეორე სადენში } \Delta U_2 = I_2 Z_b = (-0,334 - j0,262)(8 + j32) = 5,71 - j1,279 \quad 3b$$

$$\text{მესამე სადენში } \Delta U_3 = I_3 Z_b = (-0,06 + j0,42)(8 + j32) = -13,92 + j1,44 \quad 3b$$

ძაბვები მომხმარებლის სალტეზე:

$$U_{1,გ} = U_1 - \Delta U_1 = \frac{220}{\sqrt{3}} - (8,21 + j1,35) = 118,79 - j1,35 \quad 3b$$

$$U_{2,გ} = U_2 - \Delta U_2 = \frac{220}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - (5,71 - j1,279) = -69,21 - j97,21 \quad 3b$$

$$U_{3,გ} = U_3 - \Delta U_3 = \frac{220}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - (-13,92 + j1,44) = -49,58 + j108,56 \quad 3b$$

ძაბვების მოდული

$$|U_{1,გ}| = \sqrt{118,79^2 + 1,35^2} = 119,3 \quad 3b$$

$$|U_{2,გ}| = \sqrt{69,21^2 + 97,21^2} = 119,33 \quad 3b$$

$$|U_{3,გ}| = \sqrt{49,58^2 + 108,56^2} = 119,34$$

33

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველ ფაზაში

$$S_{1,გ} = U_{1,გ} \cdot I_1^* = (118,79 - j11,35)(0,394 + j0,158) = 48,59 + j14,3 \quad \text{მგვა}$$

მეორე ფაზაში

$$S_{2,გ} = U_{2,გ} \cdot I_2^* = (-69,21 - j97,21)(-0,334 + j0,262) = 48,59 + j14,34 \quad \text{მგვა}$$

მესამე ფაზაში

$$S_{3,გ} = U_{3,გ} \cdot I_3^* = (-49,59 + j108,56)(-0,06 - j0,42) = 48,58 + j14,32 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები ფაზურ სადენებში

$$\Delta S_{1,გ} = \Delta U_1 \cdot I_1^* = (8,21 + j11,35) \cdot (0,394 + j0,158) = 1,44 + j5,77 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_{2,გ} = \Delta U_2 \cdot I_2^* = (5,71 - j12,79) \cdot (-0,334 + j0,262) = 1,44 + j5,77 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_{3,გ} = \Delta U_3 \cdot I_3^* = (-13,92 + j1,44) \cdot (-0,06 - j0,42) = 1,44 + j5,76 \quad \text{მგვა}$$

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,გაგ} = (48,59 + j14,3) + (1,44 + j5,77) = 50,03 + j20,07 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,გაგ} = (48,59 + j14,34) + (1,44 + j5,77) = 50,03 + j20,11 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{3,გაგ} = (49,58 + j14,32) + (1,44 + j5,76) = 50,02 + j20,08 \quad \text{მგვა}$$

გადაცემის ხაზში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი შეადგენს

$$\Delta P = 3 \cdot 1,44 = 4,32 \text{ მგვტ-ს, ანუ}$$

$$\Delta P\% = \frac{4,32 \cdot 100}{150} = 2,88\%.$$

მაგალითი 2. განვიხილოთ ორფაზა ელექტროგადაცემა, რომლის საშუალებით იკვებება იმავე სიდიდის დატვირთვის მომხმარებელი, რაც წინა განხილულ მაგალითში (150+j60) მგვა. ამ შემთხვევაში ერთი ფაზის დატვირთვა იქნება 75+j30

მგვა. ფაზური ძაბვები დაძრულია ერთმანეთის მიმართ 90° -ით და სიდიდით ავიღოთ 1,225-ჯერ მეტი, ვიდრე სამფაზა სისტემის შემთხვევაში. ე.ი.

$$U_1 = U = 155,6, \quad U_2 = -jU = -j155,6.$$

ხაზზე გამოყენებულია AC-300 მარკის სადენი და ხაზის სიგრძეა 80 კმ. გადაცემის ფაზური წინაღობა (ხაზის ფაზური სადენისა და დატვირთვის ფაზური წინაღობათა ჯამი)

$$Z = Z_b + Z_g = R + jX = U^2 \left(\frac{P + jQ}{P^2 + Q^2} \right) = 155,6^2 \cdot \left(\frac{75 + j30}{75^2 + 30^2} \right) = 278,29 + j111,32$$

ხაზის ფაზური სადენის წინაღობა

$$Z_b = R_b + jX_b = (0,1 + j0,4) \cdot 80 = 8 + j32 \quad \text{ომი}$$

დატვირთვის ფაზის წინაღობა

$$Z_g = R_g + jX_g = Z - Z_b = 278,29 + j111,32 - (8 + j32) = 270,29 + j79,32 \quad \text{ომი}$$

გამოვთვალოთ სადენებში გამავალი დენები:

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{155,6 \cdot (286,29 + j143,32) + j155,6 \cdot (8 + j32)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j175,32)} = 0,416 - j0,167 \quad \text{კა}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-155,6 \cdot (8 + j32) - j155,6 \cdot (286,29 + j143,32)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j175,32)} = -0,259 - j0,456 \quad \text{კა}$$

უკუ სადენში

$$I_3 = \frac{U(1 - j1)}{Z + 2Z_3} = \frac{155,6 \cdot (1 - j1)}{(294,29 + j175,32)} = 0,158 - j0,623 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I_1 + I_2 = 0,416 - j0,167 - 0,259 - j0,456 = 0,157 - j0,623 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,416^2 + 0,167^2} = 0,448$$

$$|I_2| = \sqrt{0,259^2 + 0,456^2} = 0,524$$

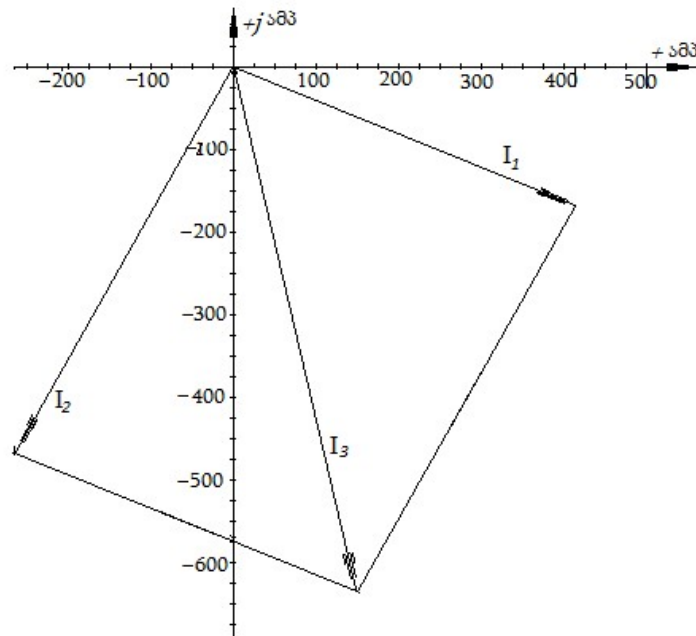
$$|I_3| = \sqrt{0,157^2 + 0,623^2} = 0,643$$

მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,44-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზაში დენთან შედარებით 1,23-ჯერ მეტია.

პირველ და მეორე ფაზებში დენების ძვრის კუთხე შესაბამისად შეადგენს:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0,167}{0,416} = 21,8^\circ \quad \varphi_2 = \arctg \frac{0,259}{0,456} = 29,6^\circ$$

ავაგოთ დენების ვექტორული დიაგრამა (ნახ.4.2.1).



ნახ.4.2.1 დენების ვექტორული დიაგრამა 220კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს.

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

$$\text{პირველ სადენში } \Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,416 - j0,167) \cdot (8 + j32) = 8,67 + j1,197$$

33

მეორე სადენში $\Delta U_2 = I_2 Z_b = (-0,259 - j0,456) \cdot (8 + j32) = 122 - j1194$ 33

უკუ სადენში $\Delta U_3 = I_3 Z_3 = (0,157 - j0,623) \cdot (8 + j32) = 212 + j0,04$ 33

მაბევები დატვირთვის ფაზებზე:

$U_{1,ფ} = I_1 Z_{ფ} = (0,416 - j0,167) \cdot (270,29 + j79,32) = 125,69 - j1214$ 33

$U_{2,ფ} = I_2 Z_{ფ} = (-0,259 - j0,456) \cdot (270,29 + j79,32) = -33,84 - j143,79$ 33

მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვის მოდული:

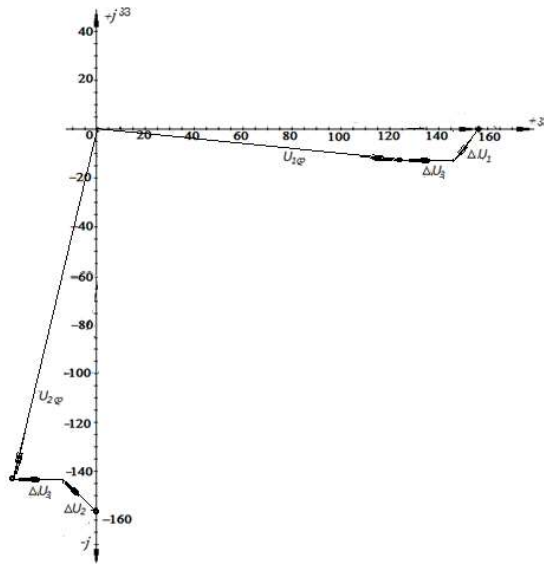
$$|U_{1,ფ}| = \sqrt{125,69^2 + 1214^2} = 1263 \quad 33$$

$$|U_{2,ფ}| = \sqrt{33,84^2 + 143,79^2} = 147,72 \quad 33$$

ანუ პროცენტებში:

$U_{1,ფ}\% = (126,3/155,6) \cdot 100 = 81,2\%$; $U_{2,ფ}\% = (147,72/155,6) \cdot 100 = 94,94\%$.

ავაგოთ ძაბვების ვექტორული დიაგრამა (ნახ.4.2.2).



ნახ.4.2.2 ძაბვების დიაგრამა 220 კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს დროს.

როგორც ვხედავთ მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა მნიშვნელოვნად დაბალია, განსაკუთრებით პირველ ფაზაზე. მეორე ფაზის ძაბვა პირველი ფაზის ძაბვას აღემატება 1,17-ჯერ ანუ 17%-ით.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,გად.} = U_1 \cdot I_1^* = 155,6 \cdot (0,416 + j0,167) = 64,73 + j25,99$$

მგვა

$$S_{2,გად.} = U_2 \cdot I_2^* = -j155,6 \cdot (-0,259 + j0,456) = 70,95 + j40,3$$

მგვა

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{გად.} = 64,73 + j25,99 + 70,95 + j40,3 = 135,68 + j66,29$$

მგვა

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველი ფაზა

$$S_{1,ღ} = U_{1,ღ} \cdot I_1^* = (125,69 - j12,14)(0,416 + j0,167) = 54,25 + j15,92$$

მგვა

მეორე ფაზა

$$S_{2,ღ} = U_{2,ღ} \cdot I_2^* = (-33,84 - j143,79)(-0,259 + j0,456) = 74,22 + j21,78$$

მგვა

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე

$$S_{ღ} = 54,25 + 15,92 + 74,22 + j21,78 = 128,47 + j37,7$$

მგვა

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_x \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,448^2 (8 + j32) = 1,606 + j6,423$$

მგვა

$$\Delta S_2 = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z = 0,524^2 (8 + j32) = 2,197 + j8,786$$

მგვა

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z = 0,643^2 (8 + j32) = 3,308 + j13,23$$

მგვა

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 1,606 + j6,423 + 2,197 + j8,786 + 3,309 + j13,23 = 7,111 + j28,44$$

მგვა

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (7,11/135,68) \cdot 100 = 5,24\%$$

განგარიშებამ აჩვენა, რომ მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე მოთხოვნის

$$(128,47/150)100 = 85,65\%-ს \text{ შეადგენს.}$$

ეს გამოწვეულია იმით, რომ ხაზში ძაბვის დიდი დანაკარგია. განსაკუთრებით უკუ სადენში, რაც ხაზის თავში ძაბვის მიმართ 13,62%-ს შეადგენს.

ამ სადენში ძაბვის დანაკარგების შემცირების მიზნით განვიხილეთ ამ სადენის რეაქტიული ინდუქტიური წინაღობის კომპენსაციის საკითხი. სადენში მიმდევრობით ჩავრთეთ 212,2 მკვ ტევადობის კონდენსატორი, რომლის ტევადური წინაღობა 50 ჰერცი სიხშირეზე შეადგენს $X_c=15$ ომს. შესაბამისად,

$$Z_3=8+j(32-15)=8+j17 \quad \text{ომი}$$

ამ შემთხვევაში მივიღეთ:

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{155,6 \cdot (286,29 + j128,32) + j155,6 \cdot (8 + j17)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j145,32)} = \quad \text{კა}$$

$$= 0,445 - j0,173$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-155,6 \cdot (8 + j17) - j155,6 \cdot (286,29 + j128,32)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j145,32)} = \quad \text{კა}$$

$$= -0,23 - j0,462$$

უკუ სადენში

$$I_3 = \frac{U(1-j1)}{Z + 2Z_3} = \frac{155,6 \cdot (1-j1)}{(294,29 + j145,32)} = 0,215 - j0,635 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I_1 + I_2 = 0,445 - j0,173 - 0,23 - j0,462 = 0,215 - j0,635 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,445^2 + 0,173^2} = 0,477$$

$$|I_2| = \sqrt{0,23^2 + 0,462^2} = 0,516$$

$$|I_3| = \sqrt{0,215^2 + 0,635^2} = 0,670$$

მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,4-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,3-ჯერ მეტი.

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

$$\text{პირველ სადენში } \Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,445 - j0,173) \cdot (8 + j32) = 9,1 + j12,86 \quad 33$$

$$\text{მეორე სადენში } \Delta U_2 = I_2 Z_b = (-0,23 - j0,462)(8 + j32) = 12,94 - j11,06 \quad 33$$

$$\text{უკუ სადენში } \Delta U_3 = I_3 Z_b = (0,215 - j0,635)(8 + j17) = 12,52 - j1,42 \quad 33$$

ძაბვები დატვირთვის ფაზებზე:

$$U_{1,დ} = I_1 Z_{დ} = (0,445 - j0,173) \cdot (270,29 + j79,32) = 134 - j11,46 \quad 33$$

$$U_{2,დ} = I_2 Z_{დ} = (-0,23 - j0,462) \cdot (270,29 + j79,32) = -25,52 - j143,11 \quad 33$$

მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვის მოდული:

$$|U_{1,დ}| = \sqrt{134^2 + 11,46^2} = 134,49 \quad 33$$

$$|U_{2,დ}| = \sqrt{25,52^2 + 143,11^2} = 145,4 \quad 33$$

ანუ პროცენტებში:

$$U_{1,დ}\% = (134,49/155,6) \cdot 100 = 86,4\%; \quad U_{2,დ}\% = (145,4/155,6) \cdot 100 = 93,4\%.$$

როგორც ვხედავთ, უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის თითქმის 50%-მდე კომპენსაციის შემდეგ, მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა ამაღლდა, განსაკუთრებით პირველ ფაზაზე.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,ფ} = U_1 \cdot I_1^* = 155,6 \cdot (0,445 + j0,173) = 69,27 + j26,92 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,ფ} = U_2 \cdot I_2^* = -j155,6 \cdot (-0,23 + j0,462) = 71,89 + j35,79 \quad \text{მგვა}$$

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{\Sigma} = 69,27 + j26,92 + 71,89 + j35,79 = 141,16 + j62,77$$

მგვა

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველი ფაზა

$$S_{1,\phi} = U_{1,\phi} \cdot I_1^* = (134 - j11,46)(0,445 + j0,173) = 61,5 + j18,05$$

მგვა

მეორე ფაზა

$$S_{2,\phi} = U_{2,\phi} \cdot I_2^* = (-25,52 - j143,11)(-0,23 + j0,462) = 71,97 + j21,12$$

მგვა

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{\Sigma} = 61,5 + 18,05 + 71,97 + j21,12 = 133 + j39,17$$

მგვა

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_1 \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,477^2 (8 + j32) = 1,82 + j7,28$$

მგვა

$$\Delta S_2 = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z_2 = 0,516^2 (8 + j32) = 2,13 + j8,52$$

მგვა

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z_3 = 0,67^2 (8 + j17) = 3,59 + j7,63$$

მგვა

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 1,82 + j7,28 + 2,13 + j8,52 + 3,59 + j7,63 = 7,54 + j22,93$$

მგვა

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (7,54/141,16) \cdot 100 = 5,34\%$$

როგორც ვხედავთ, მესამე სადენის რეაქტიული წინააღმდეგობის კომპენსაციამ ხაზის რეჟიმის პარამეტრები რამდენადმე გააუმჯობესდა. კერძოდ, მომხმარებლის სალტეზე ორივე ფაზური ძაბვები ერთმანეთს დაუახლოვდა და მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე გაიზარდა მოთხოვნილის

$$(133,47/150)100 = 88,98\% - \text{მდე.}$$

მესამე სადენში ძაბვის დანაკარგი შემცირდა 8,05%-მდე.

განვიხილოთ უკუ სადენის ინდუქციური წინაღობის სრული კომპენსაციის შემთხვევა. სადენში მიმდევრობით ჩავრთოთ $X_c = 32$ ომი წინაღობის მქონე კონდენსატორთა ბატარეა.

$$Z_3 = 8 + j(32-32) = 8 + j0 \quad \text{ომი}$$

ამავდროულად, გადაცემის რეჟიმის პარამეტრების კიდევ უფრო გაუმჯობესების მიზნით ხაზის თავში მუშა ძაბვა ავწიოთ 5%-ით. ამ შემთხვევაში მივიღეთ: დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{163,38 \cdot (286,29 + j111,32) + j163,38 \cdot (8 + j0)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j111,32)} = 0,50 - j0,182 \quad \text{კა}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-163,38 \cdot (8 + j0) - j163,38 \cdot (286,29 + j111,32)}{(278,29 + j111,32)(294,29 + j111,32)} = -0,203 - j0,487 \quad \text{კა}$$

უკუე სადენში

$$I_3 = \frac{U(1-j1)}{Z + 2Z_3} = \frac{163,38 \cdot (1-j1)}{(294,29 + j111,32)} = 0,302 - j0,669 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I_1 + I_2 = 0,505 - j0,182 - 0,203 - j0,487 = 0,302 - j0,669 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,505^2 + 0,182^2} = 0,537 \quad \text{კა}$$

$$|I_2| = \sqrt{0,203^2 + 0,487^2} = 0,528 \quad \text{კა}$$

$$|I_3| = \sqrt{0,302^2 + 0,669^2} = 0,734 \quad \text{კა}$$

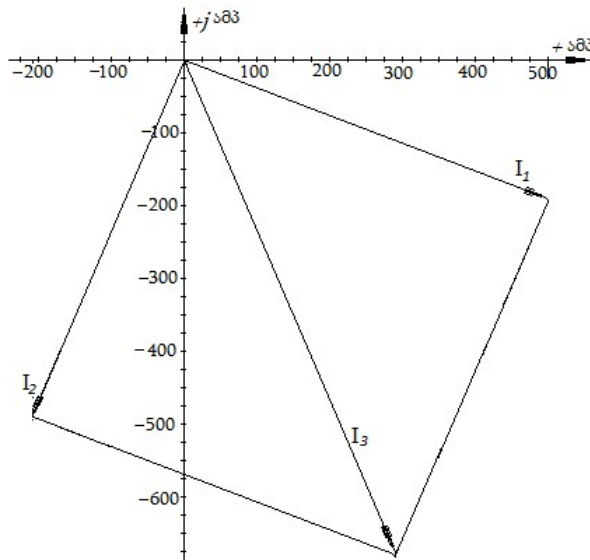
მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,37-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზასთან შედარებით 1,39-ჯერ მეტი.

პირველ და მეორე ფაზებში დენების ძვრის კუთხე შესაბამისად შეადგენს:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0,182}{0,505} = 19,8^\circ \quad \varphi_2 = \arctg \frac{0,203}{0,487} = 22,6^\circ$$

უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ ფაზებში გამავალი დენების ძვრის კუთხე შესაბამისი ძაბვების მიმართ თითქმის ერთნაირია.

ამ ბოლო შემთხვევის შესაბამისი დენების ვექტორული დიაგრამა მოცემულია ქვემოთ ნახაზზე (ნახ. 4.2.3).



ნახ.4.2.3 დენების ვექტორული დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ 220 კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს.

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

$$\text{პირველ სადენში } \Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,505 - j0,182) \cdot (8 + j32) = 9,86 + j147 \quad 33$$

$$\text{მეორე სადენში } \Delta U_2 = I_2 Z_b = (-0,203 - j0,487) \cdot (8 + j32) = 1396 - j104 \quad 33$$

$$\text{უკუ სადენში } \Delta U_3 = I_3 Z_b = (0,302 - j0,669) \cdot (8 + j0) = 2,42 - j5,35 \quad 33$$

ძაბვები დატვირთვის ფაზებზე:

$$U_{1,დ} = I_1 Z_{დ} = (0,505 - j0,182) \cdot (270,29 + j79,32) = 150,9 - j9,13 \quad 33$$

$$U_{2,დ} = I_2 Z_{დ} = (-0,203 - j0,487) \cdot (27029 + j79,32) = -23,54 - j149,87 \quad 33$$

მომხმარებლის სალტეხე მუშა ძაბვის მოდული:

$$|U_{1,დ}| = \sqrt{1509^2 + 9,13^2} = 1512 \quad 33$$

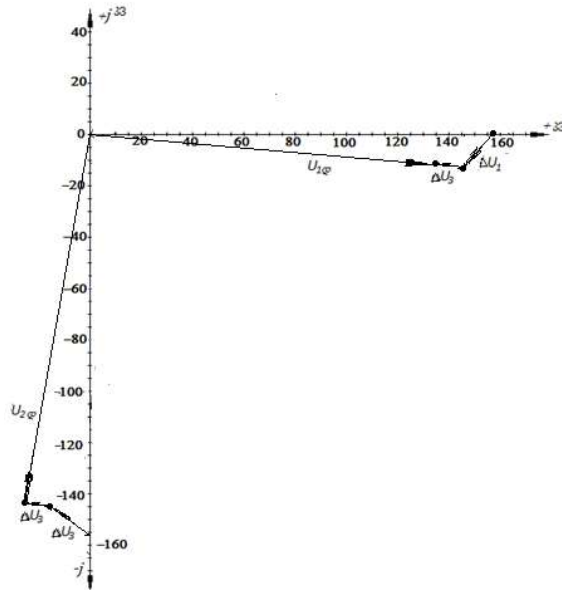
$$|U_{2,დ}| = \sqrt{23,54^2 + 149,87^2} = 151,71 \quad 33$$

ანუ პროცენტებში:

$$U_{1,დ}\% = (151,2/155,6) \cdot 100 = 97,2\%; \quad U_{2,დ}\% = (151,71/155,6) \cdot 100 = 97,5\%.$$

მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ, მომხმარებლის სალტეხე მუშა ძაბვა ამაღლდა და ორივე ფაზაზე პრაქტიკულად თანაბარი სიდიდისაა..

ძაბვების დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ.4.2.4



ნახ.4.2.4 ძაბვების დიაგრამა მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ 220კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,გაღ} = U_1 \cdot I_1^* = 163,38 \cdot (0,505 + j0,182) = 82,51 + j29,74 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,გად} = U_2 \cdot I_2^* = -j163,38 \cdot (-0,203 + j0,487) = 79,57 + j33,17 \quad \text{მგვა}$$

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{გად} = 82,51 + j29,74 + 79,57 + j33,17 = 162,08 + j62,91$$

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

მგვა

პირველი ფაზა

$$S_{1,გ} = U_{1,გ} \cdot I_1^* = (150,9 - j9,13)(0,505 + j0,182) = 77,94 + j22,87 \quad \text{მგვა}$$

მეორე ფაზა

$$S_{2,გ} = U_{2,გ} \cdot I_2^* = (-23,54 - j149,87)(-0,203 + j0,487) = 75,35 + j22,11 \quad \text{მგვა}$$

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{გ} = 77,94 + j22,87 + 75,35 + j22,11 = 153,29 + j44,98 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_1 \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,537^2 (8 + j32) = 2,31 + j9,23 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_{2,გ} = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z_2 = 0,528^2 (8 + j32) = 2,23 + j8,92 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z_3 = 0,734^2 (8 + j0) = 4,31 + j0 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 2,31 + j9,23 + 2,23 + j8,92 + 4,31 + j0 = 8,85 + j18,15 \quad \text{მგვა}$$

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (8,85/162,08) \cdot 100 = 5,46\%$$

როგორც ვხედავთ, მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შედეგად სადენში ძაბვის დანაკარგი შემცირდა 1,56%-მდე. ხაზის რეჟიმის პარამეტრები მნიშვნელოვნად გააუმჯობესდა. კერძოდ, მომხმარებლის სალტეზე ორივე ფაზური ძაბვები თითქმის ერთნაირია და მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრეკი მოთხოვნილის სიმძლავრის თანაზომადი გახდა.

მაგალითი 3. განვიხილოთ 500 კვ ძაბვის ორფაზა ელექტროგადაცემა. ორფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვა 354 კვ. მომხმარებლის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე $600+j300$ მგვა ანუ ერთი ფაზის დატვირთვა შეადგენს $300+j150$ მგვა-ს. ხაზის სიგრძე 300 კმ. ხაზზე გამოყენებულია 3xAC-300 მარკის სადენი. ხაზის ერთი ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე

$$\Delta Q_C = U_{\text{ფ}}^2 \cdot B = 354^2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 101,5 \quad \text{მგვარ}$$

ხაზის II-სებრი ჩანაცვლების თანახმად, ხაზის ფაზური დატვირთვა მის ბოლოში იქნება

$$S_{\text{ფ}} = 300 + j(150 - 101,5/2) = 300 + j99,25 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად, ხაზის ფაზური წინაღობა (დატვირთვისა და ხაზის ფაზის წინაღობების ჯამი)

$$Z = Z_b + Z_{\text{ფ}} = R + jX = U^2 \left(\frac{P + jQ}{P^2 + Q^2} \right) = 354^2 \cdot \left(\frac{300 + j99,25}{300^2 + 99,25^2} \right) =$$

$$= 376,5 + j124,56 \quad \text{ომი}$$

ხაზის ფაზური სადენის წინაღობა

$$Z_b = R_b + jX_b = (0,03 + j0,3) \cdot 300 = 9 + j90 \quad \text{ომი}$$

დატვირთვის ფაზის წინაღობა

$$Z_{\text{ფ}} = R_{\text{ფ}} + jX_{\text{ფ}} = Z - Z_b = 376,5 + j124,56 - (9 + j90) = 367,5 + j34,56 \quad \text{ომი}$$

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{354 \cdot (385,5 + j214,56) + j354 \cdot (9 + j90)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j304,56)} =$$

$$= 0,628 - j0,215 \quad \text{კა}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-354 \cdot (9 + j90) - j354 \cdot (385,5 + j214,56)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j304,56)} =$$

$$= -0,5 - j0,78 \quad \text{კა}$$

მესამე სადენში

$$I_3 = \frac{U(1-j1)}{Z+2Z_3} = \frac{354 \cdot (1-j1)}{(394,5 + j304,56)} = 0,128 - j0,996 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I_1 + I_2 = 0,628 - j0,215 - 0,5 - j0,78 = 0,128 - j0,995 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,628^2 + 0,215^2} = 0,664 \quad \text{კა}$$

$$|I_2| = \sqrt{0,5^2 + 0,78^2} = 0,926 \quad \text{კა}$$

$$|I_3| = \sqrt{0,128^2 + 0,996^2} = 1,004 \quad \text{კა}$$

მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენტან შედარებით 1,51-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზაში დენტან შედარებით 1,08-ჯერ მეტია.

პირველ და მეორე ფაზებში დენების ძვრის კუთხე შესაბამისად შეადგენს:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0,215}{0,628} = 18,9^\circ \quad \varphi_2 = \arctg \frac{0,5}{0,78} = 32,7^\circ$$

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

$$\text{პირველ სადენში} \quad \Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,628 - j0,215) \cdot (9 + j90) = 25 + j5458 \quad \text{კვ}$$

$$\text{მეორე სადენში} \quad \Delta U_2 = I_2 Z_b = (-0,5 - j0,78) \cdot (9 + j90) = 657 - j5202 \quad \text{კვ}$$

$$\text{მესამე სადენში} \quad \Delta U_3 = I_3 Z_b = (0,128 - j0,995) \cdot (9 + j90) = 9072 - j2,56 \quad \text{კვ}$$

ძაბვები დატვირთვის ფაზებზე:

$$U_{1,გ} = I_1 Z_{გ} = (0,628 - j0,215) \cdot (367,5 + j34,56) = 238,22 - j57,34 \quad \text{კვ}$$

$$U_{2,გ} = I_2 Z_{გ} = (-0,5 - j0,78) \cdot (367,5 + j34,56) = -156,79 - j303,93$$

მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვის მოდული:

$$|U_{1,გ}| = \sqrt{238,22^2 + 57,34^2} = 245,02 \quad \text{კვ}$$

$$|U_{2,დ}| = \sqrt{15679^2 + 30393^2} = 34199$$

33

ანუ პროცენტებში:

$$U_{1,დ}\% = (245,02/354) \cdot 100 = 9,22\%; \quad U_{2,დ}\% = (341,99/354) \cdot 100 = 96,61\%.$$

როგორც ვხედავთ მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა, განსაკუთრებით პირველ ფაზაზე, მნიშვნელოვნად დაბალია.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,გაღ.} = U_1 \cdot I_1^* = 354 \cdot (0,628 + j0,215) = 222,31 + j76,11 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,გაღ.} = U_2 \cdot I_2^* = -j354 \cdot (-0,5 + j0,78) = 276,12 + j177 \quad \text{მგვა}$$

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{გაღ.} = 222,31 + j76,11 + 276,12 + j177 = 498,43 + j253,11 \quad \text{მგვა}$$

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველი ფაზა

$$S_{1,ფ} = U_{1,ფ} \cdot I_1^* = (238,22 - j57,34)(0,628 + j0,215) = 161,93 + j15,21 \quad \text{მგვა}$$

მეორე ფაზა

$$S_{2,ფ} = U_{2,ფ} \cdot I_2^* = (-156,79 - j303,93)(-0,5 + j0,78) = 315,47 + j29,67 \quad \text{მგვა}$$

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე

$$S_{ფ.} = 161,93 + j15,21 + 315,47 + j29,67 = 477,4 + j44,88 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_x \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,664^2 (9 + j90) = 3,97 + j39,68$$

$$\Delta S_2 = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z = 0,926^2 (9 + j90) = 7,72 + j77,17 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z = 1,004^2 (9 + j90) = 9,07 + j90,72 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 3,97 + j39,68 + 7,72 + j77,17 + 9,07 + j90,72 = 20,76 + j207,57 \quad \text{მგვა}$$

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური

სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (20,76/498,43) \cdot 100 = 4,17\%$$

განგარიშებამ აჩვენა, რომ მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე მო-
თხოვნის

$$(477,4/600)100 = 79,57\%-ს \text{ შეადგენს.}$$

ეს გამოწვეულია იმით, რომ ხაზში ძაბვის დიდი დანაკარგია. განსაკუთრებით
მესამე სადენში, რაც ხაზის თავში ძაბვის მიმართ 25,63%-ს შეადგენს.

განვახორციელოთ მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის 50%-იანი კომპე-
ნსაცია, რისთვისაც ამ სადენში ამ სადენში მიმდევრობით ჩავრთოთ $X_c=45$ ომის
წინაღობის კონდესატორთა ბატარეა. (70,8 მკვ ტევადობის კონდესატორი).
შესაბამისად, ამ სადენის წინაღობა $Z_3 = 9 + j(90 - 45) = 9 + j45$ ომი.

ამ შემთხვევაში მივიღეთ:

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{354 \cdot (385,5 + j169,56) + j354 \cdot (9 + j45)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j214,56)} =$$

$$= 0,722 - j0,251 \quad \text{კა}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-354 \cdot (9 + j45) - j354 \cdot (385,5 + j169,56)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j214,56)} =$$

$$= -0,406 - j0,818 \quad \text{კა}$$

მესამე სადენში

$$I_3 = \frac{U(1 - j1)}{Z + 2Z_3} = \frac{354 \cdot (1 - j1)}{(394,5 + j214,56)} = 0,316 - j1,069 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I_1 + I_2 = 0,722 - j0,251 - 0,406 - j0,818 = 0,316 - j1,069 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,722^2 + 0,251^2} = 0,764 \quad \text{კა}$$

$$|I_2| = \sqrt{0,406^2 + 0,818^2} = 0,913 \quad \text{კა}$$

$$|I_3| = \sqrt{0,316^2 + 1,069^2} = 1,115 \quad \text{კა}$$

მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,46-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,22-ჯერ მეტი.

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

$$\text{პირველ სადენში } \Delta U_1 = I_1 Z_x = (0,722 - j0,251) \cdot (9 + j45) = 1,78 + j30,23 \quad \text{კვ}$$

$$\text{მეორე სადენში } \Delta U_2 = I_2 Z_x = (-0,406 - j0,818)(9 + j45) = 3,316 - j25,63 \quad \text{კვ}$$

$$\text{უკუ სადენში } \Delta U_3 = I_3 Z_x = (0,316 - j1,069)(9 + j45) = 5,095 + j4,6 \quad \text{კვ}$$

ძაბვები დატვირთვის ფაზებზე:

$$U_{1,დ} = I_1 Z_{დ} = (0,722 - j0,251) \cdot (367,5 + j34,56) = 274,01 - j67,29 \quad \text{კვ}$$

$$U_{2,დ} = I_2 Z_{დ} = (-0,406 - j0,818) \cdot (367,5 + j34,56) = -120,94 - j314,65 \quad \text{კვ}$$

მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვის მოდული:

$$|U_{1,დ}| = \sqrt{274,01^2 + 67,29^2} = 282,15 \quad \text{კვ}$$

$$|U_{2,დ}| = \sqrt{120,94^2 + 314,65^2} = 337,09 \quad \text{კვ}$$

ანუ პროცენტებში:

$$U_{1,დ}\% = (282,15/354) \cdot 100 = 79,7\%; \quad U_{2,დ}\% = (337,09/354) \cdot 100 = 95,22\%.$$

როგორც ვხედავთ, მესამე სადენის რეაქტიული წინააღობის 50%-მდე კომპენსაციის შემდეგ, მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა ამაღლდა, განსაკუთრებით პირველ ფაზაზე.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,ფ} = U_1 \cdot I_1^* = 354 \cdot (0,722 + j0,251) = 255,59 + j88,85 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,ფ} = U_2 \cdot I_2^* = -j354 \cdot (-0,406 + j0,818) = 289,57 + j143,72 \quad \text{მგვა}$$

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{\Sigma,დ} = 255,59 + j88,85 + 289,57 + j143,72 = 545,16 + j232,57 \quad \text{მგვა}$$

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველი ფაზა

$$S_{1,დ} = U_{1,დ} \cdot I_1^* = (274,01 - j67,29)(0,722 + j0,251) = 214,73 + j20,2 \quad \text{მგვა}$$

მეორე ფაზა

$$S_{2,დ} = U_{2,დ} \cdot I_2^* = (-120,94 - j314,65)(-0,406 + j0,818) = 306,48 + j28,82 \quad \text{მგვა}$$

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{\Sigma} = 214,73 + j20,2 + 306,48 + j28,82 = 521,21 + j49,02 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_1 \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,764^2 (9 + j90) = 5,25 + j52,5 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z_2 = 0,913^2 (9 + j90) = 7,5 + j75,02 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z_3 = 1,115^2 (9 + j45) = 11,19 + j55,95 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 5,25 + j52,5 + 7,5 + j75,02 + 11,19 + j55,95 = 23,94 + j183,47 \quad \text{მგვა}$$

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (23,94 / 545,16) \cdot 100 = 4,39\%$$

როგორც ვხედავთ, უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის 50%-ით კომპენსაციამ ხაზის რეჟიმის პარამეტრები რამდენადმე გააუმჯობესა. კერძოდ, მომხმარებლის სალტეზე ორივე ფაზური ძაბვები ერთმანეთს დაუახლოვდა და მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე გაიზარდა მოთხოვნილის

$$(521,21/600)100 = 86,87\% \text{-მდე.}$$

განვიხილოთ მესამე სადენის რეაქტიული ინდუქტიური წინააღობის სრული კომპენსაციის შემთხვევა. სადენში მიმდევრობით ჩავრთოთ $X_c=90$ ომი წინააღობის მქონე კონდესატორთა ბატარეა. შესაბამისად,

$$Z_3 = 9 + j(90 - 90) = 9 + j0 \quad \text{ომი}$$

ამავდროულად, გადაცემის რეჟიმის პარამეტრების კიდევ უფრო გაუმჯობესების მიზნით ხაზის თავში მუშა ძაბვა ავწიოთ 2%-ით.

ამ შემთხვევაში მივიღეთ:

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{U(Z + Z_3) + jU \cdot Z_3}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{361,08 \cdot (385,5 + j124,56) + j361,08 \cdot (9 + j0)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j124,56)} =$$

$$= 0,86 - j0,258 \quad \text{კა}$$

დენი მეორე სადენში

$$I_2 = \frac{-UZ_3 - jU \cdot (Z + Z_3)}{Z(Z + 2Z_3)} = \frac{-361,08 \cdot (9 + j0) - j361,08 \cdot (385,5 + j124,56)}{(376,5 + j124,56)(394,5 + j124,56)} =$$

$$= -0,291 - j0,837$$

მესამე სადენში

$$I_3 = \frac{U(1 - j1)}{Z + 2Z_3} = \frac{361,08 \cdot (1 - j1)}{(394,5 + j124,56)} = 0,57 - j1,095 \quad \text{კა}$$

შემოწმება:

$$I + I_2 = 0,86 - j0,258 - 0,291 - j0,837 = 0,569 - j1,095 = I_3 \quad \text{კა}$$

სადენებში გამავალი დენების მოდული:

$$|I_1| = \sqrt{0,86^2 + 0,258^2} = 0,898 \quad \text{კა}$$

$$|I_2| = \sqrt{0,291^2 + 0,837^2} = 0,886 \quad \text{კა}$$

$$|I_3| = \sqrt{0,57^2 + 1,095^2} = 1,234 \quad \text{კა}$$

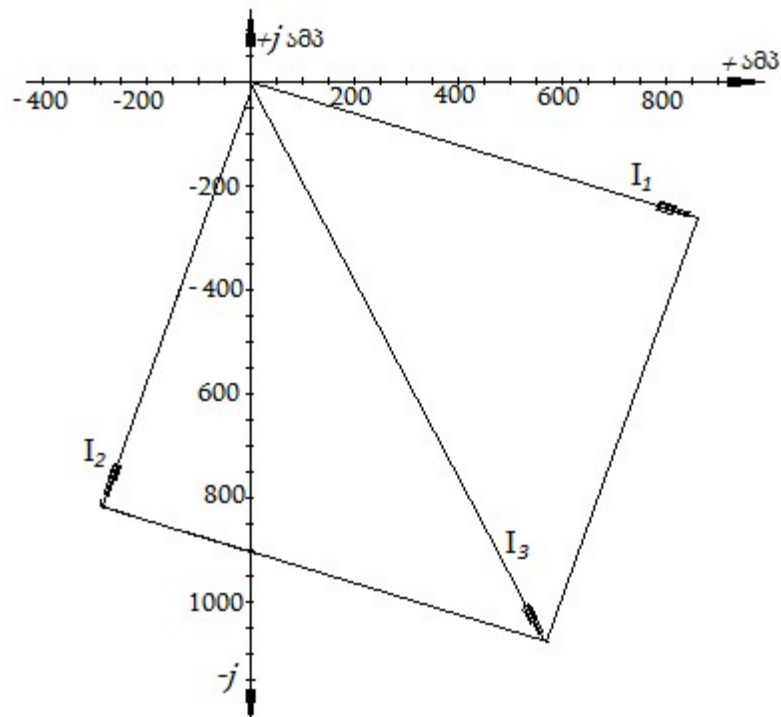
მივიღეთ, რომ უკუსადენში გამავალი დენი პირველ ფაზაში გამავალ დენთან შედარებით 1,37-ჯერ მეტია, ხოლო მეორე ფაზაში დენთან შედარებით 1,39-ჯერ მეტია.

პირველ და მეორე ფაზებში დენების ძვრის კუთხე შესაბამისად შეადგენს:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0,258}{0,86} = 16,7^\circ \quad \varphi_2 = \arctg \frac{0,291}{0,837} = 19,2^\circ$$

მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ ფაზებში გამავალი დენების ძვრის კუთხე შესაბამისი ძაბვების მიმართ თითქმის ერთნაირია.

დენების ვექტორული დიაგრამას აქვს ნახ.4.2.5- ზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.4.2.5 დენების ვექტორული დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული ინდუქციური წინაღობის სრული კომპენსაციისა და 500კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს.

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებში:

პირველ სადენში $\Delta U_1 = I_1 Z_b = (0,86 - j0,258) \cdot (9 + j90) = 3096 + j7508$ 33

უკუ სადენში $\Delta U_3 = I_3 Z_b = (0,57 - j1,095)(9 + j0) = 5,13 - j9,86$ 33

მაბვეები დატვირთვის ფაზებზე:

$U_{1,დ} = I_1 Z_{დ} = (0,86 - j0,258) \cdot (367,5 + j34,56) = 324,97 - j65,1$ 33

$U_{2,დ} = I_2 Z_{დ} = (-0,291 - j0,837) \cdot (367,5 + j34,56) = -78,01 - j317,66$ 33

მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვის მოდული:

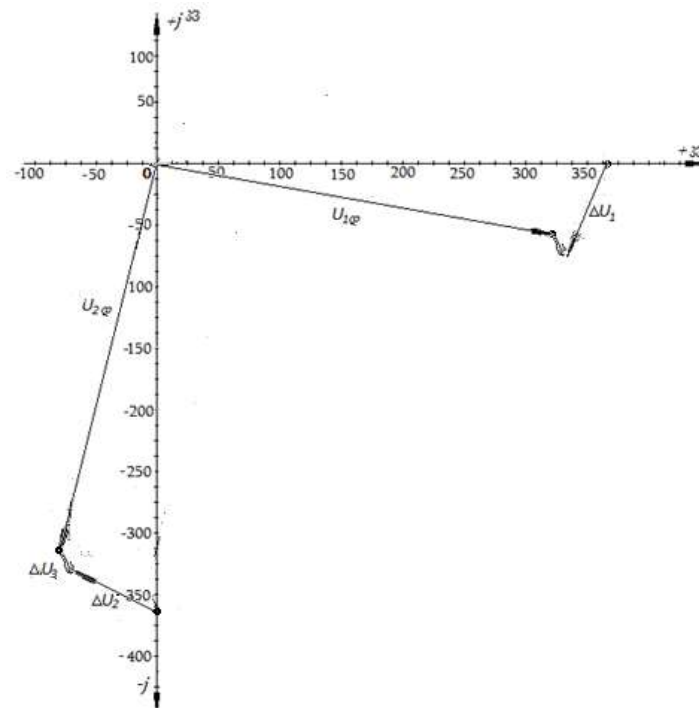
$|U_{1,დ}| = \sqrt{324,97^2 + 65,1^2} = 331,43$ 33

$|U_{2,დ}| = \sqrt{78,01^2 + 317,66^2} = 327,1$ 33

ანუ პროცენტებში:

$U_{1,დ}\% = (331,43/354) \cdot 100 = 93,62\%$; $U_{2,დ}\% = (327,1/354) \cdot 100 = 92,4\%$.

მაბვეების ვექტორული დიაგრამა ნაჩვენებია ქვემოთ ნახაზზე (ნახ.4.2.6).



ნახ.4.2.6 მაბვეების ვექტორული დიაგრამა უკუ სადენის რეაქტიული ინდუქციური წინაღობის სრული კომპენსაციისა და 500კვ-ი გადამცემი ხაზის დროს.

როგორც ვხედავთ, მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შემდეგ, მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა ამაღლდა და ორივე ფაზაზე თითქმის თანაბარი სიდიდისაა.

გადაცემული სიმძლავრე

$$S_{1,გად} = U_1 \cdot I_1^* = 361,08 \cdot (0,86 + j0,258) = 310,52 + j93,16 \quad \text{მგვა}$$

$$S_{2,გად} = U_2 \cdot I_2^* = -j361,08 \cdot (-0,291 + j0,837) = 302,22 + j105,07 \quad \text{მგვა}$$

ანუ გადაცემული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{აღ.} = 310,52 + j93,16 + 302,22 + j105,07 = 612,74 + j198,23 \quad \text{მგვა}$$

მომხმარებლის ფაზური დატვირთვა:

პირველი ფაზა

$$S_{1,ფ} = U_{1,ფ} \cdot I_1^* = (324,97 - j65,1)(0,86 + j0,258) = 296,27 + j27,85 \quad \text{მგვა}$$

მეორე ფაზა

$$S_{2,ფ} = U_{2,ფ} \cdot I_2^* = (-78,01 - j317,66)(-0,291 + j0,837) = 288,58 + j27,15 \quad \text{მგვა}$$

ანუ მომხმარებლის მიერ მიღებული ჯამური სიმძლავრე

$$S_{ფ.} = 296,27 + j27,85 + 288,58 + j27,15 = 584,85 + j55 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_1 \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = 0,898^2 (9 + j90) = 7,26 + j72,58 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_{2,f} = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z_2 = 0,886^2 (9 + j90) = 7,06 + j70,65 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z_3 = 1,234^2 (9 + j0) = 13,7 + j0 \quad \text{მგვა}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზში

$$\sum \Delta S = 7,26 + j72,58 + 7,06 + j70,65 + 13,7 + j0 = 28,02 + j143,23 \quad \text{მგვა}$$

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პროცენტებში გადაცემული ჯამური სიმძლავრის მიმართ

$$\sum \Delta P\% = (28,02 / 612,74) \cdot 100 = 4,57\%. \quad \text{მგვა}$$

როგორც ვხედავთ, მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის სრული კომპენსაციის შედეგად ამ სადენში ძაბვის დანაკარგი შემცირდა 3,87%-მდე. ხაზის რეჟიმის პარამეტრები მნიშვნელოვნად გააუმჯობესდა. კერძოდ, მომხმარებლის სალტეზე ორივე ფაზური ძაბვები თითქმის ერთნაირია და მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე კი მოთხოვნილის სიმძლავრის თანაზომადი გახდა.

ზემოთ განხილული რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშების შედეგები წარმოდგენილია ქვემოთ ცხრილის სახით (ცხრ.4.2.).

ამ ცხრილის მესამე სვეტში ნაჩვენებია რეჟიმის პარამეტრები სამფაზა ელექტროგადაცემის შემთხვევაში.

1-3 რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშების შედეგები. ცხრ.4.2

ე.გ.ხ.	რეჟიმის პარამეტრები	სამფაზა ე.გ.ხ.	ორფაზა ე.გ.ხ.		
			მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია		
			0%-ით	50%-ით	100%-ით
220 ვვ ძაბვის ე.გ.ხ.	გადასაცემი ფაზური სიმძლავრე, მგვა	150+j60	150+j60	150+j60	150+j60
	ძაბვა ხაზის თავში ხაზური/ფაზური, კვ	220/127	220/155,6	220/155,6	231/163,4
	ძაბვა ხაზის ბოლოში ხაზური/ფაზური, კვ	206/119,3	178,1/126,3 – 81% 208,3/147,7 – 94,9%	189,6/134,5 – 86,4% 205/145,4 – 93,4%	213,2/151,2 -97,2% 213,9/151,7 – 97,5%
	დატვირთვის დენები სადენებში	425 425 425	448 524 643	477 516 670	537 528 734
	გადაცემული ფაზური სიმძლავრე, მგვა	150,1+ j60,2	64,73+j15,92 70,95+j40,3	69,27+j26,92 71,89+j35,79	82,51+j29,74 79,57+j33,14
	მიღებული სიმძლავრე, მგვა	145,77+j42,6	54,25+j15,92 74,22+j21,78	61,5+j18,05 71,97+j21,12	77,35+j22,87 75,35+j22,11
	აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, მგვტ	4,32 2,88%	1,606+2,2+3,31=7,11 1 5,24%	1,82+2,13+3,52=7,54 5,34%	2,31+2,23+4,31=8,85 5,46%
	ძაბვის ვარდნა სადენებში	8,21+j11,35 5,71-j12,79 -13,92+j1,44	8,67+j11,97 12,2-j11,94 21,2+j0,04	9,1+j12,86 12,94-j11,06 12,52-j1,42	9,86+j14,7 13,96-j10,4 2,42-j5,35

500 კვ ძაბვის ე.გ.ბ.	გადასაცემი სიმძლავრე, მგვა	600+j200	600+j200	600+j200	600+j200
	ძაბვა ხაზის თავში ხაზური/ფაზური, კვ	500/289	500/354	500/354	510/361
	ძაბვა ხაზის ბოლოში ხაზური/ფაზური, კვ	468/270,5	336,1/238,3467,33% 482/341,99 – 96,61%	397,8/282,1 – 79,7% 475,3/337,1 – 95,22%	467/331,43 -93,62% 461/327,1 – 92,1%
	დატვირთვის დენები სადენებში	731,2 731,2 731,2	664 926 1004	764 913 1113	898 886 1234
	გადაცემული სიმძლავრე, მგვა	600+ j200	222,31+j76,11 276,12+j177	255,59+j188,85 289,52+j143,72	310,52+j93,16 302,22+j105,07
	მიღებული სიმძლავრე, მგვა	585,6+j56,1	161,93+j15,2 315,47+j29,67	214,73+j20,2 306,48+j28,82	296,27+j27,85 288+j27,15
	აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები,მგვტ	14,4 2,4%	3,97+7,72+9,07=20,7 6 4,17%	5,25+7,5+11,19=23,94 4,39%	7,26+7,06+13,7=28,02 4,57%
	ძაბვის ვარდნა სადენებში	46,8+j104,4 67,43-j92,92 -67,43-j11,48	25+j54,58 65,7-j52,1 90,72-j2,56	17,8+j30,23 33,16-j25,63 50,95-j4,6	30,96+j75,08 72,71-j33,72 5,13-j9,86

4.3. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით

წინა პარაგრაფში განხილული იყო 220 და 500 კვ ძაბვის ორფაზა ელექტროგადაცემების მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმები. ამ რეჟიმების მიხედვით დადგინდა, რომ ორფაზა გადაცემის მიმღებ სალტეზე მუშა ფაზური ძაბვების მნიშვნელობები პრაქტიკულად თანაბარია და გადაცემული სიმძლავრე მოთხოვნილის თანაზომადია, იმ შემთხვევაში როცა მესამე სადენის (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობა 100%-ით გაკომპენსირებულია. წინააღმდეგ შემთხვევაში, უკუსადენში ძაბვის დიდი ვარდნის გამო, სიმძლავრის მიმღების სალტეებზე ძაბვა მნიშვნელოვნად (80%-მდე და უფრო მეტად) ეცემა და მომხმარებლის მიერ მიღებული სიმძლავრე შორსაა მოთხოვნილისგან.

უკუსადენში ძაბვის ვარდნის სიდიდე, ერთი მხრივ, დამოკიდებულია ამ სადენის გრძივ პარამეტრებზე (სადენის წინაღობაზე) და, მეორე მხრივ, მასში გამავალ დენზე, რაც დატვირთვის პროპორციულია. ცხადია რომ დატვირთვის

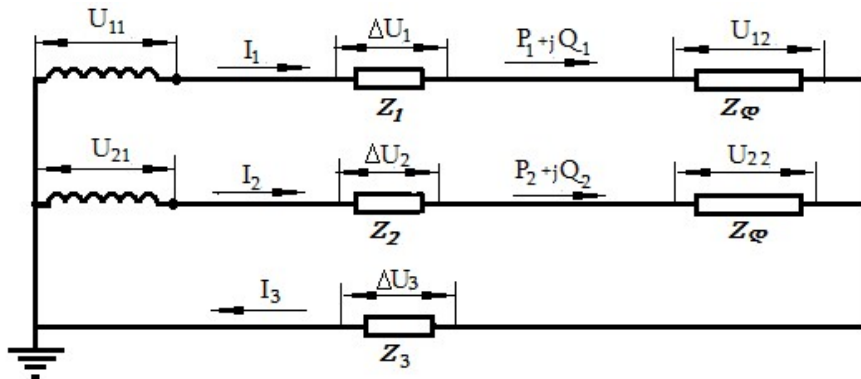
შემცირებით ანუ, როცა მომხმარებელი გადადის შემცირებული დატვირთვის რეჟიმში, მაშინ უკუსადენის რეაქტიული წინააღობის კომპენსაცია ნაკლებად აუცილებელი იქნება. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებებში მეტი სიცხადის შეტანის მიზნით შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები (ნახ. 4.3.1):

P_1, P_2, Q_1, Q_2 - მიმღების პირველი და მეორე ფაზის აქტიური და რეაქტიული ფაზური დატვირთვები;

U_{11}, U_{21} - კვების წყაროს პირველი და მეორე ფაზის ფაზური ძაბვები ანუ ძაბვები ხაზის თავში;

U_{12}, U_{22} - მიმღების პირველი და მეორე ფაზის ფაზური ძაბვები ანუ ძაბვები ხაზის ბოლოში;

$\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$ - ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი, შესაბამისად, პირველ და მეორე ფაზაში და უკუსადენში.



ნახ.4.3.1 ორფაზა ელექტროგადაცემის სქემა, დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისათვის.

შეთანხმების თანახმად პირველი და მეორე ფაზის ძაბვებია

$$U_1 = U = 155,6 \quad \text{და} \quad U_2 = -jU = -j155,6$$

ფაზაში გამავალი დენი გამოვთვალოთ ფაზური სიმძლავრითა და ფაზური ძაბვით

$$I_1 = \frac{S_1^*}{U_1^*} = \frac{P_1 - jQ_1}{U_1} \quad I_2 = \frac{S_2^*}{U_2^*} = \frac{P_2 - jQ_2}{jU}$$

ჩავთვალოთ, რომ ფაზური დატვირთვები სიდიდით ტოლია $P_1=P_2=P$, $Q_1=Q_2=Q$ და ვწერთ

$$I_1 = \frac{S_1^*}{U_1^*} = \frac{P_1 - jQ_1}{U_1^*} = \frac{P - jQ}{U} \quad I_2 = \frac{S_2^*}{U_2^*} = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2^*} = \frac{P - jQ}{jU} = \frac{-jP - Q}{U} \quad (4.3.1)$$

შესაბამისად უკუსადენში ანუ მესამე სადენში გამავალი დენი იქნება

$$I_3 = I_1 + I_2 = \frac{P - jQ}{U} + \frac{-jP - Q}{U} = \frac{P - Q}{U} - j \frac{P + Q}{U}$$

ძაბვის ვარდნა ფაზურ სადენებსა და უკუსადენში

$$\Delta U_1 = I_1 \cdot Z_1 = \frac{P - jQ}{U} \cdot (R + jX) = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U} \quad (4.3.2)$$

$$\Delta U_2 = I_2 \cdot Z_2 = \frac{-jP - Q}{U} \cdot (R + jX) = \frac{PX + QR}{U} - j \frac{PR + QX}{U} \quad (4.3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= I_3 \cdot Z_3 = \left(\frac{P - Q}{U} - j \frac{P + Q}{U} \right) \cdot (R_3 + jX_3) = \\ &= \frac{(P - Q)R_3 + (P + Q)X_3}{U} + j \frac{(P - Q)X_3 - (P + Q)R_3}{U} \end{aligned} \quad (4.3.4)$$

სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში:

$$\Delta S_1 = \Delta U_1 \cdot I_1^* = I_1 \cdot Z_1 \cdot I_1^* = |I_1|^2 \cdot Z_1 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} (R + jX) \text{ მგვა} \quad (4.3.5)$$

$$\Delta S_2 = \Delta U_2 \cdot I_2^* = |I_2|^2 \cdot Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} (R + jX) \text{ მგვა} \quad (4.3.6)$$

$$\Delta S_3 = \Delta U_3 \cdot I_3^* = |I_3|^2 \cdot Z = \frac{(P - Q)^2 + (P + Q)^2}{U^2} (R_3 + jX_3) \text{ მგვა} \quad (4.3.7)$$

(4.3.2-4.3.7) გამოსახულებების საფუძველზე შეგვიძლია განვსაზღვროთ ძაბვა ხაზის თავში (U_{11}, U_{21}) და გადასაცემი სიმძლავრე (P', Q'), როცა ცნობილია ძაბვა მომხმარებლის სალტეებზე ანუ ხაზის ბოლოში (U_{12}, U_{22}) და მომხმარებელთან მიწოდებული სიმძლავრე ანუ დატვირთვა ხაზის ბოლოში (P'', Q''), ან პირიქით, განვსაზღვროთ მომხმარებელთან მიწოდებული სიმძლავრე და ძაბვა მის სალ-

ტეებზე, როცა ცნობილია გადასაცემი სიმძლავრე და ძაბვა ხაზის თავში [22,23]:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 \quad U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 \quad (4.3.8)$$

$$P_1' = P_1'' + \Delta P_1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_3 \quad P_2' = P_2'' + \Delta P_2 + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_3 \quad (4.3.9)$$

$$Q_1' = Q_1'' + \Delta Q_1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta Q_3 \quad Q_2' = Q_2'' + \Delta Q_2 + \frac{1}{2} \cdot \Delta Q_3 \quad (4.3.10)$$

მაგალითი 4. ჩავატაროთ მაგალით 2-ში განხილული ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმების გაანგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით და მიღებული შედეგების ანალიზი, როცა მომხმარებელი ქსელიდან მოითხოვს მაქსიმალურ დატვირთვას (150+j60 მგვა), მის 80%-ს (120+j48 მგვა), 60%-ს (90+j36 მგვა), 40%-ს (60+j24 მგვა) და ა.შ. ამ შემთხვევებში ორფაზა ელექტროგადაცემის ერთი ფაზის დატვირთვა იქნება 75+j30 მგვა, 60+j24 მგვა, 45+j18 მგვა, 30+j12 მგვა და ა.შ. მომხმარებლის სალტეზე ფაზური ძაბვები დაძრულია ერთმანეთის მიმართ 90°-ით და სიდიდით ავილოთ 1,225-ჯერ მეტი, ვიდრე სამფაზა სისტემის შემთხვევაში. ე.ი.

$$U_1 = U = 155,6; \quad U_2 = -jU = -j155,6.$$

ხაზზე გამოყენებულია AC-300 მარკის სადენი და ხაზის სიგრძეა 80 კმ.

ხაზის ფაზური სადენის წინაღობა

$$Z_b = R_b + jX_b = (0,1 + j0,4) \cdot 80 = 8 + j32 \quad \text{ომი}$$

ამავე სიდიდის ტოლად ავილოთ მესამე სადენის წინაღობაც.

გამოთვლები ჩავატაროთ თითოეული რეჟიმისთვის ცალკეაღკვე:

რეჟიმი 1. ფაზური დატვირთვა-75+j30 მგვა.

(4.3.2-4.3.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{75 \cdot 8 + 30 \cdot 32}{1556} + j \frac{75 \cdot 32 - 30 \cdot 8}{1556} = 10,03 + j13,88 \quad \text{33}$$

$$\Delta U_2 = \frac{75 \cdot 32 - 30 \cdot 8}{1556} - j \frac{75 \cdot 8 + 30 \cdot 32}{1556} = 1388 - j1003 \quad \text{ჰვ}$$

$$\Delta U_3 = \frac{(75-30) \cdot 8 + (75+30) \cdot 32}{1556} + j \frac{(75-30) \cdot 32 - (75+30) \cdot 8}{1556} = 2391 + j5,4 \quad \text{ჰვ}$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{75^2 + 30^2}{155,6^2} (8 + j32) = 2,16 + j8,62 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{75^2 + 30^2}{155,6^2} (8 + j32) = 2,16 + j8,62 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(75-30)^2 + (75+30)^2}{155,6^2} (8 + j32) = 4,31 + j17,25 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 1556 + 1003 + j1388 + 2391 + j5,4 = 18954 + j1928 \quad \text{ჰვ}$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j1556 + 1388 - j1088 + 2391 + j5,4 = 3779 - j17188 \quad \text{ჰვ}$$

$$P_1' = 75 + 2,16 + \frac{1}{2} \cdot 4,31 = 79,32 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 75 + 2,16 + \frac{1}{2} \cdot 4,31 = 79,32 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 30 + 8,62 + \frac{1}{2} \cdot 17,25 = 47,25 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 30 + 8,62 + \frac{1}{2} \cdot 17,25 = 47,25$$

მგვარ

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{189,54^2 + 19,28^2} = 190,52 \quad \text{ჰვ}$$

$$|U_{21}| = \sqrt{37,79^2 + 171,88^2} = 175,991 \quad \text{ჰვ}$$

(4.3.5-4.3.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{60 \cdot 8 + 24 \cdot 32}{1556} + j \frac{60 \cdot 32 - 24 \cdot 8}{1556} = 8,02 + j1,11$$

$$\Delta U_2 = \frac{60 \cdot 32 - 24 \cdot 8}{1556} - j \frac{60 \cdot 8 + 24 \cdot 32}{1556} = 1,11 - j8,02 \quad 33$$

$$\Delta U_3 = \frac{(60-24) \cdot 8 + (60+24) \cdot 32}{1556} + j \frac{(60-24) \cdot 32 - (60+24) \cdot 8}{1556} = 19,13 + j3,08 \quad 33$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{60^2 + 24^2}{155,6^2} (8 + j32) = 1,38 + j5,52 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{60^2 + 24^2}{155,6^2} (8 + j32) = 1,38 + j5,52 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(60-24)^2 + (60+24)^2}{155,6^2} (8 + j32) = 2,76 + j11,04 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 1556 + 8,02 + j1,11 + 19,13 + j3,08 = 18275 + j1419 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j1556 + 1,11 - j8,02 + 19,13 + j3,08 = 3024 - j16054 \quad 33$$

$$P_1' = 60 + 1,38 + \frac{1}{2} \cdot 2,76 = 62,74 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 60 + 1,36 + \frac{1}{2} \cdot 2,76 = 62,74 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 24 + 5,52 + \frac{1}{2} \cdot 11,04 = 35,04 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 24 + 5,52 + \frac{1}{2} \cdot 11,04 = 35,04 \quad \text{მგვარ}$$

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{182,75^2 + 14,19^2} = 183,3 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{30,24^2 + 160,54^2} = 163,36 \quad 33$$

რეჟიმი 3. ფაზური დატვირთვა- $45+j18$

მგვა

(4.3.5-4.3.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{45 \cdot 8 + 18 \cdot 32}{155,6} + j \frac{45 \cdot 32 - 18 \cdot 8}{155,6} = 6,02 + j8,33 \quad \text{ჰჰ}$$

$$\Delta U_2 = \frac{45 \cdot 32 - 18 \cdot 32}{155,6} + j \frac{45 \cdot 8 + 18 \cdot 32}{155,6} = 8,33 - j6,02 \quad \text{ჰჰ}$$

$$\Delta U_3 = \frac{(45-18) \cdot 8 + (45+18) \cdot 32}{155,6} + j \frac{(45-18) \cdot 32 - (45+18) \cdot 8}{155,6} = 14,34 + j2,31 \quad \text{ჰჰ}$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{45^2 + 18^2}{155,6^2} (8 + j32) = 0,78 + j1,55 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{45^2 + 18^2}{155,6^2} (8 + j32) = 0,78 + j1,55 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(45-18)^2 + (45+18)^2}{155,6^2} (8 + j32) = 1,55 + j6,21 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 155,6 + 6,02 + j8,33 + 14,34 + j2,31 = 175,96 + j10,64 \quad \text{ჰჰ}$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j155,6 + 8,33 - j6,02 + 14,34 + j2,31 = 22,67 - j159,31 \quad \text{ჰჰ}$$

$$P_1' = 45 + 0,78 + \frac{1}{2} \cdot 1,55 = 46,55 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 45 + 0,78 + \frac{1}{2} \cdot 1,55 = 46,55 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 30 + 8,62 + \frac{1}{2} \cdot 17,25 = 47,25 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 30 + 8,62 + \frac{1}{2} \cdot 17,25 = 47,25 \quad \text{მგვარ}$$

მაგვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{175,96^2 + 10,64^2} = 176,28 ; |U_{21}| = \sqrt{22,67^2 + 159,31^2} = 160,91 \quad \text{ჰჰ}$$

რეჟიმი 4. ფაზური დატვირთვა- 30+j12

მგვა.

(4.3.5-4.3.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{30 \cdot 8 + 12 \cdot 32}{155,6} + j \frac{30 \cdot 32 - 12 \cdot 8}{155,6} = 4,01 + j5,56 \quad 33$$

$$\Delta U_2 = \frac{30 \cdot 32 - 12 \cdot 8}{155,6} + j \frac{30 \cdot 8 - 12 \cdot 32}{155,6} = 5,56 - j4,01 \quad 33$$

$$\Delta U_3 = \frac{(30-12) \cdot 8 + (30+12) \cdot 32}{155,6} + j \frac{(30-12) \cdot 32 - (30+12) \cdot 8}{155,6} = 9,57 + j1,54 \quad 33$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{30^2 + 12^2}{155,6^2} (8 + j32) = 0,35 + j1,38 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{30^2 + 12^2}{155,6^2} (8 + j32) = 0,35 + j1,38 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(30-12)^2 + (30+12)^2}{155,6^2} (8 + j32) = 0,7 + j2,76 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 15,56 + 4,01 + j5,56 + 9,57 + j1,54 = 169,18 + j7,1 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j15,56 + 5,56 - j4,01 + 9,57 + j1,54 = 15,13 - j15,807 \quad 33$$

$$P_1' = 30 + 0,35 + \frac{1}{2} \cdot 0,7 = 30,7 \text{ მგვტ} \quad P_2' = 30 + 0,35 + \frac{1}{2} \cdot 0,7 = 30,7 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 12 + 1,38 + \frac{1}{2} \cdot 2,76 = 14,76 \text{ მგვარ} \quad Q_2' = 12 + 1,38 + \frac{1}{2} \cdot 2,76 = 14,76 \text{ მგვარ}$$

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{169,18^2 + 7,1^2} = 169,33 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{15,13^2 + 15,807^2} = 158,79 \quad 33$$

გამოთვლების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.4.3.1)

ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები (მაგ.4). ცხრ.4.3.1

რეჟიმი	$P'' + jQ''$,მგვა	ΔP		U_{11}		U_{21}		ΔU_3	
		მგვტ	%	კვ	%	კვ	%	კვ	%
1	150+j60	8,63	5,75	190,52	122,4	175,99	113,1	23,91	15,37
2	120+j48	5,52	4,6	183,3	117,8	163,36	104,99	19,13	12,29
3	90+j36	3,1	3,44	176,28	113,3	160,91	103,41	14,34	9,22
4	60+j24	1,4	2,33	169,33	108,8	158,79	102,05	9,57	6,15

როგორც მოსალოდნელი იყო მაღალი დატვირთვების დროს ხაზის თავში ფაზური ძაბვები განსხვავდებიან ერთმანეთისგან და, ამასთან, პირველი ფაზის ძაბვა მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში მნიშვნელოვნად აღემატება (22,4%-ით) ნომინალურს. მაშინ, როცა მეორე ფაზის ძაბვა ნომინალურს აღემატება 13,1%-ით. ძაბვების ასეთი გადახრები ძირითადად გამოწვეულია მესამე სადენში (უკუსადენში) ძაბვის ვარდნის დიდი მნიშვნელობით (განხილულ მაქსიმალურ რეჟიმში 15,37%). ასეთი სახის რეჟიმის პარამეტრები მიუღებელია და ამიტომ საჭიროა გატარდეს შესაბამისი ტექნიკური ღონისძიება. კერძოდ, განვახორციელოთ მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია.

მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია განვახორციელოთ ისე, რომ ამ სადენში ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი არ აღემატებოდეს წინასწარ შერჩეულ დასაშვებ მნიშვნელობას

$$\Delta U_3 \leq \Delta U_{\text{დსხ.}}$$

ანუ (4.4) გამოსახულების მიხედვით ვწერთ

$$\Delta U_3 = \frac{(P-Q)R_3 + (P+Q)(X_3 - X_C)}{U_6} \leq \Delta U_{\text{დსხ.}} \cdot \% \cdot U_6 \cdot 10^{-2}$$

აქედან

$$X_C \geq X_3 - \frac{1}{(P+Q)} \cdot (\Delta U_{\text{დსხ.}} \% \cdot U_6^2 \cdot 10^{-2} - (P-Q) \cdot R_3) \quad (4.3.11)$$

ამ საანგარიშო გამოსახულების მიხედვით განვსაზღვროთ მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის საჭირო მნიშვნელობა ზემოთ განხილულ რეჟიმებში (მესამე სადენში ძაბვის დასაშვებ დანაკარგად ავიღოთ 3%):

რეჟიმი 1

$$X_C \geq 32 - \frac{1}{(75+30)} \cdot (3\% \cdot 155,6^2 \cdot 10^{-2} - (75-30) \cdot 8) = 32 - 3,49 = 28,51 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 2

$$X_C \geq 32 - \frac{1}{(60+24)} \cdot (3\% \cdot 155,6^2 \cdot 10^{-2} - (60-24) \cdot 8) = 32 - 5,22 = 26,78 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 3

$$X_C \geq 32 - \frac{1}{(45+18)} \cdot (3\% \cdot 155,6^2 \cdot 10^{-2} - (45-18) \cdot 8) = 32 - 8,1 = 23,9 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 4

$$X_C \geq 32 - \frac{1}{(30+12)} \cdot (3\% \cdot 155,6^2 \cdot 10^{-2} - (30-12) \cdot 8) = 32 - 13,86 = 18,14 \quad \text{ომი}$$

რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის ამ მნიშვნელობათა გათვალისწინებით ზემოთ განხილულ ოთხ რეჟიმში გამოვთვალოთ ძაბვის ვარდნა მესამე სადენში და, შესაბამისად, ძაბვა ხაზის თავში:

რეჟიმი 1. ფაზური დატვირთვა- $75+j30$ მგვა.

$$\Delta U_3 = \frac{(75-30) \cdot 8 + (75+30) \cdot (32-28,51)}{155,6} + j \frac{(75-30) \cdot (32-28,51) - (75+30) \cdot 8}{155,6} =$$

$$= 4,67 - j4,39$$

33

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 15,56 + 10,03 + j1,388 + 4,67 - j4,39 = 17,03 + j9,49 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j1556 + 1388 - j1003 + 4,67 - j4,39 = 1855 - j17002 \quad 33$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{170,3^2 + 9,49^2} = 170,6 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{18,55^2 + 170,02^2} = 171,03 \quad 33$$

რეჟიმი 2. ფაზური დატვირთვა- $60 + j24$ მგვა.

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= \frac{(60 - 24) \cdot 8 + (60 + 24) \cdot (32 - 26,78)}{155,6} + j \frac{(60 - 24) \cdot (32 - 26,78) - (60 + 24) \cdot 8}{155,6} = \\ &= 4,67 - j3,11 \end{aligned} \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 1556 + 8,02 + j111 + 4,67 - j3,11 = 16829 + j8 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j1556 + 111 - j8,02 + 4,67 - j3,11 = 1578 - j16673 \quad 33$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{168,29^2 + 8^2} = 168,5 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{15,78^2 + 166,73^2} = 167,48 \quad 33$$

რეჟიმი 3. ფაზური დატვირთვა- $45 + j18$ მგვა.

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= \frac{(45 - 18) \cdot 8 + (45 + 18) \cdot (32 - 23,9)}{155,6} + j \frac{(45 - 18) \cdot (32 - 23,9) - (45 + 18) \cdot 8}{155,6} = \\ &= 4,67 - j1,83 \end{aligned} \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 1556 + 6,02 + j8,33 + 4,67 - j1,83 = 16629 + j6,5 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j1556 + 8,33 - j6,02 + 4,67 - j1,83 = 13 - j16345 \quad 33$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{166,29^2 + 6,5^2} = 166,51 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{13^2 + 163,45^2} = 163,97 \quad 33$$

რეჟიმი 4. ფაზური დატვირთვა- 30+j12 მგვა

$$\Delta U_3 = \frac{(30-12) \cdot 8 + (30+12) \cdot (32-18,14)}{155,6} + j \frac{(30-12) \cdot (32-18,14) - (30+12) \cdot 8}{155,6} = 33$$

$$= 4,67 - j0,57$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 155,6 + 4,01 + j5,56 + 4,67 - j0,57 = 164,28 + j4,99 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j155,6 + 5,56 - j4,01 + 4,67 - j0,57 = 10,23 - j160,18 \quad 33$$

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{164,28^2 + 26,87^2} = 164,28 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{10,23^2 + 160,18^2} = 160,51 \quad 33$$

გამოთვლების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.4.3.2).

4.3.1 და 4.3.2 ცხრილის მონაცემების შედარება გვიჩვენებს, რომ უკუსადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციამ დადებითი ეფექტი მოახდინა ძაბვის რეჟიმზე ხაზის თავში.

ორფაზა გადაცემის რეჟიმის პარამეტრები კომპენსაციის შემდეგ

(მაგ.4). ცხრ.4.3.2

რეჟიმი	$P'' + jQ''$, მგვა	ΔP		U_{11}		U_{21}		ΔU_3	
		მგვტ	%	33	%	33	%	33	%
1	150+j60	8,63	5,75	170,6	109,64	171,03	109,92	4,67	3
2	120+j48	5,52	4,6	168,5	108,29	167,48	107,63	4,67	3
3	90+j36	3,1	3,44	166,4	106,94	163,97	105,38	4,67	3
4	60+j24	1,4	2,33	164,28	105,58	160,51	103,15	4,67	3

ქვემოთ ცხრილში (ცხრ.4.3.3) მოცემულია რეჟიმის პარამეტრები, როცა იმავე სიმძლავრის გადაცემა ხორციელდება სამფაზა ან ორფაზა ელექტროგადაცემით.

რეჟიმის პარამეტრების შედარებითი ცხრილი ცხრ.4.3.3

რეჟიმი	$P'' + jQ''$ მგვა	სამფაზა გადაცემა				ორფაზა გადაცემა			
		ΔP		ΔU		ΔP		ΔU	
		მგვტ	%	კვ	%	მგვტ	%	კვ	%
1	150+j60	4,32	2,88	14,8	6,4	8,63	5,75	35,87/16,63	23,05/10,68
2	120+j48	2,76	2,3	11,5	5,16	5,52	4,6	28,7/14,24	18,44/9,15
3	90+j36	1,55	1,72	8,51	3,86	3,1	3,44	21,52/11,85	13,83/7,61
4	60+j24	0,69	1,15	5,67	2,58	1,4	2,33	14,36/9,46	9,23/6,08

შენიშვნა: ძაბვის დანაკარგი (მგვტ/%) ორფაზა გადაცემისთვის მოცემულია ორი შემთხვევისათვის; უკუსადენის რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდეგ.

როგორც ამ ცხრილიდან ჩანს, სამფაზა გადაცემასთან შედარებით ორფაზა გადაცემისას რეჟიმის პარამეტრები უფრო გაუარესებულია, განსაკუთრებით ძაბვასთან მიმართებაში. ძაბვის რეჟიმი შედარებით გაუმჯობესებულია უკუსადენის რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციის შემდეგ.

მაგალითი 5. ჩავატაროთ მაგალით 3-ში განხილული 500 კვ ძაბვის ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმების გაანგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით და მიღებული შედეგების ანალიზი, როცა მომხმარებელი ქსელიდან მოითხოვს მაქსიმალურ დატვირთვას (600+j300 მგვა), მის 80%-ს (480+j240 მგვა), 60%-ს (360+j180 მგვა), 40%-ს (240+j120 მგვა) და ა.შ. ამ შემთხვევებში ორფაზა ელექტროგადაცემის ერთი ფაზის დატვირთვა იქნება 300+j150 მგვა, 240+j120 მგვა, 180+j90 მგვა, 120+j60 მგვა და ა.შ. მომხმარებლის სალტეზე ფაზური ძაბვები დამრუღია ერთმანეთის მიმართ 90°-ით და სიდიდით ავიღოთ 1,225-ჯერ მეტი, ვიდრე სამფაზა სისტემის შემთხვევაში. ე.ი.

$$U_1 = U = 354, \quad U_2 = -jU = -j354 \quad 33$$

ხაზზე გამოყენებულია 3xAC-300 მარკის სადენიდა ხაზის სიგრძეა 300 კმ.

ხაზის ერთი ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე

$$\Delta Q_C = U_{\text{ფ}}^2 \cdot B = 354^2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 101,5 \quad \text{მგვარ}$$

ხაზის ფაზური სადენის წინაღობა

$$Z_b = R_b + jX_b = (0,03 + j0,3) \cdot 300 = 9 + j90 \quad \text{ომი}$$

ამავე სიდიდის ტოლად ავიღოთ მესამე სადენის წინაღობაც. გამოთვლები ჩავატაროთ თითოეული რეჟიმისთვის ცალკეცალკე:

რეჟიმი 1. ფაზური დატვირთვა- 300+j150 მგვა. ხაზის II-სებრი ჩანაცვლების სქემისა და ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის (j101,5/2) გათვალისწინებით სიმძლავრე ხაზის ბოლოში შეადგენს 300+j99,25 მგვა-ს.

(4.5-4.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{300 \cdot 9 + 99,25 \cdot 90}{354} + j \frac{300 \cdot 90 - 99,25 \cdot 9}{354} = 32,86 + j73,75 \quad 33$$

$$\Delta U_2 = \frac{300 \cdot 99,25 - 99,25 \cdot 9}{354} - j \frac{300 \cdot 9 + 99,25 \cdot 90}{354} = 73,75 - j32,86 \quad 33$$

$$\Delta U_3 = \frac{(300 - 99,25) \cdot 9 + (300 + 99,25) \cdot 90}{354} + j \frac{(300 - 99,25) \cdot 90 - (300 + 99,25) \cdot 9}{354} = 106,61 + j40,89$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{300^2 + 99,25^2}{354^2} (9 + j90) = 7,17 + j71,71 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{300^2 + 99,25^2}{354^2} (9 + j90) = 7,17 + j71,71 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(300 - 99,25)^2 + (300 + 99,25)^2}{354^2} (9 + j90) = 14,34 + j143,42 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 32,86 + j73,75 + 106,61 + j40,89 = 493,47 + j114,64$$

33

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 7375 - j3286 + 10661 + j4089 = 18036 - j34597 \quad 33$$

$$P_1' = 300 + 7,17 + \frac{1}{2} \cdot 14,34 = 314,34 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 99,25 + 71,71 + \frac{1}{2} \cdot 143,42 = 242,67 \quad \text{მგვარ}$$

$$P_2' = 300 + 7,17 + \frac{1}{2} \cdot 14,34 = 314,34 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_2' = 99,25 + 71,71 + \frac{1}{2} \cdot 143,42 = 242,67 \quad \text{მგვტ}$$

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{493,47^2 + 114,64^2} = 506,61 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{180,36^2 + 345,97^2} = 390,16 \quad 33$$

რეჟიმი 2. ფაზური დატვირთვა- 240+j120მგვა. ხაზის II-სებრი ჩანაცვლების სქემისა და ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის (j101,5/2) გათვალისწინებით სიმძლავრე ხაზის ბოლოში შეადგენს 240+j69,25 მგვა-ს.

(4.5-4.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{240 \cdot 9 + 69,25 \cdot 90}{354} + j \frac{240 \cdot 90 - 69,25 \cdot 9}{354} = 23,71 + j59,26 \quad 33$$

$$\Delta U_2 = \frac{240 \cdot 90 - 69,25 \cdot 9}{354} - j \frac{240 \cdot 9 + 69,25 \cdot 90}{354} = 59,26 - j23,71 \quad 33$$

$$\Delta U_3 = \frac{(240 - 69,25) \cdot 9 + (240 + 69,25) \cdot 90}{354} + j \frac{(240 - 69,25) \cdot 90 - (240 + 69,25) \cdot 9}{354} = 82,96 + j35,55$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{240^2 + 69,25^2}{354^2} (9 + j90) = 4,48 + j44,81 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{240^2 + 69,25^2}{354^2} (9 + j90) = 4,48 + j44,81 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(240-69,25)^2 + (240+69,25)^2}{354^2} (9 + j90) = 8,96 + j89,62 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + (2371 + j5926) + (8296 + j3555) = 46067 + j9481$$

33

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + (5926 - j2371) + (8296 + j3555) = 14222 - j34216$$

33

$$P_1' = 240 + 4,48 + \frac{1}{2} \cdot 8,96 = 248,96 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 240 + 4,48 + \frac{1}{2} \cdot 8,96 = 248,96 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 69,25 + 44,81 + \frac{1}{2} \cdot 89,62 = 158,87 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 69,25 + 44,81 + \frac{1}{2} \cdot 89,62 = 158,87 \quad \text{მგვარ}$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{460,67^2 + 94,81^2} = 470,54 \quad \text{33}$$

$$|U_{21}| = \sqrt{142,22^2 + 342,16^2} = 370,54 \quad \text{33}$$

რეჟიმი 3. ფაზური დატვირთვა- $180 + j90$ მგვა. ხაზის II-სებრი ჩანაცვლების სქემისა და ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის ($j101,5/2$) გათვალისწინებით სიმძლავრე ხაზის ბოლოში შეადგენს $180 + j39,25$ მგვა -ს.

(4.5-4.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{180 \cdot 9 + 39,25 \cdot 90}{354} + j \frac{180 \cdot 90 - 39,25 \cdot 9}{354} = 1456 + j4476 \quad \text{33}$$

$$\Delta U_2 = \frac{180 \cdot 90 - 39,25 \cdot 9}{1556} + j \frac{180 \cdot 9 + 39,25 \cdot 90}{354} = 4476 - j1456 \quad \text{33}$$

$$\Delta U_3 = \frac{(180-39,25) \cdot 9 + (180+39,25) \cdot 90}{354} + j \frac{(180-39,25) \cdot 90 - (180+39,25) \cdot 9}{354} =$$

$$= 59,32 + j30,21 \quad \text{კვ}$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{180^2 + 39,25^2}{354^2} (9 + j90) = 2,44 + j24,38 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{180^2 + 39,25^2}{354^2} (9 + j90) = 2,44 + j24,38 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(180-39,25)^2 + (180+39,25)^2}{354^2} (9 + j90) = 4,88 + j48,76 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 1456 + j4476 + 5932 + j3021 = 42777 + j7497 \quad \text{კვ}$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 4476 - j1456 + 5932 + j3021 = 10408 - j3385 \quad \text{კვ}$$

$$P_1' = 180 + 2,44 + \frac{1}{2} \cdot 4,88 = 184,88 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 180 + 2,44 + \frac{1}{2} \cdot 4,88 = 184,55 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 39,25 + 24,38 + \frac{1}{2} \cdot 48,76 = 88,01 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 39,25 + 24,38 + \frac{1}{2} \cdot 48,76 = 88,01 \quad \text{მგვარ}$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{427,77^2 + 74,97^2} = 434,29 \quad \text{კვ}$$

$$|U_{21}| = \sqrt{104,08^2 + 338,35^2} = 354 \quad \text{კვ}$$

რეჟიმი 4. ფაზური დატვირთვა- 120+j60 მგვა. ხაზის II-სებრი ჩანაცვლების სქემისა და ფაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის (j101,5/2) გათვალისწინებით სიმძლავრე ხაზის ბოლოში შეადგენს 120+j9,25 მგვა-ს.

(4.5-4.10) გამოსახულებების თანახმად გვაქვს:

$$\Delta U_1 = \frac{120 \cdot 9 + 9,25 \cdot 90}{354} + j \frac{120 \cdot 90 - 9,25 \cdot 9}{354} = 5,4 + j30,27 \quad 33$$

$$\Delta U_2 = 90 \frac{120 \cdot 90 - 9,25 \cdot 9}{354} + j \frac{120 \cdot 9 - 9,25 \cdot 90}{354} = 30,27 - j5,4 \quad 33$$

$$\Delta U_3 = \frac{(120 - 9,25) \cdot 9 + (120 + 9,25) \cdot 90}{354} + j \frac{(120 - 9,25) \cdot 90 - (120 + 9,25) \cdot 9}{354} =$$

$$= 35,68 + j24,87$$

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + j\Delta Q_1 = \frac{120^2 + 9,25^2}{354^2} (9 + j90) = 1,04 + j10,4 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = \frac{120^2 + 9,25^2}{354^2} (9 + j90) = 1,04 + j10,4 \quad \text{მგვა}$$

$$\Delta S_3 = \Delta P_3 + j\Delta Q_3 = \frac{(120 - 9,25)^2 + (120 + 9,25)^2}{354^2} (9 + j90) = 2,08 + j20,8 \quad \text{მგვა}$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 5,4 + j30,27 + 35,68 + j24,87 = 395,08 + j55,14 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 30,27 - j5,4 + 35,68 + j24,87 = 65,95 - j33,453 \quad 33$$

$$P_1' = 120 + 1,04 + \frac{1}{2} \cdot 2,08 = 122,08 \quad \text{მგვტ}$$

$$P_2' = 120 + 1,04 + \frac{1}{2} \cdot 2,08 = 122,08 \quad \text{მგვტ}$$

$$Q_1' = 9,25 + 10,4 + \frac{1}{2} \cdot 20,8 = 30,05 \quad \text{მგვარ}$$

$$Q_2' = 9,25 + 10,4 + \frac{1}{2} \cdot 20,8 = 30,05 \quad \text{მგვარ}$$

მაბვის მოდული ხაზის თავში

$$|U_{11}| = \sqrt{395,08^2 + 55,14^2} = 398,91$$

33

$$|U_{21}| = \sqrt{65,95^2 + 334,53^2} = 340,97$$

33

გამოთვლების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.4.3.4)

ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები (მაგ.5). ცხრ.4.3.4

რეჟიმი	$P'' + jQ''$, მგვა	ΔP		U_{11}		U_{21}		ΔU_3	
		მგვტ	%	33	%	33	%	33	%
1	300+j150	28,68	4,78	506,61	143,1	390,16	110,21	106,6 1	30,12
2	240+120	17,92	2,99	470,33	132,86	370,54	104,67	82,96	23,44
3	180+j90	9,76	1,63	434,29	122,68	354,3	100,08	59,32	16,76
4	120+j60	4,16	0,69	398,91	112,69	340,97	96,32	35,68	10,08

მაღალი დატვირთვის დროს ხაზის თავში ფაზური ძაბვები განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. კერძოდ, პირველი ფაზის ძაბვა მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში მნიშვნელოვნად აღემატება ნომინალურს

$$506,61/354 \cdot 100 = 43,1\%-ით$$

მაშინ, როცა მეორე ფაზის ძაბვა ნომინალურს აღემატება

$$390,16/354 \cdot 100 = 10,21\%-ით.$$

ძაბვების ასეთი გადახრები ძირითადად გამოწვეულია მესამე სადენში (უკუსადენში) ძაბვის ვარდნის დიდი მნიშვნელობით. მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ამ სადენში ძაბვის ვარდნის გრძობი შემდგენი შეადგენს

$$106,61/354 \cdot 100 = 30,12\%-ს,$$

ფაზურ სადენებში კი $32,86/354 \cdot 100 = 9,28\%$ -ს (პირველ ფაზაში)

და $73,75/354 \cdot 100 = 20,66\%$ -ს (მეორე ფაზაში).

ასეთი სახის რეჟიმის პარამეტრები მიუღებელია და ამიტომ საჭიროა გატარდეს შესაბამისი ტექნიკური ღონისძიება. კერძოდ, განვახორციელოთ უკუსადენის

რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია. უკუ სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია განვახორციელოთ ისე, რომ ამ სადენში ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი არ აღემატებოდეს წინასწარ შერჩეულ დასაშვებ მნიშვნელობას

$$\Delta U_3 \leq \Delta U_{\text{დას.}}$$

ამ მოთხოვნის შესაბამისად და (4.11) გამოსახულების მიხედვით განვსაზღვროთ უკუსადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის საჭირო მნიშვნელობა ზემოთ განხილულ რეჟიმებში (მესამე სადენში ძაბვის დასაშვებ დანაკარგად ავიღოთ (3%):

რეჟიმი 1

$$X_C \geq 90 - \frac{1}{(300+99,25)} \cdot (3\% \cdot 354^2 \cdot 10^{-2} - (300-99,25) \cdot 9) = 90 - 4,89 = 85,11 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 2

$$X_C \geq 90 - \frac{1}{(240+69,25)} \cdot (3\% \cdot 354^2 \cdot 10^{-2} - (240-69,25) \cdot 9) = 90 - 7,19 = 82,81 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 3

$$X_C \geq 90 - \frac{1}{(180+39,25)} \cdot (3\% \cdot 354^2 \cdot 10^{-2} - (180-39,25) \cdot 9) = 90 - 11,37 = 78,63 \quad \text{ომი}$$

რეჟიმი 4

$$X_C \geq 90 - \frac{1}{(120+9,25)} \cdot (3\% \cdot 354^2 \cdot 10^{-2} - (120-9,25) \cdot 9) = 90 - 21,38 = 68,62 \quad \text{ომი}$$

როგორც ვხედავთ, 500 კვ ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის მინიმალური დატვირთვის რეჟიმშიც კი მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის სიდიდე 76%-ს შეადგენს. მაშინ, როცა ასეთ რეჟიმში 220 კვ ძაბვის ხაზი-

სთვის კომპენსაციის მოთხოვნილი დონე აღწევს 57%-ს. მაშასადამე, რაც მაღალია ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვა, მით მეტი ხარისხით უნდა განხორციელდეს მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია, რათა ხაზის რეჟიმის პარამეტრები დასაშვების ფარგლებში იყოს.

კომპენსაციის მიღებულ მნიშვნელობათა გათვალისწინებით გამოვთვალოთ ძაბვის ვარდნა მესამე სადენში და, შესაბამისად, ძაბვა ხაზის თავში ზემოთ განხილულ ოთხ რეჟიმში:

რეჟიმი 1.

$$\Delta U_3 = \frac{(300 - 99,25) \cdot 9 + (300 + 99,25) \cdot (90 - 85,11)}{354} + j \frac{(300 - 99,25) \cdot (90 - 85,11) - (300 + 99,25) \cdot 9}{354} = 10,62 - j7,38 \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 32,86 + j73,75 + 10,62 - j7,38 = 397,48 + j66,37 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 73,75 - j32,86 + 10,62 - j7,38 = 84,37 - j394,24 \quad 33$$

ძაბვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{397,48^2 + 66,37^2} = 402,98 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{84,37^2 + 394,24^2} = 403,17 \quad 33$$

რეჟიმი 2.

$$\Delta U_3 = \frac{(240 - 69,25) \cdot 9 + (240 + 69,25) \cdot (90 - 82,81)}{354} + j \frac{(240 - 69,25) \cdot (90 - 82,81) - (240 + 69,25) \cdot 9}{354} = 10,62 - j4,39 \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + (2371 + j5926) + (1062 - j439) = 3883 + j5487 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + (5926 - j2371) + (1062 - j439) = 6988 - j38221 \quad 33$$

მაზვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{388,33^2 + 54,87^2} = 392,15 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{69,88^2 + 382,21^2} = 388,85 \quad 33$$

რეჟიმი 3.

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= \frac{(180 - 39,25) \cdot 9 + (180 + 39,25) \cdot (90 - 78,63)}{354} + \\ &+ j \frac{(180 - 39,25) \cdot (90 - 78,63) - (180 + 39,25) \cdot 9}{354} = 10,62 - j1,05 \end{aligned} \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 1456 + j4476 + 1062 - j1,05 = 37918 + j4371 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 4476 - j1456 + 1062 - j1,05 = 5538 - j36961 \quad 33$$

მაზვის მოდული ხაზის თავში:

$$|U_{11}| = \sqrt{379,18^2 + 43,71^2} = 381,69 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{55,38^2 + 369,61^2} = 373,74 \quad 33$$

რეჟიმი 4.

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= \frac{(120 - 9,25) \cdot 9 + (120 + 9,25) \cdot (90 - 68,62)}{354} + \\ &+ j \frac{(120 - 9,25) \cdot (90 - 68,62) - (120 + 9,25) \cdot 9}{354} = 10,62 - j3,4 \end{aligned} \quad 33$$

შესაბამისად:

$$U_{11} = U_{12} + \Delta U_1 + \Delta U_3 = 354 + 5,4 + j30,27 + 10,62 - j3,4 = 370,02 + j26,87 \quad 33$$

$$U_{21} = U_{22} + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -j354 + 30,27 - j5,4 + 10,62 - j3,4 = 40,89 - j36,28 \quad 33$$

$$|U_{11}| = \sqrt{370,02^2 + 26,87^2} = 370,06 \quad 33$$

$$|U_{21}| = \sqrt{40,89^2 + 36,28^2} = 365,1 \quad 33$$

გამოთვლების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (ცხრ.4.3.5)

ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები კომპენსაციის შემდეგ

(მაგ.5). ცხრ.4.3.5

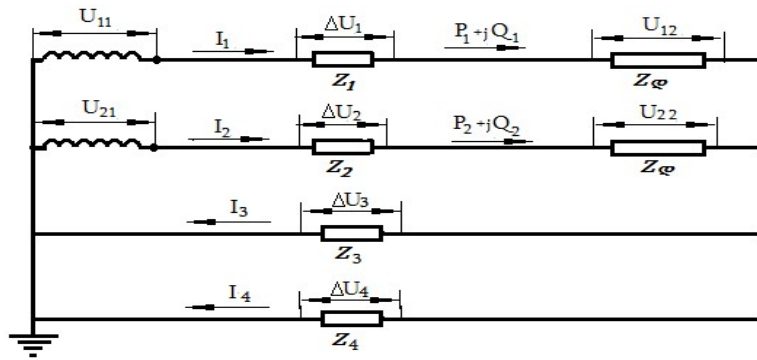
რეჟიმი	$P'' + jQ''$, მგვა	ΔP		U_{11}		U_{21}		ΔU_3	
		მგვტ	%	კვ	%	კვ	%	კვ	%
1	300+j150	28,68	4,78	402,9 8	113,84	403,1 7	113,89	10,62	3
2	240+j120	17,92	2,99	392,1 5	110,78	388,8 5	109,84	10,62	3
3	180+j90	9,76	1,63	381,6 9	107,82	373,7 9	105,59	10,62	3
4	120+j60	4,16	0,69	370,0 6	104,54	365,1	103,14	10,62	3

4.4. ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები

სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის ანალიზმა აჩვენა, რომ ხაზის უკუ სადენში გაედინება $\sqrt{2}$ მეტი დენი, ვიდრე ფაზურ სადენებში. ამის გამო ამ სადენში ადგილი აქვს დიდი სიდიდის ძაბვის ვარდნას, რაც უარყოფით გავლენას ახდენს ძაბვის რეჟიმზე. ეს გავლენა უფრო მაღალი ხარისხით ვლინ-

დება ხაზის მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმებში და, ძაბვის რეჟიმიდან გამომდინარე იძულებით გვიწევს გადასაცემი სიმძლავრის შემცირება ანუ მცირდება ხაზის გამტარუნარიანობა. ხაზის გამტარუნარიანობის ამალღების მიზნით აუცილებელი ხდება მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია.

იმ შემთხვევაში, თუ გამოვიყენებთ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემას, რომლის მესამე და მეოთხე სადენი ერთდროულად იქნება უკუსადენი (ნახ.4.4.1), მაშინ თითოეულ ამ სადენში გაივლის ორჯერ უფრო ნაკლები დენი, ვიდრე სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის მესამე სადენში. აქედან გამომდინარე, ორჯერ შემცირდება ძაბვის ვარდნა და შესაძლებელი იქნება რამდენადმე ავამაღლოთ გადასაცემი სიმძლავრე ანუ გავზარდოთ ხაზის გამტარუნარიანობა.



ნახ.4.4.1. ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის სქემა.

გამოთვლებმა აჩვენა, რომ თუ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზურ ძაბვას ავიღებთ სიდიდით სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზური ძაბვის ტოლად და ამავე დროს, ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის სადენების განიკვეთს გავზრდით 1,225-ჯერ, რაც ფაზურ სადენებში დენის ამდენჯერვე გაზრდის საშუალებას გვაძლევს (ამ დროს უკუსადენების განიკვეთი შეიძლება ავიღოთ სიდიდით $(\sqrt{2}/2) \cdot 1,225 \cdot F_{(3)} = 0,87 \cdot F_{(3)}$ - ის ტოლად), მაშინ ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობა იგივე იქნება, რაც სამფაზა ელექტროგადაცემისა, თუმცა ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგა-

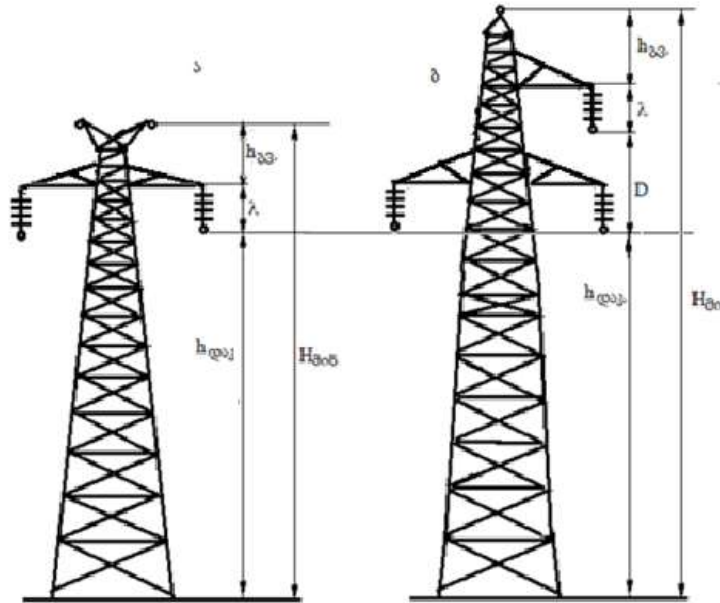
დაცემის ხაზზე ადგილი ექნება ფერადი ლითონის ხარჯის ზრდას თითქმის 39%-ით, ხოლო სიმძლავრის დანაკარგები კი იზრდება 1,58-ჯერ:

$$S_{(2)} = 2 \cdot (1,225 \cdot U_{\text{ფ}(3)} \cdot 1,225 \cdot I_{\text{ფ}(3)}) = 3 \cdot S_{\text{ფ}(3)} = S_{(3)};$$

$$V_{(2)} = 2 \cdot (1,225 \cdot F_{(3)}) + 2 \cdot (\sqrt{2}/2) \cdot 1,225 \cdot F_{(3)} = 4,17 \cdot F_{(3)} = 1,39 \cdot (3 \cdot F_{(3)}) = 1,39 \cdot V_{(3)};$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{(2)} &= 2 \cdot (1,225 \cdot I_{(3)})^2 \cdot \frac{R_{(3)}}{1,225} + 2 \cdot (0,87 \cdot I_{(3)})^2 \cdot (1,15 \cdot R_{(3)}) = \\ &= 4,74 \cdot I_{(3)}^2 \cdot R_{(3)} \approx 1,58(3 \cdot I_{(3)}^2 \cdot R_{(3)}) = 1,58 \cdot \Delta P_{(3)} \end{aligned}$$

ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი, რომელზედაც უკუსადენები განთავსებულია მეხდამცავი გვარლების პოზოციაში (ნახ. 4.10, ა), უფრო ნაკლები სიმაღლისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი (ნახ. 4.4.2, ბ).



ნახ.4.4.2. ა–ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი.
ბ–სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი

ამ ნახაზების შესაბამისად, საყრდენების მინიმალური სიმაღლე:

$$H_{(2)} = h_{\text{დაკ}} + f + \lambda + h_{\text{გგ}} \quad \text{და} \quad H_{(3)} = h_{\text{დაკ}} + D + f + \lambda + h_{\text{გგ}}$$

სადაც $h_{\text{დაკ}}$ –სადენის დაკიდების სიმაღლე მიწამდე;

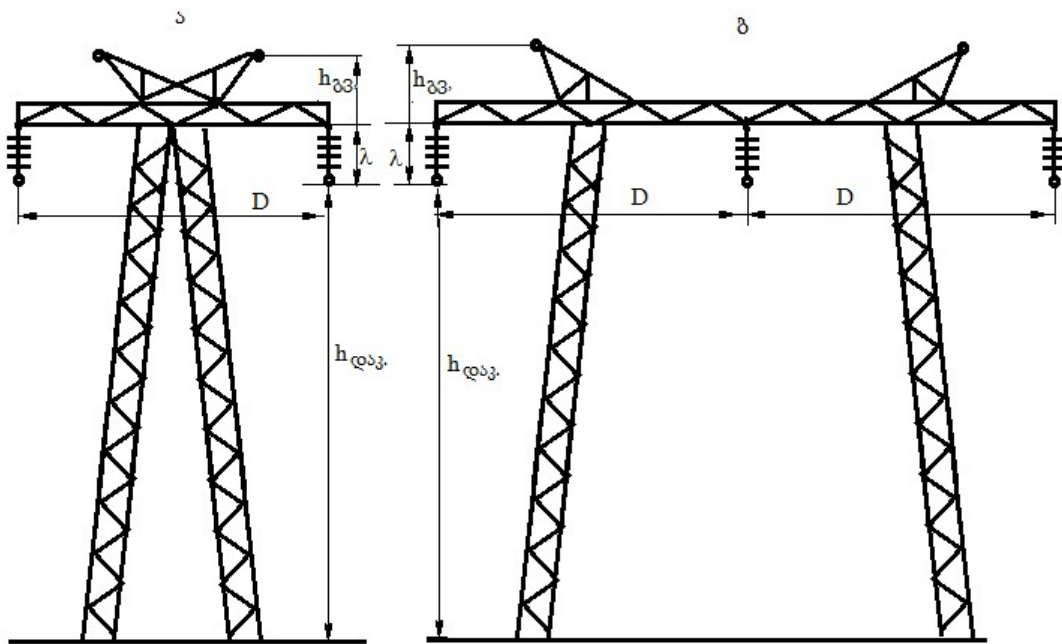
f - სადენის ჩალუნვის სიმაღლე;

$h_{გვ}$ - მეხდამცავი გვარლის დაკიდების სიმაღლე გირლიანდამდე;

λ - გირლიანდის სიმაღლე;

D - ფაზათაშორისი მანძილი;

როგორც ვხედავთ საყრდენთა სიმაღლეში სხვაობა ფაზათაშორისი მანძილის ტოლია ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენის სასარგებლოდ. ფაზური სადენების ჰორიზონტალურად განლაგების შემთხვევაში ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი (ნახ.4.4.3,ა) თითქმის ორჯერ უფრო ნაკლები განისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი (ნახ.4.4.3,ბ)



ახ.4.4.3 ფაზური სადენების ჰორიზონტალური განლაგება.

ეს დადებითი ეფექტი მკვეთრ გამოხატულებას იჩენს ზემოდალი ძაბვის (330, 500 კვ) ხაზებზე, სადაც სადენები საყრდენებზე როგორც წესი ჰორიზონტალურად არიან განთავსებული. გარდა ამისა, ამ ძაბვის სამფაზა ელექტროგა-



ნახ.4.4.4 კუთხურ-ანკერული საყრდენი, მთიანი რელიეფის პირობებში.

დაცემის ხაზებზე სამი ცალი კუთხურ-ანკერული საყრდენის (ნახ.4.4.4) ნაცვლად, შეიძლება გამოვიყენოთ ერთი ცალი ოთხსაღენიანი ორფაზა საყრდენი. ეს, ერთი მხრივ, იწვევს საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯის შემცირებას და, მეორე მხრივ, მცირდება ხაზის მშენებლობის, მონტაჟისა და ექსპლუატაციის ხარჯები. გარდა ამისა, ხაზის ტრასის განის შემცირება უფრო ამარტივებს ხაზის ტრასის შერჩევის ამოცანას მთიანი რელიეფის პირობებში.

დასკვნა მე-4 თავის მიმართ

ამ თავში ჩატარებული კვლევისა და განხილული რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშების შედეგების საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა:

1. ზედღების მეთოდის გამოყენებით მიღებულია ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები დატვირთვის დენისა და დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით;
2. ორფაზა გადაცემისას რეჟიმის პარამეტრები უფრო გაუარესებულია, განსაკუთრებით ძაბვასთან მიმართებაში; ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემებიდან, როცა გადასაცემი სიმძლავრე ერთი და იგივეა, ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზში ძაბვის ვარდნილობა ($U_{თავი}/U_{ბოლო}$) 22,5%-ით მეტია, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზში;
3. დადგენილია, რომ ორფაზა ელექტროგადაცემისას ძაბვის ხარისხის გაუმჯობესება უფრო ეფექტურია მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის გზით;
4. მიღებულია ორფაზა ელექტროგადაცემის მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის საანგარიშო გამოსახულება ამ სადენში ძაბვის დანაკარგის შეზღუდვის პირობით;
5. ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები შედარებით გაუმჯობესებულია უკუსადენის რეაქტიული წინაღობის 50–100%-იანი კომპენსაციის შემდეგ;
6. რაც მაღალია ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვა, მით მეტი ხარისხით უნდა განხორციელდეს მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია, რათა ხაზის რეჟიმის პარამეტრები დასაშვების ფარგლებში იყოს.
7. ხაზის რეჟიმის დასაშვები მნიშვნელობიდან გამომდინარე ორფაზა ელექტროგადაცემა უფრო დაბალი გამტარუნარიანობით ხასიათდება;
8. თუ გამოვიყენებთ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემას, რომლის მესამე და მეოთხე სადენი ერთდროულად იქნება უკუსადენი, მაშინ თითოეულ ამ სადენში გაივლის ორჯერ უფრო ნაკლები დენი, ვიდრე სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის მესამე სადენში. აქედან გამომდინარე, ორჯერ შემცირდება

ძაბვის ვარდნა და შესაძლებელი იქნება რამდენადმე ავამაღლოთ გადასაცემი სიმძლავრე ანუ გავზარდოთ ხაზის გამტარუნარიანობა.

9.გამოთვლებმა აჩვენა, რომ თუ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის ფაზურ ძაბვას ავიღებთ 1,225-ჯერ მეტს, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის ფაზურ ძაბვას და, ამავე დროს, სადენების განიკვეთს გავზრდით ასევე 1,225-ჯერ, რაც ფაზურ სადენებში დენის ამდენჯერვე გაზრდის საშუალებას გვაძლევს ამ დროს უკუსადენების განიკვეთი სიდიდით შეიძლება ავიღოთ $\sqrt{2}/2) \cdot 1,225 \cdot F_{(3)} = 0,866F_{(3)}$ ტოლად, მაშინ ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობა იგივე იქნება, რაც სამფაზა ელექტროგადაცემისა, თუმცა ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზზე ადგილი აქვს ფერადი ლითონის ხარჯის ზრდას თითქმის 39%-ით, ხოლო სიმძლავრის დანაკარგები იზრდება 1,58-ჯერ;

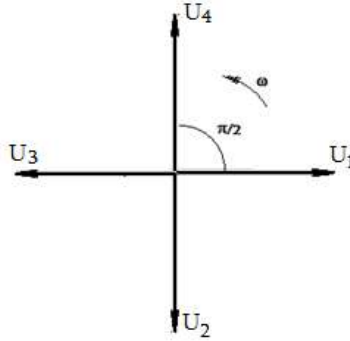
10.ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი, რომელზედაც უკუსადენები განთავსებულია მეხდამცავი გვარლების პოზოციაში, უფრო ნაკლები სიმაღლისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი. საყრდენთა სიმაღლეში სხვაობა ფაზათაშორისი მანძილის ტოლია.

11.სადენების ჰორიზონტალური განლაგების შემთხვევაში ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი თითქმის ორჯერ უფრო ნაკლები განისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი. გარდა ამისა, სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზებზე სამი ცალი კუთხურ-ანკერული საყრდენის ნაცვლად, შეიძლება გამოვიყენოთ ორი ცალი ოთხსადენიანი ორფაზა საყრდენი. ეს, ერთი მხრივ, იწვევს საყრდენების დამზადებისთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯის შემცირებას და, მეორე მხრივ, მცირდება ხაზის მშენებლობის, მონტაჟისა და ექსპლუატაციის ხარჯები. გარდა ამისა, ხაზის ტრასის განის შემცირება უფრო ამარტივებს ხაზის ტრასის შერჩევის ამოცანას მთიანი რელიეფის პირობებში.

თავი 5. ელექტროგადაცემის ოთხფაზა სისტემა

5.1. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის განხორციელების პრინციპები

ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური ძაბვები ერთმანეთის მიმართ დამრული არიან პერიოდის მეოთხედით ანუ 90° -ით (ნახ.5.1.1).



ნახ.5.1.1 ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ფაზური ძაბვების ვექტორული დიაგრამა.

თუ მივიღებთ, რომ პირველი ფაზის ძაბვა u_1 იცვლება სინუსოიდის კანონით

$$u_1 = U_{\text{მ.ქს}} \sin \omega t$$

მაშინ ფაზაში გამავალი დენი

$$i_1 = I_{\text{მ.ქს}} \sin(\omega t - \varphi).$$

შესაბამისად, მეორე ფაზის ძაბვა და დენი იქნება

$$u_2 = U_{\text{მ.ქს}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad i_2 = I_{\text{მ.ქს}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right)$$

მესამე ფაზის ძაბვა და დენი იქნება

$$u_3 = U_{\text{მ.ქს}} \sin(\omega t - \pi) = -U_{\text{მ.ქს}} \sin \omega t = -u_1$$

$$i_3 = I_{\text{მ.ქს}} \sin(\omega t - \pi - \varphi) = -I_{\text{მაგს.}} \sin(\omega t - \varphi) = -i_1$$

მეოთხე ფაზის ძაბვა და დენი იქნება

$$u_4 = U_{\text{მ.ქს}} \sin\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi\right) = -U_{\text{მ.ქს}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -u_2$$

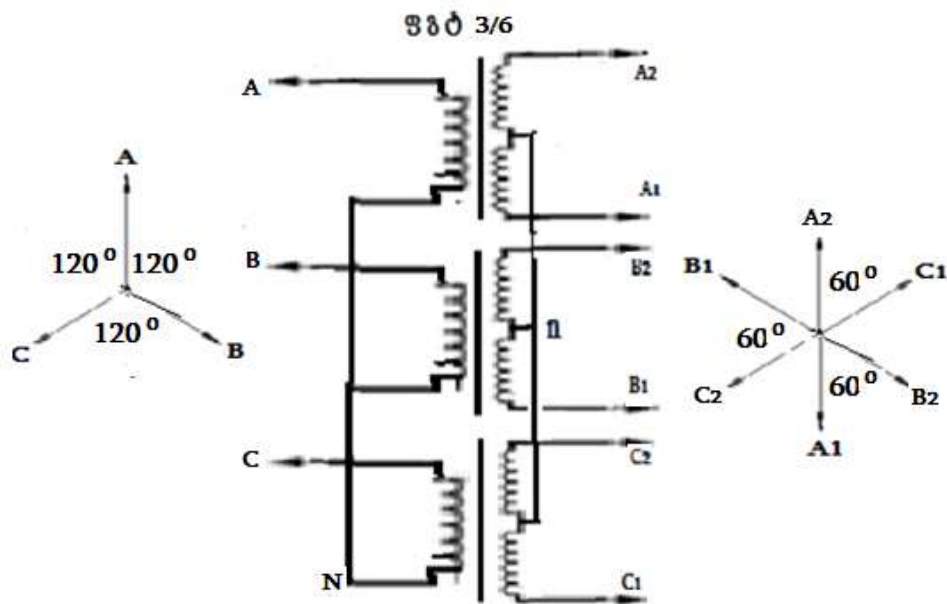
$$i_4 = I_{\text{მ.ქს}} \sin\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi\right) = -I_{\text{მაგს.}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) = -i_2$$

საჰაერო ხაზების გამტარუნარიანობის ამაღლების გაუმჯობესების მიმართულებით რამოდენიმე ათეული წელია კვლევას აწარმოებენ მრავალი ქვეყნის ენერგეტიკოსები. მათ შორის გამოირჩევა ა.შ.შ-სა და რუსეთის მეცნიერები. ამ მიმართულებით ბოლო ხანებში გამოიკვეთა ორი მიმართულება:

1.ა.შ.შ-ში ექვსფაზა ელექტროგადაცემაზე მუშაობენ (<https://www.slideshare.net/naibedyal/six-phase-transmission>). Seminar Report of Six Phase Transmission System. Published on Jan 31, 2015.[24].

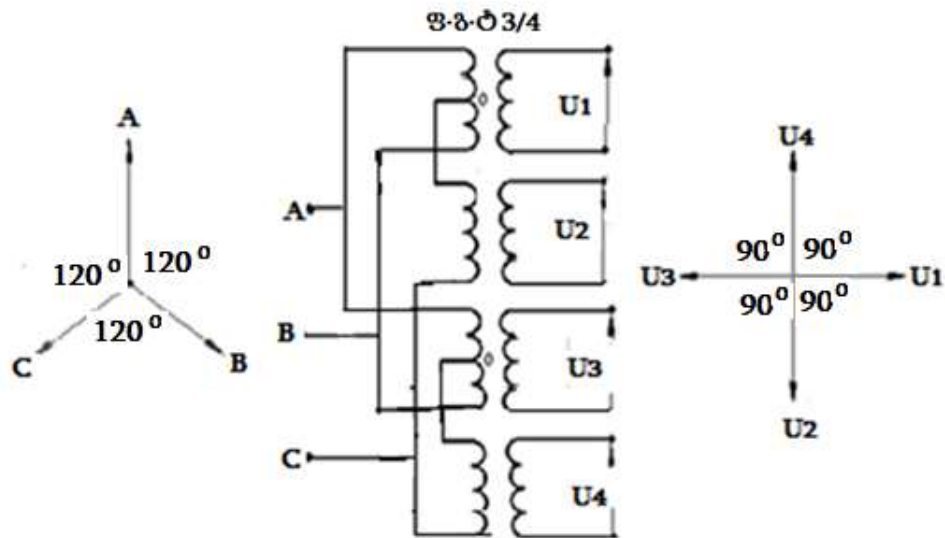
2.რუსეთის ფ.რ-ში კი ოთხფაზა ელექტროგადაცემაზე.(Красильникова Т. Г. Автореферат Диссертаций. «Разработка четырехфазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния». «Новосибирский государственный технический университет»), 2013.

მათ მიერ ექვსფაზა და ოთხფაზა სისტემის მიღების ხერხებს გააჩნია როგორც დადებითი ისე უარყოფითი მხარეები. ექვსფაზა დენის მიღება მარტივად არის გადაწყვეტილი, ელექტროტექნიკაში ცნობილი ხერხით (ნახ.5.1.2), იგი სამი ცალი ტრანსფორმატორის გამოყენებით ხორციელდება.



ნახ.5.1.2 სამფაზა-ექვსფაზა ფაზაგადამრთველი ტრანსფორმატორი(ფ.გ.ტ.3/6)

ოთხფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის სისტემის დაკავშირება შესაძლებელია სკოტის ორი ორფაზა-სამფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის საშუალებით ნახ. 5.1.2.ა [25]. ნოვოსიბირსკის ტექნიკური უნივერსიტეტის მეცნიერები მუშაობენ ოთხფაზა ელექტროგადაცემის საკითხებზე, ზემალაღი და ულტრამალაღი ძაბვის გადამცემ ხაზებზე, მათი ახლო მომავალში დანერგვის გამოყენების მიზნით, ვინაიდან მათი აზრითაც ასეთი გადაცემა ხასიათდება მეტი ეკოლოგიურობით, ეკონომიურობით, ნაკლები თვითღირებულებით და რაც მთავარია მეტი საიმედოობით. ისინი ოთხფაზა ელექტროდენის მიღებას ახორციელებენ სამფაზა გენერაციიდან და ცნობილი ამერიკელი მეცნიერის ჩ. სკოტის ორი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გამოყენებით.

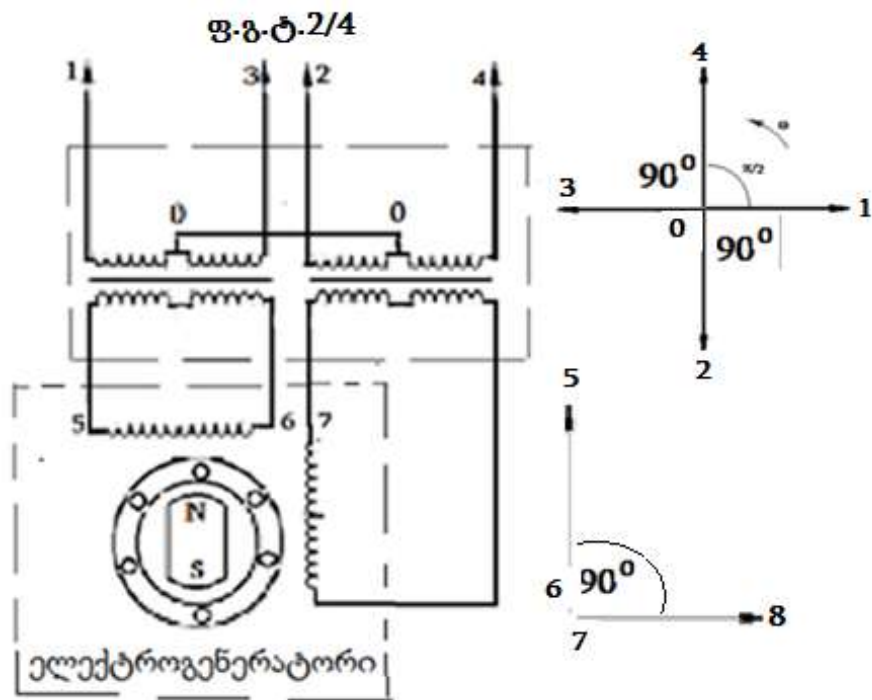


ნახ.5.1.2.ა სამფაზა გენერაციით დაკავშირება ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემასთან, სკოტის ორფაზა-სამფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის (ფ.გ.ტ3/4) მეშვეობით

ამ სისტემაში ცვლადი დენის ენერჯის გადაცემა ხორციელდება ოთხსადენი-ანი ელექტროგადაცემის ხაზით (ოთხი ფაზით) და მიმღებ ბოლოში სკოტის ორი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის საშუალებით ოთხფაზა სისტემა გადავა ისევ სამფაზა სისტემაზე.

ჩვენ მათგან განსხვავებით, თეორიულად დავამუშავეთ ორფაზა/ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპიალური ელექტრული სქემა, რომელიც საშვალეხას გვაძლევს ორფაზა დენის გენერაციით მივიღოთ ოთხფაზა ელექტროდენი ერთი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით. იგი გამოირჩევა სიმარტივით და ნაკლები თვითღირებულებით.

აღნიშნული ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის განხორციელების პრინციპიალური ელექტრული სქემა ნაჩვენებია ქვემოთ ნახ.5.1.2.ბ



ნახ.5.1.2.ბ ორფაზა გენერაციით დაკავშირება ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სისტემასთან, ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის (ფ.გ.ტ2/4) მეშვეობით.

როგორც ნახაზიდან ჩანს 90° -იანი კუთხით წანაცვლებული ორფაზა დენის გენერაციის მეშვეობით მიღებული ძაბვა მიეწოდება ორფაზა-ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელ ტრანსფორმატორს. რომლის მეორეული გრაგნილების შუა წერტილები ერთმანეთთან არის შეერთებული. მეორეული გრაგნილების თავისუფალ გამოძევან წვეროებზე კი ვლელულობთ სიმეტრიულ ოთხფაზა ძაბვას. ორ-

ფაზა დენის გენერაციას, სამფაზა დენის გენერაციისაგან განსხვავებით ის უპირატესობა გააჩნია, რომ არასიმეტრიული დატვირთვების შემთხვევაში მასში ნულოვანი მიმდევრობის მდგენელები არ გვექნება, ვინაიდან ორფაზა ელექტროსისტემა სამფაზა ელექტროსისტემისაგან განსხვავებით ნულოვანი მიმდევრობის მდგენელებს საერთოდ არ შეიცავს, რაც მის გამოყენებას უფრო საინტერესოს ხდის. ორფაზა სისტემა რეალურად ოთხფაზა სისტემის ნახევარს შეადგენს.[26]

ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის სიმეტრიული დატვირთვის შედეგად მეორად გრაგნილებზე შესაბამისად მივიღებთ ძაბვებსა და დენებს

$$\begin{aligned} U_1 &= U_1 \cdot \sin \omega t; & I_1 &= I_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ U_2 &= U_2 \cdot \sin(\omega t - 90); & I_2 &= I_2 \cdot \sin(\omega t - 90 - \varphi) \\ U_3 &= U_3 \cdot \sin(\omega t - 180); & I_3 &= I_3 \cdot \sin(\omega t - 180 - \varphi) \\ U_4 &= U_4 \cdot \sin(\omega t + 90); & I_4 &= I_4 \cdot \sin(\omega t + 90 - \varphi) \end{aligned}$$

შესაბამისად თითოეული გრაგნილის მიერ განვითარებული მყისი სიმძლავრე:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \omega t \cdot \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi) = 2 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot [\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)] = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot$$

$$\cdot [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \omega t - \varphi)] = U_1 \cdot I_1 \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)];$$

$$P_2 = U_2 I_2 = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin(\omega t - 90) \cdot \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sin(\omega t - 90 - \varphi) = 2 \cdot \frac{1}{2} U_2 \cdot I_2 [\cos(\omega t - 90 - \omega t$$

$$+ 90 + \varphi) - \cos(\omega t - 90 + \omega t - 90 - \varphi)] = U_2 \cdot I_2 \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)];$$

$$P_3 = U_3 \cdot I_3 = \sqrt{2} \cdot U_3 \cdot \sin(\omega t - 180) \cdot \sqrt{2} \cdot I_3 \cdot \sin(\omega t - 180 - \varphi) = 2 \cdot \frac{1}{2} U_3 \cdot I_3 [\cos(\omega t - 180$$

$$- \omega t + 180 + \varphi) - \cos(\omega t - 180 + \omega t - 180 - \varphi)] = U_3 \cdot I_3 \cdot [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)];$$

$$P_4 = U_4 \cdot I_4 = \sqrt{2} \cdot U_4 \cdot \sin(\omega t - 270) \cdot \sqrt{2} \cdot I_4 \cdot \sin(\omega t - 270 - \varphi) = 2 \cdot \frac{1}{2} U_4 \cdot I_4 [\cos(\omega t - 270$$

$$- \omega t + 270 + \varphi) - \cos(\omega t - 270 + \omega t - 270 - \varphi)] = U_4 \cdot I_3 \cdot [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)];$$

რადგან ფაზური ძაბვები და დენები სიდიდით ტოლია

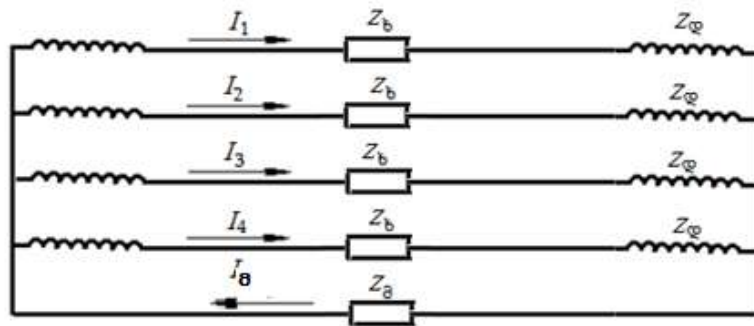
$$U_1=U_2=U_3=U_4=U, \quad I_1=I_2=I_3=I_4=I$$

ანუ ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის ოთხი ფაზის მიერ განვითარებული ჯამური მყისი სიმძლავრე იქნება:

$$P_{ფგტ} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 4 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi .$$

5.2. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დატვირთვის ფაზური დენები

განვიხილოთ ოთხფაზა სისტემა, რომელსაც გააჩნია მეხუთე (ნეიტრალური) სადენი და ორივე ბოლოში ჩამიწებულია (ნახ.5.2.1). ფაზებში გამავალი დენები გამოვთვალოთ ზედდების მეთოდით. გამოვთვალოთ სადენებში გამავალი დენები, გამოწვეული თითოეული ფაზური ძაბვით:



ნახ.5.2.1. ოთხფაზა სისტემა, მეხუთე (ნეიტრალური) სადენით და ორივე ბოლოში ჩამიწებული.

პირველი ფაზის ფაზური ძაბვით გამოწვეული დენები

$$I_{11} = \frac{U_1}{Z + \frac{Z \cdot Z_φ}{Z + 3Z_φ}} = \frac{U_1(Z + 3Z_φ)}{Z(Z + 4Z_φ)}, \quad \frac{I_{21} + I_{31} + I_{41}}{I_{φ1}} = \frac{Z_φ}{Z/3} = \frac{3Z_φ}{Z} \quad \text{ანუ}$$

$$\frac{I_{11}}{I_{φ1}} = \frac{Z + 3Z_φ}{Z} \quad \text{აქედან} \quad I_{φ1} = \frac{I_{11} \cdot Z}{Z + 3Z_φ} = \frac{U_1}{Z + 4Z_φ} \quad \text{და} \quad I_{21} = I_{31} = I_{41} = \frac{U_1 \cdot Z_φ}{Z(Z + 4Z_φ)}$$

ანალოგიურად, მეორე, მესამე და მეოთხე ფაზის ფაზური ძაბვებით გამოწვეული დენები:

$$I_{22} = \frac{U_2(Z + 3Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)}, \quad I_{62} = \frac{U_2}{Z + 4Z_6} \quad \text{და} \quad I_{12} = I_{32} = I_{42} = \frac{U_2 \cdot Z_6}{Z(Z + 4Z_6)};$$

$$I_{33} = \frac{U_3(Z + 3Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)}, \quad I_{63} = \frac{U_3}{Z + 4Z_6} \quad \text{და} \quad I_{13} = I_{23} = I_{43} = \frac{U_3 \cdot Z_6}{Z(Z + 4Z_6)};$$

$$I_{44} = \frac{U_4(Z + 3Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)}, \quad I_{64} = \frac{U_4}{Z + 4Z_6} \quad \text{და} \quad I_{14} = I_{24} = I_{34} = \frac{U_4 \cdot Z_6}{Z(Z + 4Z_6)}$$

ამ გამოსახულებებში Z წარმოადგენს ფაზური სადენის ჯამურ წინაღობას

$$Z = Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_b + Z_{\text{ფ}}$$

ზედღების მეთოდის გამოყენებით გამოვთვალოთ სადენებში დენები:

პირველ სადენში

$$I_1 = I_{11} - I_{12} - I_{13} - I_{14} = \frac{U_1 Z + (3U_1 - U_2 - U_3 - U_4)Z_6}{Z(Z + 4Z_6)}$$

მეორე სადენში

$$I_2 = I_{22} - I_{21} - I_{23} - I_{24} = \frac{U_2 Z + (3U_2 - U_1 - U_3 - U_4)Z_6}{Z(Z + 4Z_6)}$$

მესამე სადენში

$$I_3 = I_{33} - I_{31} - I_{32} - I_{34} = \frac{U_3 Z + (3U_3 - U_1 - U_2 - U_4)Z_6}{Z(Z + 4Z_6)}$$

მეოთხე სადენში

$$I_4 = I_{44} - I_{41} - I_{42} - I_{43} = \frac{U_4 Z + (3U_4 - U_1 - U_2 - U_3)Z_6}{Z(Z + 4Z_6)}$$

მიწაში (ნულოვან სადენში) გამავალი დენი

$$I_0 = I_{61} + I_{62} + I_{63} + I_{64} = \frac{(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)}{(Z + 4Z_6)}$$

მიღებული გამოსახულებების საფუძველზე გამოვთვალოთ დენები, როცა ძაბვათა სისტემა ქმნის ოთხფაზა სიმეტრიულ სისტემას ფაზურ ძაბვებს შორის ძვრის კუთხით $\alpha = -\pi/2$ (ნახ.4.2): $U_1 = U$; $U_2 = -jU$; $U_3 = -U$; $U_4 = jU$;

დენი პირველ სადენში

$$I_1 = \frac{UZ + (3U - jU - U + jU)Z_6}{Z(Z + 4Z_6)} = \frac{U(Z + 2Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)}; \quad \text{ანალოგიურად,}$$

$$I_2 = \frac{-jU(Z + 2Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)} = -jI_1; \quad I_3 = \frac{-U(Z + 2Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)} = -I_1; \quad I_4 = \frac{jU(Z + 2Z_6)}{Z(Z + 4Z_6)} = jI_1.$$

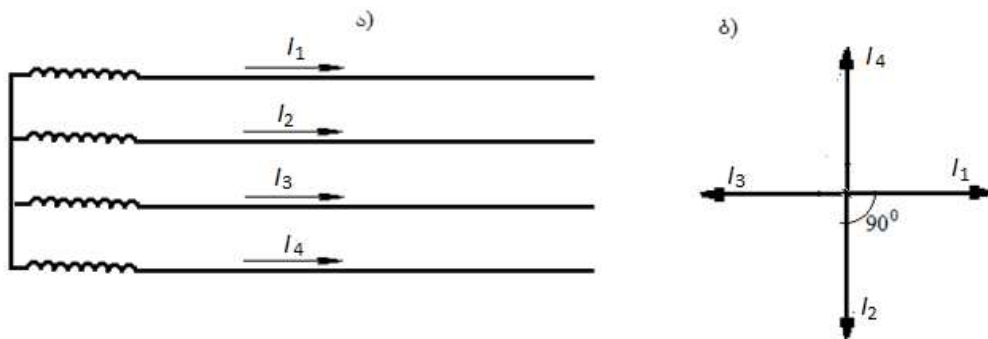
დენი ნულოვან სადენში

$$I_0 = \frac{(U - jU - U + jU)}{(Z + 4Z_6)} = 0$$

მივიღეთ, რომ ოთხფაზა გადაცემის მეხუთე სადენში (ნულოვან სადენში) გამავალი დენი ნულის ტოლია. აქედან გამომდინარე, ოთხფაზა ელექტროგადაცემა ნეიტრალურ სადენს არ ითხოვს დაორფაზა გადაცემისგან განსხვავებით ოთხფაზა გადაცემა შეიძლება ჩავამიწოთ ორივე ბოლოში.

5.3. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენტა ინდუქციურობა

მრავალფაზა ელექტროგადაცემის თითოეულ სადენში ინდუქცირდება ამავე სადენში გამავალი დენით განპირობებული თვითინდუქციის ე.მ.ძ დანარჩენ სადენში გამავალი დენებით განპირობებული ურთიერთინდუქციის ე.მ.ძ. განვიხილოთ ოთხსადენიანი ხაზი (ნახ.5.3.1.ა), რომლის სადენებში გამავალი დენების ვექტორულ დიაგრამას აქვს ნახ.5.3.1.ბ-ზე ნაჩვენები სახე [27]



ნახ.5.3.1 ოთხფაზა ოთხსადენიანი ხაზი და მისი ვექტორული დიაგრამა სადენტა ინდუქციურობის გაანგარიშებისათვის.

სადენებში გამავალი დენები იცვლება სინუსოიდის კანონით და, შესაბამისად, თითოეულ სადენში ძაბვის ვარდნის საანგარიშო გამოსახულება ჩავწეროთ სიმბოლური მეთოდის გამოყენებით და გვაქვს:

$$\begin{aligned} U_1 &= (r + j\omega L)I_1 + j\omega M_{1,2}I_2 + j\omega M_{1,3}I_3 + j\omega M_{1,4}I_4 \\ U_2 &= (r + j\omega L)I_2 + j\omega M_{2,3}I_3 + j\omega M_{2,4}I_4 + j\omega M_{2,1}I_1 \\ U_3 &= (r + j\omega L)I_3 + j\omega M_{3,4}I_4 + j\omega M_{3,1}I_1 + j\omega M_{3,2}I_2 \\ U_4 &= (r + j\omega L)I_4 + j\omega M_{4,1}I_1 + j\omega M_{4,2}I_2 + j\omega M_{4,3}I_3 \end{aligned}$$

ნახ.5.4,ბ ვექტორული დიაგრამის თანახმად, ვწერთ:

$$\begin{aligned} U_1 &= [r + j\omega(L - jM_{1,2} - M_{1,3} + jM_{1,4})]I_1 \\ U_2 &= [r + j\omega(L - jM_{2,3} - M_{2,4} + jM_{2,1})]I_2 \\ U_3 &= [r + j\omega(L - jM_{3,4} - M_{3,1} + jM_{3,2})]I_3 \\ U_4 &= [r + j\omega(L - jM_{4,1} - M_{4,2} + jM_{4,3})]I_4 \end{aligned}$$

მრგვალ ფრჩხილებში მდგომი გამოსახულებები შეიძლება განვიხილოთ როგორც თითოეული სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა, შესაბამისად:

$$\begin{aligned} L'_1 &= (L - jM_{1,2} - M_{1,3} + jM_{1,4}) \\ L'_2 &= (L - jM_{2,3} - M_{2,4} + jM_{2,1}) \\ L'_3 &= (L - jM_{3,4} - M_{3,1} + jM_{3,2}) \\ L'_4 &= (L - jM_{4,1} - M_{4,2} + jM_{4,3}) \end{aligned}$$

ℓ სიგრძისა და R ადიუსის სადენის L თვითინდუქციურობა გამოითვლება გამოსახულებით

$$L = L_{\text{გარე}} + L_{\text{შიგა}} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ell n \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi},$$

სადაც: μ_0 - მაგნიტური ველის მუდმივა $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ ჰნ/მ;

μ - სადენის მასალის აბსოლიტური მაგნიტური შეღწევადობა

(ფერადი ლითონსათვის $\mu = \mu_0$).

საკაერო ხაზების სადენები მზადდება ფერადი ლითონისაგან (ალუმინისაგან) და, შესაბამისად, 1 კმ სიგრძისამ სადენის შიგა ინდუქციურობა

$$L_{0, \text{შოგა}} = \frac{1,256 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 3,14} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ ჰმ/მ};$$

ანუ სადენისშიგა რეაქტიული წინაღობა

$$X_{0, \text{შოგა}} = \omega L_{0, \text{შოგა}} = 0,0157 \text{ ომი/კმ.}$$

D მანძილზე დამორებული სიგრძის ($D \ll \ell$) პარალელური სადენების ურთიერთინდუქციურობა

$$M = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right).$$

ბოლო ორი გამოსახულების გათვალისწინებით სადენტა ეკვივალენტური ინდუქციურობის საანგარიშო გამოსახულებები ჩაიწერება შემდეგ სახეში

$$L'_1 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,2}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,3}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{1,4}} - 1 \right)$$

$$L'_2 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,3}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,4}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{2,1}} - 1 \right)$$

$$L'_3 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,4}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,1}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{3,2}} - 1 \right)$$

$$L'_4 = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) + \frac{\mu \ell}{8\pi} - j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{4,1}} - 1 \right) - \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{4,2}} - 1 \right) + j \frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{D_{4,3}} - 1 \right)$$

ანუ 1 კმ სიგრძის სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა

$$L'_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{1,3}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{1,2}}{D_{1,4}}$$

$$L'_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{2,4}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{2,3}}{D_{2,1}}$$

$$L'_3 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{3,1}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{3,4}}{D_{3,2}}$$

$$L'_4 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{4,2}}{R} + \frac{\mu}{8\pi} + j \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{4,1}}{D_{4,3}}$$

მივიღეთ, რომ სადენის ეკვივალენტური ინდუქციურობა, ზოგადად, კომპლექსური სიდიდეა. მისი ნამდვილი ნაწილი, გამრავლებული $j\omega$ - ზე, გვაძლევს

1კმ სიგრძის ამ სადენის რეაქტიულ წინაღობას, ხოლო წარმოსახვითი ნაწილი, გამრავლებული $j\omega$ - ზე, გვაძლევს 1 კმ სიგრძის ამავე სადენის აქტიურ დამატებით (ომური წინაღობის ზევით) წნაღობას. 50 ჰერცი ცვლადი დენის საპაერო ხაზების ალუმინის სადენებისათვის გვაქვს:

$$X_{0,1} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{1,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,1\text{დამატ.}} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{1,2}}{D_{1,4}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.1)$$

$$X_{0,2} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{2,4}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,2\text{დამატ.}} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{2,3}}{D_{2,1}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.2)$$

$$X_{0,3} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{3,1}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,3\text{დამატ.}} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{3,4}}{D_{3,2}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.3)$$

$$X_{0,4} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{4,2}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,4\text{დამატ.}} = 0,0628 \cdot \ln \frac{D_{4,1}}{D_{4,3}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.4)$$

თუ ნატურალური ლოგარითმიდან გადავალთ ათობით ლოგარითმზე, მივიღებთ

$$X_{0,1} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{1,3}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,1\text{დამატ.}} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{1,2}}{D_{1,4}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.5)$$

$$X_{0,2} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,4}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,2\text{დამატ.}} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{2,3}}{D_{2,1}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.6)$$

$$X_{0,3} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{3,1}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,3\text{დამატ.}} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{3,4}}{D_{3,2}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.7)$$

$$X_{0,4} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{4,2}}{R} + 0,0157 \text{ ომი/კმ}, \quad r_{0,4\text{დამატ.}} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{4,1}}{D_{4,3}} \text{ ომი/კმ}; \quad (5.3.8)$$

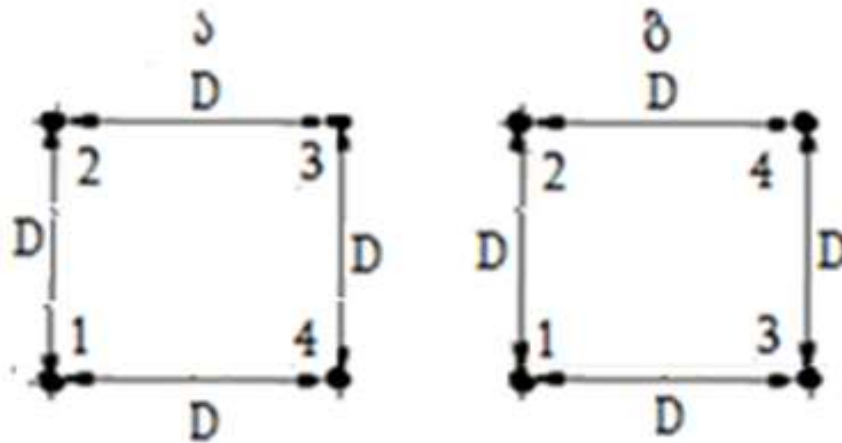
გამოთვლებმა აჩვენა, რომ სადენების აქტიური დამატებითი ჯამური წინაღობა ნულის ტოლია, რაც ნიშნავს მას, რომ ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით სადენებს შორის ადგილი აქვს აქტიური სიმძლავრის მიმოცვლას.

როგორც ამ გამოსახულებებიდან ჩანს 1 და 3 ფაზის სადენთა ინდუქციურ წინააღმდეგობებზე გავლენას ვერ ახდენს 2 და 4 ფაზა. ანალოგიურად, 2 და 4 ფაზის სადენთა ინდუქციურ წინააღმდეგობებზე გავლენას ვერ ახდენს 1 და 3 ფაზა. ეს განპირობებულია იმით, რომ 1 და 3 ფაზის სადენებისთვის 2 და 4 ფაზა ურთიერთსაწინააღმდეგო ფაზებია და მათი მაგნიტური გავლენა 1 და 3 ფაზათა სადენებზე ურთიერთ გამაკომპენსირებულია. ასევე, 2 და 4 ფაზის სადენებისთვის 1 და 3 ფაზა წარმოადგენს ურთიერთსაწინააღმდეგო ფაზებს და მათი მაგნიტური გავლენა 2 და 4 ფაზათა სადენებზე ურთიერთ გამაკომპენსირებულია [28].

5.3.2. ნახაზის თანახმად

$$U_{1,2} = U_{23} = U_{34} = U_{41} = \sqrt{2}U_{\text{ფაზ.}}, \quad U_{1,3} = U_{24} = 2U_{\text{ფაზ.}}$$

აქედან გამომდინარე, მიზანშეწონილია სადენები საყრდენებზე განთავსდეს ნახ. 5.3.2,ა ან ნახ.5.3.2,ბ -ის მიხედვით.



ნახ.5.3.2 სადენების განთავსება კვადრატის წვეროებზე (საყრდენებზე)

მაშინ ფაზურ სადენებს შორის მანძილები:

ა) შემთხვევაში $D_{1,2} = D_{2,3} = D_{3,4} = D_{1,4} = D, \quad D_{1,3} = D_{2,4} = \sqrt{2}D;$

ბ) შემთხვევაში $D_{1,2} = D_{2,4} = D_{3,4} = D_{1,3} = D, \quad D_{1,4} = D_{2,3} = \sqrt{2}D;$

რადგანაც ოთხფაზა ელექტროგადაცემაში ფაზათაშორისი (ხაზური) ძაბვა

$$U = \sqrt{2}U_{\text{ფაზ.}},$$

სამფაზა ელექტროგადაცემასთან შედარებით ფაზათაშორისი მანძილი შეიძლება შევამციროთ

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} D = 0,817D - \text{მდე.}$$

ქვემოთ ცხრილში (ცხრ. 5.3.1.) მოცემულია სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის სადენების რეაქტიული წინაღობები საყრდენებზე სადენთა ნახ.5.3.2,ა და ნახ.5.3.2,ბ-ის მიხედვით განთავსებისას. ამ ცხრილში 330 და 500 კვ ძაბვის ხაზებისთვის ნაჩვენებია გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი.

როგორც ამ ცხრილიდან ჩანს, ოთხფაზა საჰაერო ელექტროგადაცემის ხაზის ფაზური სადენების რეაქტიული წინაღობის სიდიდე, სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ფაზური სადენების რეაქტიულ წინაღობასთან შედარებით, 220კვ-ის დროს საშუალოდ 1,05-ჯერ მეტია, აქედან გამომდინარე, ხაზის 1 კმ სიგრძის რეაქტიულ წინაღობად ავიღოთ $0,4 \cdot 1,05 = 0,42$ ომი/კმ.

როცა ფაზაში გვაქვს რამდენიმე სადენი (გახლეჩილი ფაზა), მაშინ (5.3.5-5.3.8) გამოსახულებებში უნდა ჩავსვათ ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი

$$R_{\text{კვ}} = \sqrt[n]{R \cdot a^{n-1}}$$

სადაც R - გახლეჩილი ფაზის სადენის რადიუსი.

a - ფაზაში სადენებს შორისი საშუალო გეომეტრიული მანძილი (გახლეჩის ბიჯი);

n - ფაზაში სადენთა რაოდენობა.

გამოთვლებმა აჩვენა, რომ სადენების აქტიური დამატებითი ჯამური წინაღობა ნულის ტოლია, რაც ნიშნავს მას, რომ ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით სადენებს შორის ადგილი აქვს აქტიური სიმძლავრის მიმოცვლას.

ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ფაზური წინაღობა, ომი/კმ .

ცხრ.5.3.1

ნომინალური ხაზური ძაბვა, კვ	სადენის მარკა	სადენის გარე დიამეტრი, მმ	ფაზურ სადენებს შორის მანძილი D, მ		1 კმ სიგრძის ხაზის ფაზური რეაქტიული წინაღობა, ომი/კმ, სადენთა განლაგება	
			3-ფაზა სისტემა	4-ფაზა სისტემა	კვადრატი (ნახ.5.5,ა)	კვადრატი (ნახ.5.5,ბ)
			35	AC-50	9,6	3
	AC-70	11,4	3	2,45	0,419	0,398
	AC-95	13,5	3	2,45	0,409	0,387
110	AC-70	11,4	5	4,09	0,452	0,430
	AC-95	13,5	5	4,09	0,441	0,419
	AC-120	15,6	5	4,09	0,432	0,410
	AC-150	16,8	5	4,09	0,427	0,405
	AC-185	18,9	5	4,09	0,420	0,398
220	AC-240	21,6	8	6,54	0,441	0,419
	AC-300	24,5	8	6,54	0,433	0,411
	AC-400	27,5	8	6,54	0,426	0,404
	AC-500	30,6	8	6,54	0,419	0,397
330	2xAC-240	113,84	11	8,99	0,356	0,335
	2xAC-300	121,24	11	8,99	0,352	0,331
	2xAC-400	128,46	11	8,99	0,349	0,327
500	3xAC-300	199,48	14	11,44	0,336	0,314
	3xAC-400	214,72	14	11,44	0,332	0,310

როგორც ადრე ავღნიშნეთ მრავალფაზა სისტემა ($m>2$), სიმეტრიული ფაზური ე. მ. ძალებისა და სიმეტრიული ფაზური დატვირთვის დენების დროს, გაწონასწორებული მრავალფაზა სისტემაა. შესაბამისად, ოთხფაზა ელექტროგადაცემის შემთხვევაში ჯამური ოთხფაზა სიმძლავრე არ არის დროზე დამოკიდებული.

$$P = 4U_{\text{ფ}} I_{\text{ფ}} \cos \varphi$$

სამფაზა ელექტროგადაცემასთან შედარებით ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის გამტარუნარიანობა, იმავე ფაზური ძაბვისა და ფაზური დენის შენარჩუნების პირობებში, $4/3 = 1,33$ – ჯერ ანუ 33%-ით მეტია. თუმცა ოთხფაზა ელექტროგადაცემა ითხოვს მეოთხე ფაზური სადენის დამატებას ანუ 33%-ით იზრდება ფერადი ლითონის ხარჯი ხაზზე. ამდენივეთი გაიზრდება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ხაზში (ცხრ.5.3.2, სტრიქონი 1).

თანაფარდობა ოთხფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზების

ნომინალურ პარამეტრებს შორის. ცხრ.5.3.2

№	ძირითადი მოთხოვნა	შესაბამისად	გამომდინარეობს	შედეგი
1	$U_{\text{ფ}(4)}=U_{\text{ფ}(3)},$ $I_{\text{ფ}(4)}=I_{\text{ფ}(3)}$	$S_{\text{ფ}(4)}=S_{\text{ფ}(3)}$	$S_{(4)}=1,33S_{(3)},$ $F_{(4)}=F_{(3)}$	$V_{(4)}=1,33V_{(3)}$ $\Delta P_{(4)} = 1,33 \cdot \Delta P_{(3)},$
2	$S_{(4)}=S_{(3)},$ $U_{\text{ფ}(4)}=U_{\text{ფ}(3)},$	$S_{\text{ფ}(4)}=0,75S_{\text{ფ}(3)}$	$I_{\text{ფ}(4)}=0,75I_{\text{ფ}(3)},$ $F_{(4)}=F_{(3)}$	$V_{(4)}=1,33V_{(3)}$ $\Delta P_{(4)} = 0,75 \cdot \Delta P_{(3)},$
3	$S_{(4)}=S_{(3)},$ $U_{\text{ფ}(4)}=U_{\text{ფ}(3)},$	$S_{\text{ფ}(4)}=0,75S_{\text{ფ}(3)}$	$I_{\text{ფ}(4)}=0,75I_{\text{ფ}(3)},$ $F_{(4)}=0,75F_{(3)},$	$V_{(4)}=V_{(3)}$ $\Delta P_{(4)} = \Delta P_{(3)},$

იმავე ფაზური ძაბვისა და გამტარუნარიანობის შენარჩუნების პირობებში დატვირთვის ფაზური დენი მცირდება 25%-ით და, შესაბამისად, ფაზური სადენის იგივე განიკვეთის შენარჩუნებისას ხაზში ფერადი ლითონის ხარჯი 33%-ით იზრდება და სიმძლავრის დანაკარგები მცირდება 25%-ით (ცხრ.5.2, სტრიქონი 2), ხოლო ფაზური სადენის განიკვეთის 25%-ით შემცირებისას ხაზში ფერადი

ლითონის ხარჯიც და სიმძლავრის დანაკარგებიც არ შეიცვლება (ცხრ. 5.3.2, სტრიქონი 3).

ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება უფრო მოხერხებულია ჩატარდეს ფაზური სიმძლავრისა და ფაზური ძაბვის მიხედვით.

განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითი.

გამოვთვალოთ $U_b \sqrt{3} = 220 / \sqrt{2} = 155,6$ კვ ძაბვისა და $\ell = 100$ კმ სიგრძის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები, თუ ოთხფაზა დატვირთვის სიმძლავრე

$$S = P + jQ = 200 + j120 \quad \text{მგვა}$$

და ფაზური სადენია AC-300. მომხმარებლის სალტეზე მუშა ძაბვა ავიღოთ

$$U_2 = 212 / \sqrt{2} = 150 \quad \text{კვ}$$

ხაზის ფაზური ელექტრული პარამეტრები:

წინაღობა $R + jX = (0,098 + j0,42) \cdot 100 = 9,8 + j42 \quad \text{ომი}$

განივი რეაქტიული გამტარობა

$$B = 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 270 \cdot 10^{-6} \quad \text{სიმ}$$

ფაზური დატვირთვა $S_{\Sigma} = P_{\Sigma} + jQ_{\Sigma} = 50 + j30 \quad \text{მგვა.}$

ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული ფაზური სიმძლავრე

$$\Delta Q_c = U_2^2 \cdot B = 150^2 \cdot 270 \cdot 10^{-6} = 6,08 \quad \text{მგვარ}$$

ფაზური დატვირთვა ხაზის ბოლოში

$$S''_{\Sigma} = P''_{\Sigma} + jQ''_{\Sigma} = \frac{j\Delta Q_c}{2} = 50 + j30 - j6,08/2 = 50 + j26,96 \quad \text{მგვა}$$

ძაბვის ვარდნა ფაზაში

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U} = \frac{50 \cdot 9,8 + 26,96 \cdot 42}{150} + j \frac{50 \cdot 42 - 26,96 \cdot 9,8}{150} =$$

$$= 10,82 + j12,24$$

33

ძაბვა ხაზის თავში

$$U_{1,3} = 150 + 10,82 + j12,24 = 160,82 + j12,24 \text{ კვ.} \quad |U_{1,3}| = 161,3 \quad 33$$

ხაზში ძაბვის დანაკარგები

$$\Delta U = 11,3 \text{ კვ;} \quad \Delta U\% = 7,01\% .$$

სიმძლავრის დანაკარგები ფაზაში

$$\Delta S_{\text{ფ}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} (R + jX) = \frac{50^2 + 26,96^2}{150^2} (9,8 + j42) = 1,41 + j6,02 \quad \text{მგვა}$$

ფაზური სიმძლავრე ხაზის თავში

$$S'_{\text{ფ}} = P'_{\text{ფ}} + jQ'_{\text{ფ}} = 50 + j26,96 + 1,41 + j6,02 = 51,41 + j32,98 \quad \text{მგვა}$$

გადასაცემი ფაზური სიმძლავრე

$$S_{\text{ფ}} = P_{\text{ფ}} + jQ_{\text{ფ}} - \frac{j\Delta Q_{\text{ფ}}}{2} = 51,41 + j32,98 - j6,05/2 = 51,41 + j29,96 \quad \text{მგვა}$$

გადასაცემი ოთხფაზა სიმძლავრე

$$S = P + jQ = 4 \cdot (51,41 + j29,96) = 205,64 + j107,96 \quad \text{მგვა.}$$

ხაზში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta P = 5,64 \text{ მგვტ;} \quad \Delta P\% = 2,82\% .$$

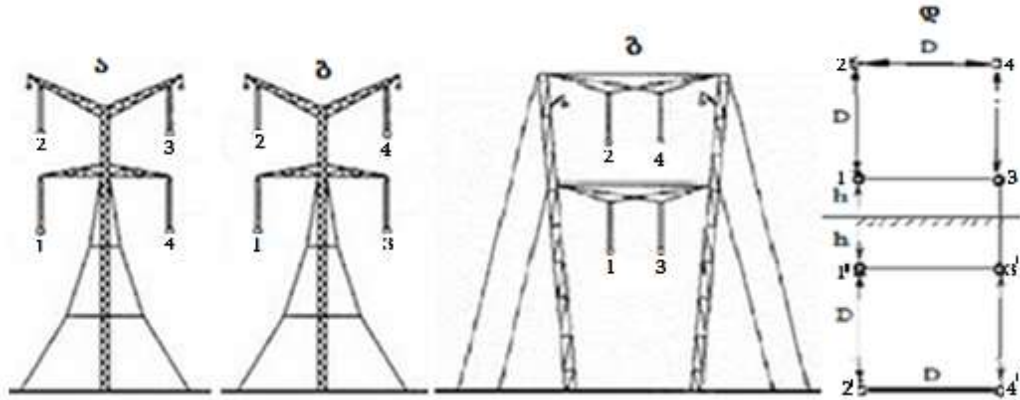
5.4. ოთხფაზა ელექტროგადაცემის ხაზის ტევადობა

ოთხფაზა ელექტროგადაცემა წარმოადგენს გრძელი პარალელური სადენე-ბიანი სისტემის კერძო შემთხვევას. ამ სისტემის ერთი ფაზური სადენის გასა-შუალოებული ტევადობა გამოითვლება სადენებსა და მათ სარკულ ანარეკლებს შორის ურთიერთ განლაგებაზე დამოკიდებულებაში [20,29].

ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენების საყრდენებზე განლაგების ვარი-ანტები ნაჩვენებია ნახაზ.5.4.1ა,ბ,გ-ზე [30,31]. ხოლო ამ სადენების სარკული ანარეკლები კი 5.4.1 დ ნახაზზე

პარალელური სადენებიანი სისტემის ერთი სადენის გასაშუალოებული ტევადობა გამოითვლება ფორმულით

$$C = \frac{1}{a_0 - a_m} ,$$



ნახ.5.4.1 ა,ბ,გ-ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენების საყრდენებზე განლაგების ვარიანტები. ამ სადენების სარკული ანარეკლები კი 5.4.1 დ ნახაზზე.

სადაც a_0 და a_m , ზოგადად, წარმოადგენს მრავალსადენიანი სისტემის სადენთა საშუალო პოტენციურ კოეფიციენტებს, რომლებიც გამოითვლება k, p სადენების საკუთარი a_{kk} და ურთიერთპოტენციური a_{kp} კოეფიციენტების საშუალებით, კერძოდ, a_0 წარმოადგენს საკუთარი პოტენციური კოეფიციენტების საშუალო არითმეტიკულს და a_m კი ურთიერთ პოტენციური კოეფიციენტების საშუალო არითმეტიკულს. ზოგადად, n რაოდენობის სადენიანი სისტემის შემთხვევაში გვაქვს: როცა $k = p$, მაშინ

$$a_0 = \frac{\sum a_{kk}}{n} \text{ და როცა } k \neq p, a_m = \frac{n! \sum a_{kp}}{2 \cdot (n-2)!}$$

სადაც
$$a_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \left(\ln \frac{2h_k}{R_k} \right); \quad a_{kp} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \left(\ln \frac{r_{pk}^1}{r_{pk}} \right)$$

ამ გამოსახულებებში k და p მრავალსადენიან სისტემაში სადენთა ნომრების ინდექსებია, R_k შესაბამის სადენთა განივი კვეთის რადიუსია, r_{pk} -სადენებს შორის მანძილი, ხოლო r_{pk}^1 -შესაბამის სადენსა და მის სარკულ ანარეკლს შორის მანძილი. 5.4.1 დ. ნახაზის მიხედვით ($n = 4$) ვწერთ:

$$a_0 = \frac{\sum a_{kk}}{n} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \frac{1}{4} \left(\ln \frac{2h}{R} + \ln \frac{2h+D}{2R} + \ln \frac{2h}{R} + \ln \frac{2h+D}{R} \right)$$

აქ R-სადენის რადიუსი, D – მანძილი ორ უახლოეს ფაზურ სადენს შორის

$$a_m = \frac{n! \cdot \sum a_{kk}}{2 \cdot (n-2)!} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \frac{1}{6} \left(\begin{aligned} &\ln \frac{2h+D}{D} + \ln \frac{\sqrt{D^2 + (2h+D)^2}}{\sqrt{2 \cdot D^2}} + \ln \frac{\sqrt{D^2 + (2 \cdot h)^2}}{D} + \\ &\ln \frac{\sqrt{(2h+2D)^2 + D^2}}{D} + \ln \frac{\sqrt{(2h+D)^2 + D^2}}{\sqrt{2D^2}} \ln \frac{2h+D}{D} \end{aligned} \right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \ln \left(\sqrt{\frac{(2h+D)^2 \cdot [(2h+D)^2 + D^2] \cdot [\sqrt{(2h)^2 + D^2}] \cdot [\sqrt{(2h+2D)^2 + D^2}]}{2 \cdot D^6}} \right)$$

თუ მიწის გავლენას უგულვებელყოფთ ანუ დავუშვებთ $D \ll h$, ოთხფაზა ელექტროგადაცემისათვის სადენების 5.6.დ ნახაზის მიხედვით განლაგებისას, შესაბამისად:

$$a_0 = \frac{\sum a_{kk}}{n} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \left(\ln \frac{2h}{R} \right); \quad a_m = \frac{n! \cdot \sum a_{kp}}{2 \cdot (n-2)!} = \frac{1}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \ln \frac{2h}{1,122D}$$

შესაბამისად ოთხფაზა ოთხსადენიანი, სამფაზა სამსადენიანი და ორფაზა სამსადენიანი ელექტროგადაცემის სადენთა გასაშუალოებული ტევადობების

სანგარიშო გამოსახულებებია $C_4 = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln \frac{1,122 \cdot D}{R}}$; ფარადი.

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln \frac{1,26 \cdot D}{R}}; \text{ ფარადი.} \quad C_2 = \frac{1}{\alpha_0 - \alpha_m} = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln \frac{D}{R}}; \text{ ფარადი.}$$

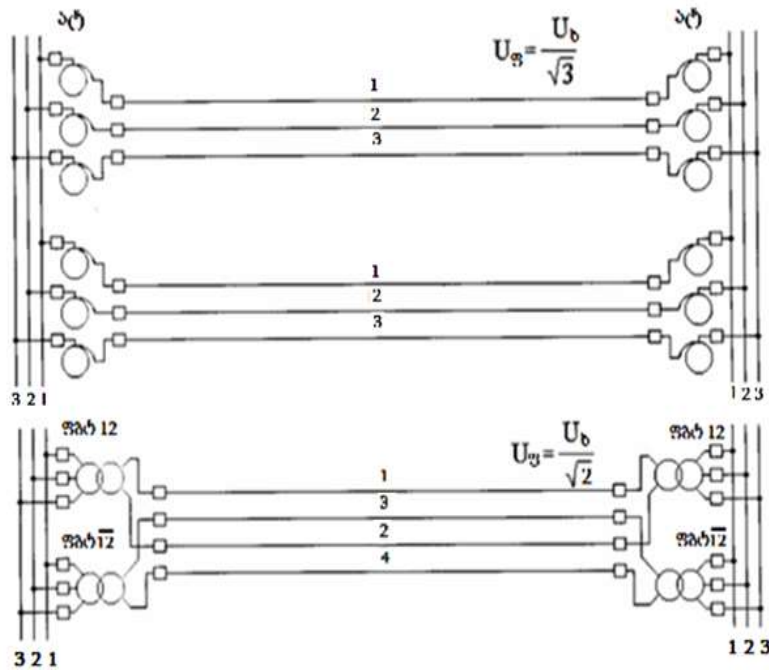
ორფაზა სამსადენიანი ელექტროგადაცემის ხაზის ტევადობა 7,3% –ით მეტია სამფაზა სამსადენიანი ხაზის ტევადობაზე, შესაბამისად მისი ტალღური წინალობა

$$Z_2 = 0,965 \cdot Z_3,$$

ე.ი. 3,5%–ით ნაკლებია სამფაზა სამსადენიანი საჰაერო ხაზის ტალღურ წინალობაზე. აქ Z_2 და Z_3 შესაბამისად ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადამცემი ხაზის ტალღური წინალობებია.

220კვ ძაბვის გადამცემი ხაზის შემთხვევაში ოთხფაზა ხაზის სადენის ტევადობა 5,32%–ით იზრდება, ხოლო ინდუქციურობა პრაქტიკულად სამფაზა ხა-

ზის ინდუქციურობის სიდიდის ტოლია. აქედან გამომდინარე ხაზის ტალღური წინაღობა დაახლოებით 2,6%-ით მცირდება სამფაზა ხაზთან შედარებით.



ნახ. 5.4.2. სამფაზა და ოთხფაზა ელექტროგადაცემის პრინციპიალური სქემები: ა – ორჯაჭვა სამფაზა და ბ – ოთხფაზა. ატ – ავტოტრანსფორმატორი.

500კვ ძაბვის გადამცემი ხაზის შემთხვევაში ოთხფაზა ხაზის სადენის ტევადობა 9,6%-ით იზრდება, ხოლო ხაზის ტალღური წინაღობა დაახლოებით 4,5%-ით მცირდება.

დიდი სიმძლავრეების ზემორეულ მანძილზე გადაცემის პრობლემის გადაწყვეტა მიზანშეწონილია ოთხფაზა სისტემაზე გადასვლით, რამდენადაც იგი ელექტროგადაცემის ტექნიკური, ეკონომიკური, საიმედოობისა და ეკოლოგიური მახასიათებლების არსებითად გაუმჯობესებას იძლევა [32,33]. ასეთი ელექტროგადაცემის საფუძველს წარმოადგენს ოთხფაზა გაწონასწორებული სიმეტრიული სისტემა 90° -იანი ფაზათა ძვრით; მოგეხსენებათ დიდი სიმძლავრის ელექტროენერგიების გადაცემის დროს იყენებენ მრავალჯაჭვა სამფაზა გადაცემას, აღსანიშნავია, რომ ასიმეტრიული ორფაზა (90° -იანი) ელექტროგადაცემა

რეალურად ოთხფაზა გადაცემის ნახევარს შეადგენს, ვინაიდან ფაზებს შორის ძვრის კუთხე 90°-ია.

თუ ორჯაჭვა სამფაზა საჰაერო ხაზებს ჩავანაცვლებთ ერთჯაჭვა ოთხფაზა საჰაერო ხაზით (ნახ.5.4.2) და ამ ხაზების ჯამური კვეთი და მათი ფაზური ძაბვები ტოლია, მაშინ ოთხფაზა ხაზში თითოეული ფაზის შემდგენების რიცხვი 1.5-ჯერ მეტი გვექნება, ვიდრე ცალკეულ სამფაზა ხაზში. ამ დროს სადენების ეკვივალენტური რადიუსი იზრდება [29], რაც ამცირებს მის ინდუქციურობას, ხოლო სადენის ტევადობა იზრდება ეს კი იწვევს ტალღური წინაღობის შემცირებას, ამიტომ ერთჯაჭვა სამფაზა ხაზთან შედარებით ოთხფაზა ხაზის ნატურალური სიმძლავრე შესაძლებელია გაიზარდოს 2-ჯერ და ცოტა მეტჯერაც [29].

დასკვნა მე-5 თავის მიმართ

ამ თავში ჩატარებული კვლევისა და განხილული რიცხვითი მაგალითების გაანგარიშების შედეგების საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა:

1. მიღებულია ოთხფაზა ელექტროგადაცემის დატვირთვის ფაზური დენების საანგარიშო გამოსახულებები;
2. მიღებულია ოთხსადენიანი ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენთა ურთიერთინდუქციურობის გამოსათვლელი გამოსახულებები და ოთხსადენიანი ოთხფაზა და სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის სადენთა გასაშუალოებული ტევადობის გამოსათვლელი გამოსახულებები.
3. 220–500კვ ძაბვის გადამცემი ხაზის შემთხვევაში ოთხფაზა ხაზის სადენის ტევადობა შესაბამისად 5,32%-ით და 9,6%-ით იზრდება, ხოლო ტალღური წინაღობა დაახლოებით 2,6%-ით და 4,5%-ით მცირდება სამფაზა ელექტროგადამცემ ხაზთან შედარებით.

საერთო დასკვნა

1. იმისათვის, რომ ორფაზა გადაცემით მომხმარებელთან მიწოდებული იქნეს იგივე სიმძლავრე, რაც სამფაზა გადაცემისას, საჭიროა დაცული იქნეს შემდეგი ტოლობა

$$2S_{ფ(2)} = 3S_{ფ(3)} \text{ ანუ } S_{ფ(2)} = 1,5S_{ფ(3)};$$

2. ორფაზა გადაცემისა და სამფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვების ტოლობისას, ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისა და ხაზზე იმავე განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იზრდება 3-ჯერ. მაგრამ ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი დარჩება იგივე, რაც სამფაზა გადაცემისას;

3. ორფაზა გადაცემისა და სამფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვების ტოლობის, ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისა და ორფაზა გადაცემის ხაზზე 1,5-ჯერ მეტი განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იზრდება 2-ჯერ. ხოლო ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი იზრდება 1,5-ჯერ;

4. ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისას, თუ ორფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვა სამფაზა გადაცემის ფაზურ ძაბვაზე 1,225-ჯერ მეტია, მაშინ ორფაზა გადაცემის ფაზური დენი სამფაზა გადაცემის ფაზურ დენზე ასევე 1,225-ჯერ მეტია, ორფაზა და სამფაზა გადაცემების ხაზური ძაბვები ტოლია. ამ შემთხვევაში ხაზზე იმავე განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორფაზა გადაცემაში იზრდება 2-ჯერ, ხოლო ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი დარჩება იგივე, რაც სამფაზა გადაცემისას;

5. ხაზის გამტარუნარიანობის შენარჩუნებისას, თუ ორფაზა გადაცემის ფაზური ძაბვა სამფაზა გადაცემის ფაზურ ძაბვაზე 1,225-ჯერ მეტი იქნება, მაშინ ორფაზა გადაცემის ფაზური დენი სამფაზა გადაცემის ფაზურ დენზე ასევე 1,225-ჯერ მეტია, ორფაზა და სამფაზა გადაცემების ხაზური ძაბვები ტოლია. ამ შემთხვე-

ვაში ხაზზე 1,225-ჯერ მეტი განიკვეთის ფაზური სადენის გამოყენებისას, დანაკარგები ორჯაზა გადაცემაში იზრდება 1,63-ჯერ. ხოლო ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯი ასევე იზრდება 1,225-ჯერ;

6. ორჯაზა და სამჯაზა ელექტროგადაცემის სისტემების დაკავშირება შესაძლებელია სპეციალური ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორებით, რომელთა საშუალებით ძაბვათა ორჯაზა სისტემა გადაყვანილი იქნება ძაბვათა სამჯაზა სისტემაზე და პირიქით;

7. თეორიული დამტკიცების გზით დადგენილია სამსადენიანი ორჯაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და უკუსადენის ელექტრული პარამეტრები;

8. ორჯაზა გადაცემის ფაზური სადენებისა და მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობა, პრაქტიკულად, სამჯაზა ელექტროგადაცემის ფაზური სადენების რეაქტიული წინაღობების ტოლია;

9. ზედდების მეთოდის გამოყენებით მიღებულია ორჯაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები დატვირთვის დენის მიხედვით;

10. მიღებულია ორჯაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით;

11. ორჯაზა გადაცემისას რეჟიმის პარამეტრები უფრო გაუარესებულია, განსაკუთრებით ძაბვასთან მიმართებაში;

12. დადგენილია, რომ ორჯაზა ელექტროგადაცემისას ძაბვის ხარისხის გაუმჯობესება უფრო ეფექტურია მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის გზით;

13. მიღებულია ორჯაზა ელექტროგადაცემის მესამე (უკუსადენის) რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის საანგარიშო გამოსახულება ამ სადენში ძაბვის დანაკარგის შეზღუდვის პირობით;

14. რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრების მიხედვით ჩატარებულია სამჯაზა და ორჯაზა ელექტროგადაცემების შედარებითი ანალიზი;

- 15.ორფაზა ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები შედარებით გაუმჯობესებულია უკუსადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციის შემდეგ
- 16.რაც მაღალია ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვა, მით მეტი ხარისხით უნდა გახორციელდეს მესამე სადენის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია, რათა ხაზის რეჟიმის პარამეტრები დასაშვების ფარგლებში იყოს.
- 17.ორფაზა და სამფაზა ელექტროგადაცემებიდან, როცა გადასაცემი სიმძლავრე ერთი და იგივეა, ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზში ძაბვის ვარდნილობა ($U_{თავი}/U_{ბოლო}$) 22,5%-ით მაღალია, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის ხაზში;
- 18.ხაზის რეჟიმის დასაშვები მნიშვნელობიდან გამომდინარე (ძაბვის რეჟიმი ხაზი თავსა და ბოლოში), ორფაზა ელექტროგადაცემა უფრო დაბალი გამტარუნარიანობით ხასიათდება;
- 19.იმ შემთხვევაში, თუ გამოვიყენებთ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემას, რომლის მესამე და მეოთხე სადენი ერთდროულად იქნება უკუსადენი, მაშინ თითოეულ ამ სადენში გაივლის ორჯერ უფრო ნაკლები დენი, ვიდრე სამსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის მესამე სადენში. აქედან გამომდინარე, უკუსადენში ორჯერ შემცირდება ძაბვის ვარდნა და შესაძლებელი იქნება რამდენადმე ავამაღლოთ გადასაცემი სიმძლავრე ანუ გავზარდოთ ხაზის გამტარუნარიანობა.
- 20.გამოთვლებმა აჩვენა, რომ თუ ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის ფაზურ ძაბვას ავიღებთ 1,225-ჯერ მეტს, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის ფაზურ ძაბვას და, ამავე დროს, სადენების განიკვეთს გავზრდით ასევე 1,225-ჯერ, რაც ფაზურ სადენებში დენის ამდენჯერვე გაზრდის საშუალებას გვაძლევს (ამ დროს უკუსადენების განიკვეთი შეიძლება ავიღოთ $(\sqrt{2}/2) \cdot 1,225 \cdot F_{(3)}$ – ის ტოლად), მაშინ ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობა იგივე იქნება, რაც სამფაზა ელექტროგადაცემისა, თუმცა ოთხსადენიან ორფაზა ელექტროგადაცემის ხაზზე ფერადი ლითონის ხარჯის ზრდა თითქმის

39%-ს შეადგენს, ხოლო სიმძლავრის დანაკარგები კი იზრდება 1,58-ჯერ;

21.ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი, რომელზედაც უკუ-სადენები განთავსებულია მეხდამცავი გვარლების პოზოციაში, უფრო ნაკლები სიმაღლისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი. საყრდენთა სიმაღლეში სხვაობა ფაზათაშორისი მანძილის ტოლია ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენის სასარგებლოდ;

22.სადენების ჰორიზონტალური განლაგების შემთხვევაში ოთხსადენიანი ორფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი თითქმის ორჯერ უფრო ნაკლები განისაა, ვიდრე სამფაზა ელექტროგადაცემის საყრდენი. ეს დადებითი ეფექტი მკვეთრ გამოხატულებას იჩენს ზემადალი ძაბვის (330, 500 კვ) ხაზებზე, სადაც სადენები საყრდენებზე როგორც წესი ჰორიზონტალურად არიან განთავსებული. გარდა ამისა, ამ ძაბვის სამფაზა ელექტრო გადაცემის ხაზებზე სამი ცალი კუთხურ-ანკერული საყრდენის ნაცვლად, შეიძლება გამოვიყენოთ ერთი ცალი ოთხსადენიანი ორფაზა საყრდენი. ეს, ერთი მხრივ, იწვევს საყრდენების დამზადების სთვის საჭირო შავი ლითონის ხარჯის შემცირებას და, მეორე მხრივ, მცირდება ხაზის მშენებლობის, მონტაჟისა და ექსპლუატაციის ხარჯები. გარდა ამისა, ხაზის ტრასის განის შემცირება უფრო ამარტივებს ხაზის ტრასის შემერჩევის ამოცანას მთიანი რელიეფის პირობებში.

23.დამუშავებულია ორფაზა/ოთხფაზა ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის პრინციპიალური ელექტრული სქემა, რომელიც საშვალებას მოგვცემს ორფაზა დენის გენერაციით და ერთი ფაზაგარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მეშვეობით მივიღოთ ოთხფაზა ელექტროდენი. იგი გამოირჩევა სიმარტივით და ნაკლები თვითღირებულებით.

24. დამუშავებულია ორგრაგნილიანი-სამფაზა (90° გრადუსიანი ფაზათა ძვრის კუთხის მქონე) ელექტრომანქანა და მისი სამფაზა სისტემაში ჩართვის ელექტრული სქემა იგი უზრუნველყოფს მუშაობის საიმედოობის ამაღლებას რაზედაც მიღებულია პატენტი № U 1926 სასარგებლო მოდელზე.

ლიტერატურა

1. გლობალური ქსელი:

<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%B2> Война токов.

2. Брускин Д.Е. Зорохович А.Е. Хвостов В.С. «Электрические машины и микромашины. Москва. 1971. 430с.

3. Лопухина Е.М. Семенчуков Г.А. «Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ». Москва. 1980. 359с.

4. Водяхо И.М. и др. «Испитания электрических машин и трансформаторов». Ленинград. 1966. 190с.

5. რიკრიკაძე ა. და სხვ. უნივერსალური ბენზოელექტროგენერატორი. სამეცნიერო ჟურნალი; „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“; ტექნიკური უნივერსიტეტი“; №1 (714) -2014. თბილისი. 71–75გვ.

6. Рикрикадзе А. и др. «Результаты исследований самовозбуждающихся асинхронных генераторов». стр. 49-51. XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE “TRANS-MOTAUTO 15. 24-27.06.2015 VARNA BULGARIA ISSN: 1310-3946.

7. რიკრიკაძე ა. დიდჩქარული და ელექტროუსაფრთხო ელექტრომექანიკური ხელსაწყოების დაპროექტების კონცეფცია. ჟურნალი; „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“ №1 (714)–2014. თბილისი. 65–70 გვ.

8. გლობალური ქსელი:

[www.ru.tlhand.pl/pub/File/...// Transformatorowy uklad Skotta](http://www.ru.tlhand.pl/pub/File/...//Transformatorowy%20uklad%20Skotta). Мирослав Лукевски. Трансформаторная система Скотта.

9. რიკრიკაძე ა. მახარაძე გ. „ორგანულიანი სამფაზა ელექტრომანქანა“. სამეცნიერო –ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“ თბილისი. №2 (78*/2016. 55–57გვ.

10. რიკრიკაძე ა. „ორგანულიანი სამფაზა ელექტრომანქანები“. სტუდენტთა 84 –ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის სექცია. თეზისები საკონფერენციო სტატიაზე. თბილისი, 20 ივნისი, 2016.

- 11.Герман Л.А. «Трансформаторы для тягового электроснабжения железных дорог» Москва. 2007. 41с.
12. საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული ცენტრი საქპატენტი. პატენტი სასარგებლო მოდელზე. პატენტის ნომერი და სახეობის კოდი GE U 2017 1926 Y დასახელება: ორგრაგნილიანი სამფაზა ელექტრომანქანა. პატენტმფლობელი და გამომგონებელი: გურამ მახარაძე, არკადი რიკრიკაძე. გამოქვეყნების თარიღი 2017 02 10. განაცხადის ნომერი AU 2016. განაცხადის შეტანის თარიღი 2016 03 09.
- 13.Волдек А.И. «Электрические машины».Ленинград,1974. 839с.
- 14.Адаменко А.И. Кисленко В.И. «Преобразование однофазного тока в многофазный». Киев. 1971. 193-194 с.
15. АКАДЕМИЯ НАУК СССР Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения. Электрические машины малой мощности Хрущев В.В. Гандшу В.М. «Расчет конденсаторных асинхронных электродвигателей имеющих обшую геометрию с трехфазными». Ленинград. 1970.17-36с.
- 16.Лопухина Е.М, Семенчуков Г.Аб «Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. Москва. 1980. 223 с.
- 17.რიკრიკაძე ა. „ორფაზა და სამფაზა ელექტრომანქანების სიმძლავრეთა შესახებ“.სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“ № 1(721) თბილისი 2016 73–75გვ.
- 18.Нейман Л.Р. Демирчян К.С. «Теоретические основы электротехники», Т.1 Ленинград. 1981. - 522 с;
19. Юферов Ф.М. «Электрические машины автоматических устройств» «Высш. Школа», 1976.416с.
- 20.Нейман Л.Р. Демирчян К.С. «Теоретические основы электротехникн», Т.2. Ленинград. 1981. - 407 с;
- 21.«Справочник по проектированию линии электропередачи». Под редакцией Реута М.А. и Рокотяна С.С.- М.: “энергия”,1980.296с.

22. В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков, Л.А. Солдаткина. «Электрические системы, Электрические сети», М., „Высшая школа“, 1971, 440 с;
23. Мельников Н. А. «Электрические сети и системы». М., „Энергия“, 1975, 464 с.
24. გლობალური ქსელი. Seminar Report of Six Phase Transmission System. Published on Jan 31, 2015.
25. Т.Г. Красильникова, В.З. Манусов, «Фазопреобразующий трансформатор для четырехфазных электропередач», Научный вестник НГТУ, - 2010, - № 3(40)).
26. Шуиский В.П. «Расчет электрических машин» Л.:Энергия,1968. 732 стр.
27. რიკრიკაძე ა. „ოთხფაზა ელექტროგადაცემის სადენთა ინდუქციურობა და ტევადობა“. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი“ბიზნეს–ინჟინერინგი“№4. 2016. 250–254გვ.
28. Красильникова Т.Г. Манусов. В.З. Сборник научных трудов НГТУ.-2005.-№ УДК 621.311.001.24 «Обоснование схемы транспозиции четырехфазной линии электропередачи».
29. მახარაძე გ. „ელექტროენერგეტიკული (ელექტრული) სისტემები“ (მეორე გამოცემა), თბილისი, 2015. 470 გვ.
30. Красильникова Т. Г. Автореферат Дисертации. «Разработка четырехфазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния». 2013. «Новосибирский государственный технический университет».
31. Александров Г.Н. «Передача электрической энергии переменным током». – М.: Энергоатомиздат, 1990.176с.
32. Самородов Г.И. «Четырехфазные электропередачи» // Изв. РАН. – Сер. «Энергетика». – 1995. – Вып. 6.,101–109с.
33. გლობალური ქსელი. <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/13.php>
Надежда Бурянина зав. кафедрой «Электроснабжение», Якутский государственный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск. Четырехфазные линии электропередачи, больше мощность, меньше потери.

