

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
კლიმენტი კოხრეიძე

საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში
ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების
რეკომენდაციების შემუშავება

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „ენერგეტიკა და
ელექტროინჟინერია“
შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივლისი, 2016 - წელი

საავტორო უფლება © 2016-წელი კლიმენტი კოხრეიძე
თბილისი
2016 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით კოხრეიძე კლიმენტის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: ტექნ.მეცნ.დოქტორი, პროფესორი შოთა ნემსაძე
რეცენზენტი: ტექნ.მეცნ.დოქტორი, პროფესორი მედგარ გელენიძე
რეცენზენტი: ტექნ.მეცნ.კანდიდატი, ასოც. პროფესორი
გურამ ცხომელიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016 წელი

ავტორი: კოსრეიძე კლიმენტი

დასახელება: საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება.

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

ექსპლუატაცია ნებისმიერი ნომინალური ძაბვის საჰაერო და საკაბელო ხაზების, დაკავშირებულია სიმძლავრის ენერჯის დანაკარგებთან. ხაზებში დანაკარგები დაკავშირებულია ფიზიკური პროცესების განსაკუთრებულობასთან: სადენებში დენის გავლის დროს გამოყოფილი სითბო, არასრულყოფა ხაზების, დაკავშირებული იზოლაციის გავლით დენის გადინებასთან და მთელი რიგი მიზეზები. დანაკარგებს აგრეთვე ადგილი აქვს ტრანსფორმატორებში, ავტოტრანსფორმატორებში, სხვადასხვა დანიშნულების მაკომპენსირებელ მოწყობილობებში და სხვა საქსელო მოწყობილობებში.

სადისერტაციო სამუშაოში განხილულია სიმძლავრის და შესაბამისად ენერჯის დანაკარგები ელექტროგადაცემის შემდეგ ელემენტებში:

- მაღალი და ზემაღალი (220 კვ და მეტი) ძაბვის ხაზებში, რომლებიც აწარმოებენ ელექტროენერჯის გადაცემას და განაწილებას ელექტროსისტემის საკვანძო წერტილებს შორის;

- მაღალი და ზემაღალი ძაბვის მაკომპენსირებელ მოწყობილობებში;

- მაღალი და ზემაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორებში.

ელექტროენერჯის ჯამური დანაკარგების დაახლოებით მეოთხედი ნაწილი მოდის 220 კვ და მეტი ძაბვის ქსელებში.

განხილულია განივი კომპენსაციის როლი სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავებაში.

ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგები ელექტროგადაცემაში.

განხილულია სიმძლავრის დანაკარგები ხაზებში, მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები დანაკარგების ანგარიშისათვის. ნაჩვენებია, რომ დანაკარგები ხაზში პროპორციულია ენერჯის სრული სიმძლავრის ნაკადზე და უქმი სეგლის დანაკარგებზე. დანაკარგების შემცირებისათვის მიზანშეწონილია გადაცემის რეჟიმი ისე უნდა

აიწყოს, რომ გადასაცემი აქტიური სიმძლავრე ნაკლები უნდა იყოს ნატურალურ სიმძლავრეზე. ცვალებადი აქტიური სიმძლავრის პირობებში მიზანშეწონილია რეჟიმების მართვა მარგულირებელი მოწყობილობის საშუალებით, რომლის რიცხვში მნიშვნელოვან ადგილს იკავებს მართვადი განივი კომპენსაცია. ძაბვების განაწილება, უზრუნველყოფს იდეალიზირებულ გადამცემ ხაზებში სიმძლავრის დანაკარგების მინიმუმს. ნაჩვენები, რომ სადენებში შეიძლება შევამცროდ დანაკარგები 8%-ით განივი კომპენსაციის გზით მაქსიმალური დასაშვები ძაბვის ამადლების გარეშე. შესწავლილია სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში. ნაჩვენებია, რომ მართვადი განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში დანაკარგები დამოკიდებულია არა მხოლოდ მათი კონსტრუქციული განსაკუთრებულობაზე, არამედ გადაცემის რეჟიმზე, განსაზღვრული მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მუშაობით. განიხილება სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე. ნაჩვენებია, რომ გვირგვინის წარმოშობის პირობას წარმოადგენს ხაზის ძაბვის გაზრდა კრიტიკულ დონეზე. დადგენილია გადაცემის ძაბვის რეგულირებასა და სიმძლავრის დანაკარგებს შორის კავშირი.

ნაშრომის მეორე თავში განხილულია მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მაჩვენებლები, როგორცაა ხაზის დამმუხტავი სიმძლავრე, ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის დანადგარის განაწილება, ძაბვის ხანგრძლივი ამადლების შეზღუდვა, განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება, მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის სიმძლავრე და მოთხოვნები ღრმა რეგულირებასთან.

ნაშრომის მესამე თავში განხილულია განივი კომპენსაციისათვის მოწყობილობების სახეობები, როგორცაა ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორები, მართვადი რეაქტორები და ტრანსფორმატორები, რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები, კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკები, სინქრონული კომპენსატორები და განივი კომპენსაციისათვის სხვადასხვა სახის მოწყობილობების შეპირისპირება.

ნაშრომის მეოთხე თავში მოცემულია საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების

რეკომენდაციების შემუშავება. ძირითადი ყურადღება მიქცეულია ელექტროგადაცემაში ტექნიკური ხასიათის სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებების გატარებასთან, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციას მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით. განხილულია ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით, დამუშავებულია მისი მათემატიკური მოდელი და შესწავლილია გრაგნილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში. დამუშავებულია ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება. ჩატარებულია ანალიზი შიდა გადამეტაბვების ელექტროგადაცემაში.

Resume

Exploitation of any air or cable lines of nominal power is associated to losses of energy capacity. Losses in the lines are associated to the specialty of physical processes: warm, dedicated during passing the electricity in the cables, incompleteness of lines, associated to draining of the electricity through isolation and a number of reasons. We meet losses as well in the transformers, in auto-transformers, in compensating adjustments of different importance and in various web adjustments.

In the thesis one has discussed losses of capacity and correspondingly the energy in the following elements of energy transmission:

- In the high and super-high (220 KW and higher) voltage lines, which perform transferring and sharing electricity among the key points of the electric system;
- In high and super-high voltage compensating adjustments;
- In high and super-high voltage transformers;

The forth part is in the voltage web of 220 KW and higher. One has discussed the role of transverse compensation in elaborating the references for decreasing the capacity losses.

In the first chapter of the work one has presented losses of capacity and energy in electric transformer. One has discussed capacity losses in lines; one has accepted the general ratios for calculating the losses. It is shown that losses are proportional in the line on full-power energy flow. For decreasing the losses it is important to arrange the transfer regime so, that the active power, to be transferred, must be less than the natural power. In the terms of changing active power it is advisable to rule the regimes by means of regulating adjustment, among which governing transverse compensation has an important role. Voltage sharing secures minimum capacity losses in idealized transforming liens. It is shown that in the cables we can decrease the losses with 8% by the way of transverse compensation without raising the maximal permitted voltage. One has studied losses of power in the adjustments of transverse compensation. It is shown that losses in the adjustments of controlled transverse compensation do not

depend only on their constructive specialty, but on the transforming regime, by means of special compensating adjustments. One has discussed power losses on the crown. It is shown that the cause for crown forming is increasing the line voltage on critical level. Relation between regulating the transferring voltage and power losses is established.

In the second chapter of the work one has discussed technical indexes of controlled transverse compensation, as is the line charging power, sharing the transverse compensation adjustment along the line, limiting the prolonged raising of the power, arranging the transverse compensation adjustment, power of controlled transverse compensation adjustment and demands for deep regulation.

In the third chapter of the work one has discussed some types of transverse compensation adjustments, as are the voltage parameter stabilizers, guided reactors and transformers, reactor-thyristor blocks, condensing-thyristor blocks, synchronic compensators and confrontation of different type adjustments for transverse compensation.

In the fourth chapter of the work one gives the references for decreasing the electricity losses in Georgian energetic system. One pays the attention to the measures of decreasing the power losses of technical character in power transmission, foreseeing modernization of transmission elements by usage of high-temperature, super-transitive materials. One has discussed super-transitive transformer of new generation energetic importance with high technical-economical indexes, one has processed its mathematical model and studied cable power capacity and losses in changing magnetic field. One has processed super-transitive static compensating adjustment of new generation as one of the effective means for decreasing the losses of electric power and voltage stabilization.

შინაარსი

სატიტულო გვერდი	i
ხელმოწერების გვერდი	ii
საავტორო უფლებების გვერდი	iii
რეზიუმე (ორ ენაზე)	iv
ცხრილების ნუსხა	xii
ნახაზების ნუსხა	xiii
სამეცნიერო სიახლე	xvii
ცხრილების ნუსხა.....	xi
შესავალი	xv
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	17
თავი I. სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგები ელექტროგადაცემაში.....	19
1.1. სიმძლავრის დანაკარგები ხაზებში [37].....	19
1.2. ძაბვების განაწილება.....	28
1.3. სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში.....	37
1.4. სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე.....	42
1.5. გადაცემის ძაბვის რეგულირებასა და სიმძლავრის დანაკარგებს შორის კავშირი	45
1.6. გადაცემაში ენერჯის დანაკარგები.....	49
თავი II. მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მაჩვენებლები	51
2.1. ხაზის დამმუხტავი სიმძლავრე.....	51
2.2. ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის დანადგარის განაწილება.....	52
2.3. ძაბვის ხანგრძლივი ამალღების შეზღუდვა	53
2.4. განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება.....	56
2.5. მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის სიმძლავრე და მოთხოვნები ღრმა რეგულირებასთან	57
თავი III. განივი კომპენსაციისათვის მოწყობილობების სახეობები	61
3.1. ზოგადი მონაცემები.....	61
3.2. ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორები.....	64
3.3. მართვადი რეაქტორები და ტრანსფორმატორები	66
3.5. რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები	67
3.5. კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკები.....	68

3.6. სინქრონული კომპენსატორები.....	69
3.7. განივი კომპენსაციისათვის სხვადასხვა სახის მოწყობილობების შეპირისპირება	71
თავი IV. საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება.....	73
4.1. ზოგადი მონაცემები.....	73
4.2. ელექტროგადაცემის არსებული და პერსპექტიული სისტემები.....	77
4.2. ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიური მაჩვენებლებით.....	79
4.3. ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი [28].....	93
4.5. ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება	115
4.6. შიდა გადამეტაბვები ელექტროგადაცემაში	122
დასკვნები.....	126
გამოყენებული ლიტერატურა.....	128

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.1. გვ. 45

ცხრილი 4.1. გვ. 76

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1.1. გვ.23 ხაზის ბოლოს რეაქტიული სიმძლავრის q_2 დამოკიდებულება გადაცემული აქტიური სიმძლავრეზე P_2 .

ნახ.1.2. გვ.27 ხაზის გამტარუნარიანობა, რომელიც შეესაბამება სადენებში მინიმალურ დანაკარგებს (ნომინალური ძაბვების დროს).

ნახ.1.3. გვ.34 ხაზის გასწვრივ ძაბვის ოპტიმალური განაწილება.

ნახ.1.4. გვ.36 რეაქტიული სიმძლავრე იდეალური ხაზის ბოლოებში მინიმალური დანაკარგების რეჟიმში ($U_1 = U_2$).

ნახ.1.5. გვ.39 სიმძლავრის დანაკარგები (მთლიანი ხაზი) და როტორის დენი (პუნქტირით) სინქრონული კომპენსატორის.

ნახ. 1.6. გვ.42 სიმძლავრის დანაკარგები მართვად რეაქტორში მბრუნავი მაგნიტური ველით.

ნახ. 1.7. გვ.48 პრინციპული სქემა ძაბვის რეგულირების მართვადი განივი კომპენსაციით.

ნახ.2.1. გვ.52 მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება ა) ხაზის ბოლოებში; ბ) ხაზის ბოლოებში და შუაში.

ნახ. 2.2. გვ.57 მართვადი განივი კომპენსაციის მიერთების სქემები. ა-ხაზზე ქვესადგურთან ახლოს; ბ- ქვესადგურზე.

ნახ. 2.3. გვ.60 განივი კომპენსაციის დანადგარის კომბინირებული სქემები. ამრ - არამართვადი რეაქტორი; ტ-ტრანსფორმატორი; სკ- სინქრონული კომპენსატორი; მრ-მართვადი რეაქტორი.

ნახ.4.1. გვ.87 ზეგამტარული ტრანსფორმატორის გრაგნილების დაცვა დენშემზღუდველი მოწყობილობის საშუალებით.

ნახ. 4.2. გვ.92 ზეგამტარული ტრანსფორმატორი ცალკე აგზნების გრაგნილით.

ნახ. 4.3. გვ.96 ცალკეული აგზნების გრაგნილით ზგტ-ის გრაგნილის განლაგება.

ნახ. 4.4. გვ.97 ცალკეული აგზნების გრაგნილით ზგტ-ის საანგარიშო სქემა.

ნახ. 4.5. გვ.102 სქემები და ვექტორული დიაგრამები.

ნახ. 4.6. გვ.110 მატრიცის წინაღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე.

ნახ. 4.7. გვ.116 გ/ხ-ში სიმძლავრის ცვლილების სქემები მ.მ-ის გარეშე (ა) და მ.მ-ის დადგმით მომხმარებელთან.

ნახ. 4.8. გვ.121 ზესმმ-ის ელექტრული სქემა და მისი მართვის სისტემა.

დ.ტ. -დენის ტრანსფორმატორი;

ძ.ტ. - ძაბვის ტრანსფორმატორი; $VT_1 - VT_6$ -ტირისტორული ვენტოილები.

სამეცნიერო სიახლე:

1. დამუშავებულია ელექტროგადაცემაში ტექნიკური ხასიათის სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებები, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციას მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით.

2. დამუშავებულია ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით, დამუშავებულია მისი მათემატიკური მოდელი და შესწავლილია გრაფილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.

3. დამუშავებულია ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება.

პრაქტიკული ღირებულება: სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ელექტროგადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციის - დამუშავების დროს.

პუბლიკაციები. სადისერტაციო სამუშაოების შედეგები გამოქვეყნებული იქნა ხუთ სამეცნიერო სტატიაში.

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სტუ-ს სტუდენტთა დია 82-ე (2014 წ.) საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე და აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტში მე-III საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე, ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები (2015 წ.).

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლისა და 4 თავისაგან, რომლებიც გადმოცემულია 130 გვერდზე შეიცავს 18 ნახაზს, 2 ცხრილს და 37 დასახელების ლიტერატურას.

შესავალი

სამუშაოს აქტუალობა. ექსპლუატაცია ნებისმიერი ნომინალური ძაბვის საჰაერო და საკაბელო ხაზების, დაკავშირებულია სიმძლავრის ენერჯის დანაკარგებთან. ხაზებში დანაკარგები დაკავშირებულია ფიზიკური პროცესების განსაკუთრებულობასთან: სადენებში დენის გავლის დროს გამოყოფილი სითბო, არასრულყოფა ხაზების, დაკავშირებული იზოლაციის გავლით დენის გადინებასთან და მთელი რიგი მიზეზები. დანაკარგებს აგრეთვე ადგილი აქვს ტრანსფორმატორებში, ავტოტრანსფორმატორებში, სხვადასხვა დანიშნულების მაკომპენსირებელ მოწყობილობებში და სხვა საქსელო მოწყობილობებში. აქედან გამომდინარე ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება არ კარგავს აქტუალობას.

სამუშაოს მიზანი: დამუშავებული იქნეს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციები. ძირითადი ყურადღება მიქცეული იქნეს ელექტროგადაცემაში ტექნიკური ხასიათის სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებების გატარებასთან, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციას მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით.

ძირითადი ამოცანები: დასახული მიზნის შესაბამისად ფორმულირებული იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. გაანალიზებული იქნეს სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგები ელექტროგადაცემაში. ძაბვების განაწილება, სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში, სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე, გადაცემის ძაბვის რეგულირებასა და სიმძლავრის დანაკარგებს შორის კავშირი.

2. განხილული იქნეს მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მანევრებლები, როგორცაა ხაზის დამმუხტავი სიმძლავრე, ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის დანადგარის განაწილება, ძაბვის ხანგრძლივი ამადლების შეზღუდვა, განივი კომპენსაციის დანადგარის

განლაგება, მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის სიმძლავრე და მოთხოვნები ღრმა რეგულირებასთან.

3. გაანალიზებული იქნეს განივი კომპენსაციისათვის მოწოდებლობების სახეობები, როგორცაა ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორები, მართვადი რეაქტორები და ტრანსფორმატორები, რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები, კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკები, სინქრონული კომპენსატორები და განივი კომპენსაციისათვის სხვადასხვა სახის მოწოდებლობების შეპირისპირება.

4. შემუშავებული იქნეს ელექტროენერჯის ტექნიკური ხასიათის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციები, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციას მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით. განხილული უნდა იქნეს ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით, დამუშავებული იქნეს მისი მათემატიკური მოდელი და შესწავლილი იქნეს გრაფიკების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში. დამუშავებული უნდა იქნეს ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწოდებლობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება.

კვლევის მეთოდები. სადისერტაციო სამუშაოს შესრულებისას გამოყენებული იქნა თეორიული და ემპირიული შემეცნებითი მეთოდები, თეორიულ დონეზე ეს მეთოდი ინდუქციურად დაკავშირებული წრედების თეორია. ემპირიულ დონეზე გამოყენებული იქნა მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

ლიტერატურული მიმოხილვა

ელექტროენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერგეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მომხმარებლების ელექტრომომარაგებისათვის. სხვადასხვა დარგების ენერგოუზრუნველყოფის რიცხობრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება.

ელექტრული ენერჯის დანაკარგები წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად ფაქტორს, რომელიც განსაზღვრავს ეკონომიურ მაჩვენებელს, როგორც ელექტროგადაცემაზე მთლიანად, ისე მისი ცალკეულ ელემენტებში.

ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების მიზნით სამუშაოში განხილულია სიმძლავრის დანაკარგები ელექტროგადაცემის ელემენტებში, როგორცაა გადამცემი ხაზები, მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები დანაკარგების ანგარიშისათვის, შესწავლილია სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში. ნაჩვენებია, რომ მართვადი განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში დანაკარგები დამოკიდებულია არა მხოლოდ მათი კონსტრუქციული განსაკუთრებულობაზე, არამედ გადამცემის რეჟიმზე, განსაზღვრული მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მუშაობით [1-6].

სამუშაოში შესწავლილია მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მაჩვენებლები, როგორცაა ხაზის დამმუხტავი სიმძლავრე, ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის დანადგარის განაწილება, განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება და სხვა.

განხილულია განივი კომპენსაციისათვის მოწყობილობების სახეობები, როგორცაა ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორები, მართვადი რეაქტორები, რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები, კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკები და სხვა [8,9].

დამუშავებულია ელექტროგადაცემაში ტექნიკური ხასიათის სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებები, რომელიც ითვალისწინებს გადაცემის ელემენტების მოდერნიზაციას მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით.

დამუშავებულია ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით, დამუშავებულია მისი მათემატიკური მოდელი და შესწავლილია გრავნილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში. დამუშავებულია ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება [12-37]

თავი I. სიმძლავრის და ენერჯიის დანაკარგები ელექტროგადაცემაში

1.1. სიმძლავრის დანაკარგები ხაზებში [37]

ცვლადი დენის გადამცემ ხაზში ℓ , კმ, სიგრძით, შესაბამისი პარამეტრებით r_o , ომი/კმ, x_o , ომი/კმ, g_o , 1/(ომი.კმ), და b_o , 1/(ომ.კმ), დამყარებული რეჟიმის ძირითადი პარამეტრები (ძაბვა ხაზის ბოლოებში \bar{U}_1 და \bar{U}_2 , დენები \bar{I}_1 და \bar{I}_2) დაკავშირებულია ცნობილი თანაფარდობებით [1]

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_2 \operatorname{ch} \gamma \ell + \sqrt{3} \bar{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma \ell; \\ \bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma \ell + \bar{I}_2 \operatorname{ch} \gamma \ell, \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\text{სადაც } \gamma = \beta + j\alpha = \sqrt{(r_o + jX_o)(g_o + jb_o)} \quad (1.2)$$

- გავრცელების კოეფიციენტი, რად/კმ;

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_o + jX_o}{g_o + jb_o}} = Z_c(\alpha - jb) \quad (1.3)$$

- ხაზის ტალღური წინაღობა, ომი.

$a^2 + b^2 = 1$ და განსახილველი კლასის $U = 220$ კვ ხაზისთვის $a \gg b$. ელექტრული სრული სიმძლავრის ნაკადი სამფაზა სიმეტრიულ სისტემაში

$$\bar{S} = \sqrt{3} \bar{U} \bar{I}^* \quad (1.4)$$

დაუშვათ ხაზის ბოლოს აქტიური სიმძლავრე (P_2) მოცემულია, მოხერხებულია გამოვიყენოთ შემდეგი გამოსახულება ხაზში დანაკარგებისათვის:

$$\Delta P = R_e(\bar{S}_1) - P_2 \quad (1.5)$$

$$\text{სადაც } \bar{S}_1 = \sqrt{3} \bar{U}_1 \bar{I}_1^* \quad (1.6)$$

გავხსნათ (1.5) გამოსახულება (1.1)-ის ჩასმით (1.4)-ში (1.2) და (1.3)-ის გათვალისწინების გზით, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_c \{ (\operatorname{ash} \beta \ell \operatorname{ch} \beta \ell - \operatorname{bsial} \cos \alpha \ell) + P_2 [(\operatorname{sh}^2 \beta \ell \sin^2 \alpha \ell + \operatorname{ch}^2 \beta \ell \cos^2 \alpha \ell - 1) + \\ & (\operatorname{a}^2 - \operatorname{b}^2) (\operatorname{sh}^2 \beta \ell \cos^2 \alpha \ell + \operatorname{ch}^2 \beta \ell \sin^2 \alpha \ell)] - \end{aligned}$$

$$2q_2ab (sh^2\beta l \cos^2\alpha l + ch^2\beta l \sin^2\alpha l) + (P_2^2 + q_2^2)(ash\beta l ch\beta l + bsina l \cos\alpha l)\}, \quad (1.7)$$

$$\text{სადაც } P_2 = \frac{P_2}{P_c} \text{ და } q_2 = \frac{Q_2}{P_c}$$

-ხაზის ბოლოში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე ნატურალური სიმძლავრის წილში. ნატურალური სიმძლავრე (განსაზღვრული ხაზური ძაბვით ხაზის ბოლოს)

$$\bar{S}_c = P_c + jQ_c = U_2^2/Z_c^*$$

სადაც $Z_c = \sqrt{(r_o + jx_o)/(g_o + jb_o)}$ - მუდმივი კომპლექსური სიდიდე, რომელიც ცნობილია ხაზის ტალღური წინაღობით; $r_o, x_o = \omega L_o$; $g_o, b = \omega C_o$ -აქტიური და ინდუქციური წინაღობა, აქტიური და ტევადური გამტარობა შესაბამისად ხაზის ერთეულ სიგრძეზე.

თუ სადენის აქტიური წინაღობა მცირეა, შედარებით ინდუქციურთან ($r_o \ll x_o$), როგორც მას ადგილი აქვს მძლავრ საჰაერო გადამცემ ხაზებში გვირგვინის მოვლენის გათვალისწინების გარეშე ($g_o = 0$), მაშინ ძალაშია შემდეგი გამოსახულება [2]:

$$P_c \approx U_2^2/Z_c; \quad Q_c \approx -P_c r_o/2x_o;$$

(1.7) გამოსახულება შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$\Delta P = P_c[k_1 + k_2P_2 + k_3q_2 + k_4(P_2^2 + q_2^2)] \quad (1.8)$$

$k_1 - k_4$ კოეფიციენტები განისაზღვრება მხოლოდ ხაზის საკუთარი პარამეტრებით (კვეთი და სადენის ტიპი, მათი განლაგება საყრდენზე, ხაზის სიგრძე) და არაა დამოკიდებული გადაცემის რეჟიმზე.

(1.8) დან ჩანს, რომ დანაკარგები ხაზში პროპორციულია ენერჯის სრული სიმძლავრის ნაკადზე და უქმი სვლის დანაკარგებზე, ე.ი. დანაკარგები ხაზში, როცა ბოლო მხარე განთავსებულია ($P_2 = 0$; $q_2 = 0$).

(1.7)-ის შესაბამისად $k_1 - k_4$ კოეფიციენტები ტოლია:

$$k_1 = ash\beta l ch\beta l - bsina l \cos\alpha l;$$

$$k_2 = sh^2\beta l \sin^2\alpha l + ch^2\beta l \cos^2\alpha l - 1 + (a^2 - b^2)sh^2\beta l \cos^2\alpha l + ch^2\beta l \sin^2\alpha l;$$

$$(1.9)$$

$$k_3 = -2ab(sh^2\beta l \cos^2\alpha l + ch^2\beta l \sin^2\alpha l);$$

$$k_4 = ash\beta l ch\beta l + bsina l \cos\alpha l;$$

ამგვარად, სიმძლავრის დანაკარგები ხაზში, რომლის პარამეტრები ცნობილია, განისაზღვრება მოცემული აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეებით ხაზის ბოლოში (1.7) ან (1.8) გამოსახულების საშუალებით.

დაუშვათ ხაზის ბოლოს რეაქტიული სიმძლავრე უცნობია.

მაშინ აუცილებელია ავირჩიოთ საწყის პარამეტრებად რომელიმე სხვა პარამეტრის სიდიდე, მაგალითად ძაბვის მოდული ხაზის დასაწყისში (U_2 იგულისხმება მოცემული) ან კუთხე ძაბვის ვექტორებს შორის ხაზის თავსა და ბოლოში. შემოვიყვანოთ ხაზში ძაბვის ვარდნის ცნება ე.ი. თანაფარდობა ძაბვების მოდულების ხაზის საწყისსა და ბოლოში:

$$\kappa = |\bar{U}_1|/|\bar{U}_2| \quad (1.10)$$

აღნიშნული პარამეტრების ცვალებადობის დიაპაზონი შეადგენს 0,95-1,05 500 კვ და მეტი ძაბვის ხაზისთვის, რაც საგრძნობლად ამარტივებს κ სიდიდის შერჩევას.

(1.1) გამოსახულებიდან, (1.10)-ის გათვალისწინებით, მარტივი გამარტივების შემდეგ მივიღებთ ფორმულას Q_2 -ის განსაზღვრისათვის:

$$Q_2 =$$

$$P_c \left[-\frac{bsh\beta lch\beta l + asina lcosa l}{D} +$$

$$\kappa^2 - ch^2\beta lcos^2\alpha l - sh^2\beta lsin^2\alpha l - -2P_2ash\beta lch\beta l - bsina lcosa lD + bsh\beta lch\beta l + asina lcosa l2D^2 - P_2^2, \quad (1.11)$$

$$\text{სადაც } D = sh^2\beta lcos^2\alpha l + ch^2\beta lsin^2\alpha l.$$

ხაზში სიმძლავრის დანაკარგები, რომელიც შეიცავს κ მნიშვნელობას, შემდეგ პოულობენ (1.7) ან (1.8) გამოსახულებით.

(1.7), (1.8) და (1.11) გამოსახულებები გამომდინარე თავისი სირთულით, წარმოშობს გარკვეულ უხერხულობას პრაქტიკული გამოყენებისათვის.

ეხლა განვიხილოთ ანგარიშის შედარებით გამარტივებული მეთოდი.

განსაკუთრებულობას საჰაერო გადაცემა ხაზის 220 კვ და მეტი ძაბვის წარმოადგენს ის, რომ რეაქტიული ხვედრითი პარამეტრები გაცილებით მეტია აქტიურ პარამეტრებზე: $x_0 \gg r_0$ და $b_0 \gg g_0$. ამიტომ პირველი მიახლოებით შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ აქტიური წინაღობა და გამტარობა ხაზში დენის მოდულზე. ასეთი დაშვების შედეგად (1.2) და (1.3) მკაცრი გამოსახულების ნაცვლად შეიძლება მივიღოთ:

$$\gamma \approx ja \text{ და } Z_c = z_c, \quad (1.12)$$

რის შედეგად გამოსახულება დენისათვის x კმ მანძილზე ხაზის ბოლოდან ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\bar{I}_x = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} [P_2 \cos ax + j(\sin ax - q_2 \cos ax)], \quad (1.13)$$

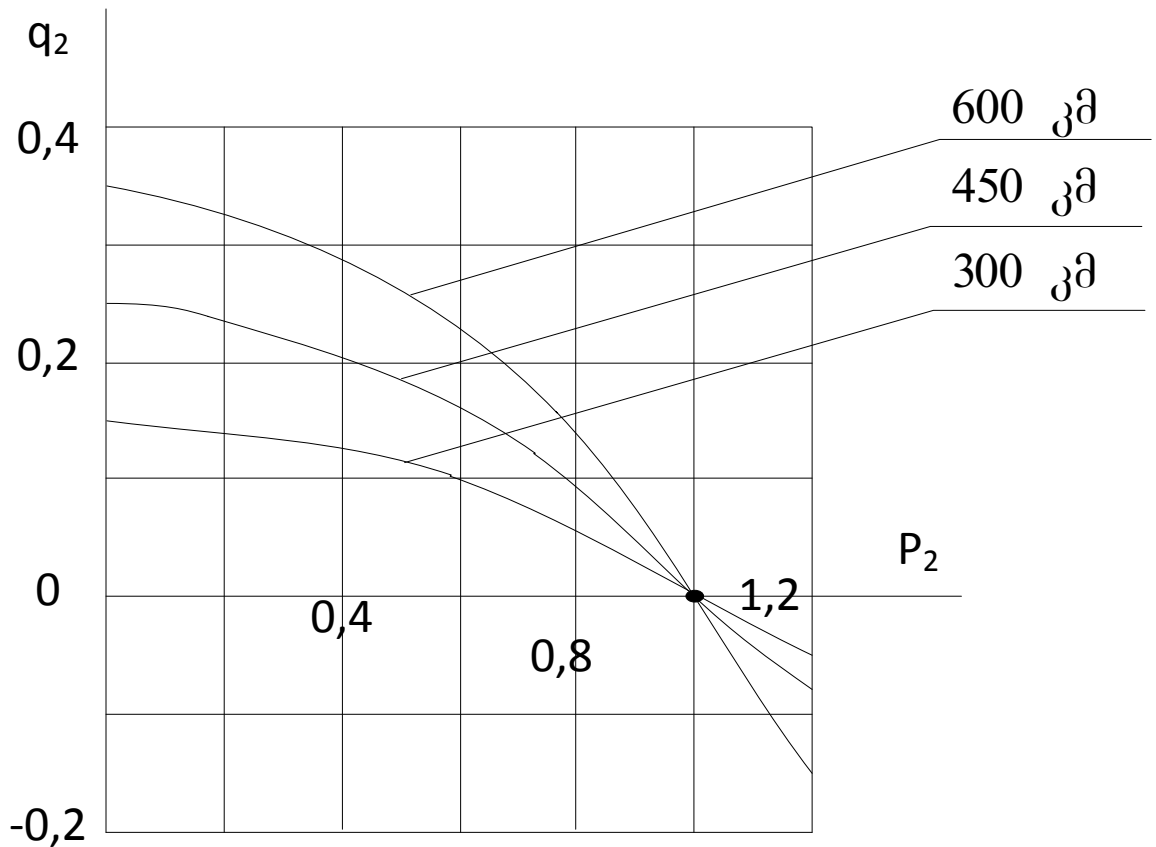
სოლო რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის ბოლოში Q_2 ტოლია

$$Q_2 = P_c \left[\sqrt{\frac{\kappa}{\sin^2 \alpha \ell} - P_2^2} - ctg \alpha \ell \right] \quad (1.14)$$

როცა ხაზის ბოლოებში ძაბვების მოდულები ტოლია, მაშინ $\kappa = 1$, რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის თავში და ბოლოში ერთმანეთის ტოლია. $P < P_c$.

$$Q_1 = Q_2 = P_c \left[\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha \ell} - P_2^2} - ctg \alpha \ell \right] \quad (1.15)$$

როცა აქტიური სიმძლავრე ნაკლებია ხაზის ნატურალურ სიმძლავრეზე, ნატურალური სიმძლავრე წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს (ნახ. 1.1).



ნახ.1.1. ხაზის ბოლოს რეაქტიული სიმძლავრის q_2 დამოკიდებულება გადაცემული აქტიური სიმძლავრეზე P_2 .

ძაბვის ვარდნის დროს რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის დასაწყისში ტოლია:

$$Q_1 = P_c \left[\sqrt{\frac{\kappa^2}{\sin^2 \alpha l} - P_2^2} - \kappa^2 \operatorname{ctg} \alpha l \right] \quad (1.16)$$

როცა $\kappa > 1$ და $P_2 < P_c$ რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის ბოლოს აღმოჩნდება ნაკლები, ვიდრე მომხმარებლის; P_2 -ის გაზრდით ის პირველად აღწევს ნულოვან მნიშვნელობას და იცვლის ნიშანს, ე.ი. იწყებს მიწოდებას ბოლო ქვესადგურის სალტიდან ხაზში. (1.14)-ის ჩასმით (1.13)-ში, მივიღებთ გამოსახულებას, რომელიც განსაზღვრავს ხაზის ნებისმიერ წერტილში დენის დამოკიდებულებას ძაბვის ვარდნასთან ხაზის ბოლოებში:

$$\bar{I}_x = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} \left[P_2 \cos \alpha x + j \left(\sin \alpha x + \operatorname{ctg} \alpha l \cos \alpha x - \cos \alpha x \sqrt{\kappa^2 / \sin^2 \alpha l - P_2^2} \right) \right] \quad (1.17)$$

დამოკიდებულება ხაზის ბოლოში ენერჯის ნაკადის სიმძლავრესა და ძაბვის ვარდნას შორის გამოისახება შემდეგი თანაფარდობით:

$$\aleph = \sqrt{(P_2^2 + q_2^2)\sin^2\alpha\ell + \cos^2\alpha\ell + 2q_2\sin\alpha\ell\cos\alpha\ell} \quad (1.18)$$

$$\Delta P = 3 \int_0^\ell I_x^2 r_o dx \quad (1.19)$$

(1.17)-ის ჩასმით (1.19)-ში და მის ინტეგრირებით, მივიღებთ გამოსახულებას სიმძლავრის დანაკარგებისთვის ხაზში ნებისმიერი რეჟიმის მუშაობის დროს:

$$\Delta P = P_c \frac{r_o \ell}{Z_c} \left[\frac{1}{2} - \frac{\sin^2\alpha\ell}{4\alpha\ell} + \frac{1-\cos^2\alpha\ell}{2\alpha\ell} \times \left(\operatorname{ctg}\alpha\ell - \sqrt{\frac{\aleph^2}{\sin^2\alpha\ell} - P_2^2} \right) + \left(\frac{1}{2} + \sin 2\alpha\ell 4\alpha\ell \operatorname{ctg} 2\alpha\ell + \aleph 2\sin 2\alpha\ell - 2\operatorname{ctg}\alpha\ell \aleph 2\sin 2\alpha\ell - P_2^2 \right) \right] \quad (1.20)$$

(1.20) გამოსახულება გარდაქმნის შემდეგ წარმოვიღებთ შემდეგი სახით

$$\Delta P = P_c \frac{r_o \ell}{Z_c} \left[A - B \sqrt{\frac{\aleph^2}{\sin^2\alpha\ell} - P_2^2} \right], \quad (1.21)$$

$$\text{სადაც } A = (\aleph^2 + 1) \left[\frac{1}{2\sin^2\alpha\ell} + \frac{\operatorname{ctg}\alpha\ell}{2\alpha\ell} \right];$$

$$B = [\operatorname{ctg}\alpha\ell + 1/\alpha\ell] \quad (1.22)$$

- კოეფიციენტები, რომლებიც დამოკიდებულია ხაზის პარამეტრებზე და მასში ძაბვის ვარდნებზე.

(1.21) გამოსახულება იძლევა შესაძლებლობას ვიპოვოთ მოცემული აქტიური სიმძლავრის P_2 შესაბამისი დანაკარგები სადენში.

თუ რეჟიმის საწყისი პარამეტრების რიცხვში გამოიყენება აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე გადაცემის ბოლოში, მაშინ დანაკარგების ანგარიშებისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს (1.18) ფორმულა. მისი (1.19)-ში ჩასმით და ინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ:

$$\Delta P = P_c \frac{r_o \ell}{2Z_c} \left[(P_2^2 + q_2^2) \left(1 + \frac{\sin 2\alpha\ell}{2\alpha\ell} \right) + \left(1 - \frac{\sin 2\alpha\ell}{2\alpha\ell} \right) - q_2 \frac{2\sin^2\alpha\ell}{\alpha\ell} \right]. \quad (1.23)$$

განვიხილოთ დამოკიდებულება ხაზში დანაკარგების, გადაცემის რეჟიმის საწყისი პარამეტრების ვარიაციისაგან: $Q_2; U_2; \kappa$.

- გადაცემაში (κ) ძაბვის ვარდნა. (1.21)-ის დიფერენცირებით κ -ის მიხედვით და ნულთან გატოლებით მივიღებთ წარმოებულს:

$$\frac{d(\Delta P)}{d\kappa} = P_c \frac{r_o \ell}{Z_c} \left[\kappa \left(\frac{1}{\sin^2 \alpha \ell} + \frac{ctg \alpha \ell}{\alpha \ell} \right) - \frac{ctg \alpha \ell + 1/\alpha \ell}{\sin^2 \alpha \ell} \frac{\kappa}{\sqrt{\frac{\kappa^2}{\sin^2 \alpha \ell} - P_2^2}} \right] = 0,$$

საიდანაც

$$\kappa_{\text{ოპტ.}} = \sin \alpha \ell \sqrt{\left(\frac{ctg \alpha \ell + 1/\alpha \ell}{1 + \sin 2\alpha \ell / (2\alpha \ell)} \right)^2 + P_2^2} \quad (1.24)$$

როგორც (1.24)-დან გამომდინარეობს ძაბვის ვარდნის ოპტიმალური მნიშვნელობა გადაცემაში იცვლება აქტიური სიმძლავრის ცვლილების დროს, სახელდობრ იზრდება კვალდაკვალ P_2 -ის ზრდასთან და მით მნიშვნელოვნად, ვიდრე გრძელი ხაზი. ამგვარად, გრძელი ხაზისთვის 600 კმ გადაცემული სიმძლავრის გაზრდის დროს, ნულიდან $P_2 = P_c$ ოპტიმალური მნიშვნელობა ძაბვის ვარდნის, იცვლება 1,0-დან 1,1-მდე; შედარებით მოკლე ხაზისთვის სიგრძით 350 კმ იგივე გადაცემული სიმძლავრის დროს κ -ს ცვლილების დიაპაზონი ვიწროვდება 1,0-1,04-მდე. უნდა აღინიშნოს, რომ κ -ს ოპტიმალური მნიშვნელობიდან გადახრით დანაკარგების გაზრდა აღმოჩნდება უმნიშვნელო, რაც დაკავშირებულია მეტად დამრეცი ხასიათის, მათი ცვლილების აღნიშნული სიდიდის ვარიაციის დროს. საშუალოდ ხაზისთვის სიგრძით 500-600 კმ-მდე თითოეული პროცენტით გადახრა κ -ის მისი ოპტიმალური მნიშვნელობიდან დანაკარგები ხაზში იზრდება 0,2-0,3%-ით.

- ძაბვა. ელექტროგადაცემის ბოლოებში ძაბვის მნიშვნელობა ზემოქმედებს რეჟიმის ყველა პარამეტრებზე, მათ შორის ხაზში სიმძლავრის დანაკარგებზე. აღნიშნული გავლენის შეფასებისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ (1.21) გამოსახულება შეცვლილი სახით:

$$\Delta P = \frac{r_o \ell}{Z_c} \left[A \frac{U_2^2}{Z_c} - B \sqrt{\frac{\kappa^2 U_2^4}{Z_c^2 \sin^2 \alpha \ell} - P_2^2} \right], \quad (1.25)$$

სადაც P_2 -აქტიური სიმძლავრე, მგვტ; U_2 -ძაბვა, კვ; A და B კოეფიციენტები, დამოკიდებული მხოლოდ ხაზის პარამეტრებისაგან. P_2 -აქტიური სიმძლავრის თითოეულ მნიშვნელობას შეესაბამება U_2 -ძაბვის გარკვეული მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ადგილი აქვს სადენებში დანაკარგების მინიმალურ მნიშვნელობას.

$d\Delta P/dU_2$ წარმოებულის ნულთან გატოლებით, მივიღებთ:

$$\frac{r_0 \ell}{Z_c} \left[\frac{2U_2}{Z_c} A - 4\kappa^2 U_2^3 \beta \left(2Z_c^2 \sin^2 \alpha \ell \sqrt{\frac{\kappa^2 U_2^4}{Z_c^2 \sin^2 \alpha \ell} - P_2^2} \right)^{-1} \right] = 0, \quad (1.26)$$

საიდან, როცა $\kappa = 1$, გვექნება:

$$U_2^4 = \frac{P_2^2 Z_c^2 A^2 \sin^4 \alpha \ell}{A^2 \sin^2 \alpha \ell - B^2} \quad (1.27)$$

(1.27) გამოსახულება მოხერხებულია წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$U_2 = m \sqrt{P_2}, \quad (1.28)$$

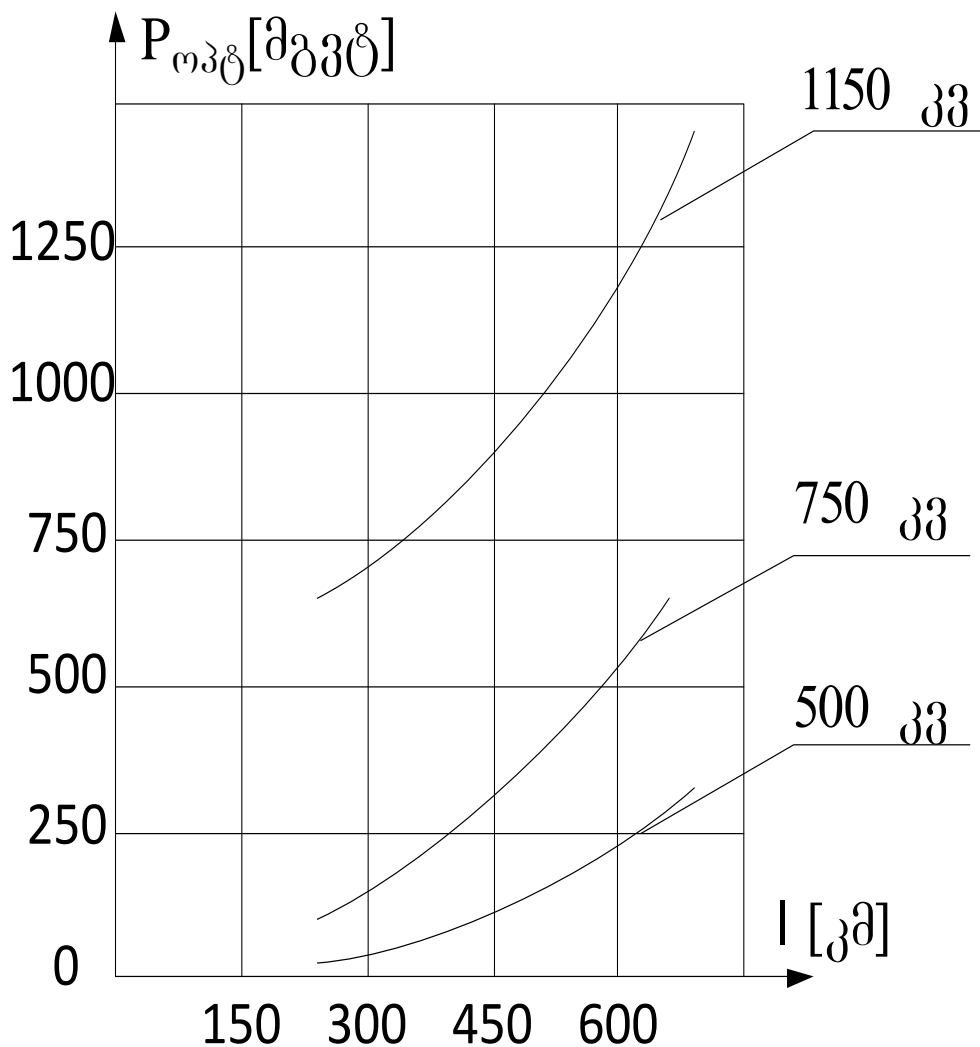
$$\text{სადაც } m = \sin \alpha \ell \sqrt{AZ_c / \sqrt{A^2 \sin^2 \alpha \ell - B^2}} \quad (1.29)$$

- კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია მხოლოდ ხაზის პარამეტრებზე.

(1.28)-დან ჩანს, რომ ძაბვა, რომელიც უზრუნველყოფს სადენებში დანაკარგის მინიმუმს, უნდა იცვლებოდეს ფართო ზღვრებში გადასაცემი აქტიური სიმძლავრის ცვლილების დროს. ნომინალური ძაბვები თანამედროვე ელექტრული სისტემების - 500, 750 და 1150 კვ - წარმოადგენენ ოპტიმალურს დანაკარგების მიმართ სადენებში, მხოლოდ როცა შედარებით ელექტროგადაცემის სუსტი დატვირთვის დროს, როცა ის არ აჭარბებს 600-700 კმ სიგრძის ხაზებისათვის 0,35-0,5 მნიშვნელობას ნატურალური სიმძლავრის და მნიშვნელოვნად მცირე მოკლე ხაზებისათვის.

ნახ. 1.2-ზე P, ℓ კოორდინატებში ნაჩვენებია მრუდები, რომლებიც შეესაბამება ნომინალურ ძაბვებს და გვიჩვენებს როგორი დატვირთვის და გადაცემის სიგრძის შერწყმით აღნიშნული ძაბვები უზრუნველყოფენ სადენებში მინიმალურ დანაკარგებს. ნახ. 1.2-ის ზედა მრუდზე ძაბვა უნდა იყოს ნომინალურზე დიდი, ქვედა მრუდზე ნომინალურზე ნაკლები, რომლებიც უზრუნველყოფს მოცემულ რეჟიმში მინიმალურ დანაკარგებს. მრუდები, მოცემული ნახ. 1.2, იძლევა შესაძლებლობას მივიღოთ წარმოდგენა მიზანშეწონილობაზე ძაბვების დონის ცვლილებაზე სადენებში დანაკარგების შემცირების მიზნით. მთელი რიგი მოსაზრებების მიხედვით ძაბვების ცვლილება გადაცემის ბოლოებში დასაშვებია ვიწრო ზღვრებში.

-რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის ბოლოში. რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობა და ნიშანი ხაზის ბოლოში ახასიათებს გადაცემის მუშაობის რეჟიმს და მასში დანაკარგებს.



ნახ. 12. ხაზის გამტარუნარიანობა, რომელიც შეესაბამება სადენებში მინიმალურ დანაკარგებს (ნომინალური ძაბვების დროს)

(1.23) გამოსახულება განსაზღვრავს დამოკიდებულებას ხაზში დანაკარგებსა მოცემული ძაბვის დროს ხაზის ბოლოში, რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობაზე და ნიშანზე გადაცემის აღნიშნულ წერტილში. რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება ხაზში მინიმალურ დანაკარგებს, შეიძლება ვიპოვოთ ΔP -ს წარმოებულის q_2 -ით ნულთან გატოლებით:

$$\frac{d(\Delta P)}{dq_2} = P_c \frac{r_o \ell}{2Z_c} \left[2q_2 \left(1 + \frac{\sin 2\alpha \ell}{2\alpha \ell} \right) - \frac{2\sin^2 \alpha \ell}{\alpha \ell} \right] = 0 \quad (1.30)$$

საიდანაც

$$q_2, \text{ ოპტ} = \frac{\sin^2 \alpha \ell}{\sin \alpha \ell \cos \alpha \ell + \alpha \ell} \quad (1.31)$$

1000 კმ-მდე სიგრძის ხაზისათვის მინიმალურ დანაკარგებს აქვს ადგილი გარკვეული რეაქტიული სიმძლავრის დროს მიწოდებული ხაზიდან ბოლო სისტემაში ($q_2, \text{ ოპტ} > 0$).

ამგვარად, დანაკარგების შემცირებისთვის მიზანშეწონილია გადაცემის რეჟიმი ისე ავაწყოთ, რომ გადასაცემი აქტიური სიმძლავრე ნაკლები უნდა იყოს ნატურალურ სიმძლავრეზე.

ავღნიშნოთ, რომ რეაქტიული სიმძლავრის გადატანა გადაცემის ბოლო სისტემაში დაკავშირებულია დანაკარგების გაზრდასთან. ამიტომ რეჟიმის ძაბვის ოპტიმიზაცია დანაკარგების მინიმალური პირობის მიხედვით რეალურ პირობებში სრულდება მთლიანად ქსელისათვის.

განხილული დამოკიდებულება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების სადენებში რეჟიმის პარამეტრებისგან გვიჩვენებს, რომ ცვალებადი აქტიური სიმძლავრის პირობებში მიზანშეწონილია რეჟიმების მართვა მარეგულირებელი მოწყობილობის საშუალებით, რომლის რიცხვში მნიშვნელოვანი ადგილს იკავებს მართვადი განივი კომპენსაცია.

მართვა განივი კომპენსაციით ცვლის ძაბვას ქსელში ისე, რომ მიიღწევა დანაკარგების შემცირება.

1.2. ძაბვების განაწილება

ძაბვების განაწილება, უზრუნველყოფს იდეალიზირებულ გადამცემ ხაზებში სიმძლავრის დანაკარგების მინიმუმს. წინა პარაგრაფში აღნიშნული იყო, რომ ხაზის ბოლოებში ნომინალური ძაბვის დროს ფარდობითი მინიმალური დანაკარგები მიიღება, როცა გადასაცემი აქტიური სიმძლავრე, ნაკლებია ნატურალურ სიმძლავრეზე. შესაბამის ძაბვის განაწილების გასაგებად ხაზის გასწვრივ განვიხილოთ იდეალიზირებული გადაცემა ℓ , კმ სიგრძით, მოცემული ძაბვებით ხაზის ბოლოებში და განაწილებული სიგრძის მიხედვით მართვადი განივი

კომპენსაციით. სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში ასეთი იდეალიზირებულ გადაცემაში წარმოადგენს დანაკარგების ქვედა ზღვარს, რომლისთვისაც იქნება მიახლოებული დანაკარგები სადენებში რეალურ გადაცემაში მაკომპენსირებული მოწყობილობით. დანაკარგები განივი მაკომპენსირებულ მოწყობილობაში, აგრეთვე დანაკარგები გვირგვინზე მხედველობაში არ მიიღება.

განტოლებას, რომელიც აკავშირებს ძაბვას და დენს dx ხაზის ელემენტის ნებისმიერ წერტილში, ჩაწერილი კომპლექსური ფორმით, გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{U}}{dx} &= [r_o + jX_o]\bar{I} \\ \frac{d\bar{I}}{dx} &= j[b_o + b'_o]\bar{U} = j b_x \bar{U}, \end{aligned} \right\} (1.32)$$

სადაც r_o, X_o, b_o -ხაზის ხვედრითი პარამეტრები; b'_o -ხვედრითი რეაქტიული გამტარობა, რომელმაც შეიძლება მიიღოს უარყოფითი (ინდუქციური) ან დადებითი (ტევადური) მნიშვნელობა, განპირობებული განაწილებული განივი კომპენსაციის მოწყობილობით.

დანაკარგები ხაზის სადენებში პროპორციულია დენის მოდულის კვადრატის და არაა დამოკიდებული მის ფაზისგან. ხაზის ნებისმიერ წერტილში დენის მოდულის განსაზღვრისათვის გარდავქმნათ (1.32) გამოსახულება შემდეგი აღნიშვნების გამოყენებით:

$$\bar{U} = U_x e^{j\delta x}; \quad \bar{I} = I_x e^{j\xi x} \quad (1.33)$$

სადაც $U_x, I_x, \delta_x, \xi_x - x$ სივრცული კოორდინატის ფუნქციები, ათვლილი გადაცემის მიმდების ბოლოს.

(1.33)-ის ჩასმის შემდეგ (1.32)-ის პირველი დიფერენციალური განტოლებაში მივიღებთ:

$$\frac{dU_x}{dx} e^{j\delta x} + j e^{j\delta x} U_x \frac{d\delta_x}{dx} = (r_o + jX_o) I_x e^{j\xi x} \quad (1.34)$$

გადავიდეთ მაჩვენებლიანი ჩაწერის ფორმიდან ტრიგონომეტრიულ ფორმაში, მივიღებთ ნამდვილი და წარმოსახვითი მდგენელებისთვის შემდეგი გამოსახულებებს:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_x}{dx} \cos\delta_x - U_x \frac{d\delta_x}{dx} \sin\delta_x &= I_x (r_o \cos\xi_x - X_o \sin\xi_x); \\ \frac{dU_x}{dx} \sin\delta_x + U_x \frac{d\delta_x}{dx} \cos\delta_x &= I_x (r_o \sin\xi_x + X_o \cos\xi_x) \end{aligned} \right\} (1.35)$$

(1.35)-დან შეიძლება ვიპოვოთ გამოსახულება დენის მოდულის კვადრატისათვის:

$$I_x^2 = \frac{1}{r_o^2 + X_o^2} \left[\left(\frac{dU_x}{dX} \right)^2 + U_x^2 \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 \right] \quad (1.36)$$

ხაზის ერთი ფაზის სადენებში დანაკარგები ტოლია:

$$\Delta P = \int_0^\ell I_x^2 r_o dX = \frac{r_o}{r_o^2 + X_o^2} \int_0^\ell \left[\left(\frac{dU_x}{dX} \right)^2 + U_x^2 \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 \right] dX \quad (1.37)$$

(1.37) გამოსახულება განსაზღვრავს დანაკარგებს ℓ , კმ სიგრძის აქტიურ წინაღობაში, შემდგომში გამოიყენება ძაბვის ოპტიმალური განაწილებისათვის ხაზის გასწვრივ.

დანაკარგები სადენებში, როგორც ეს ჩანს (1.37) დან დამოკიდებულია U_x და δ_x ცვლადებზე, თითოეული მათგანი თავის მხრივ წარმოადგენს ფუნქციას X დამოუკიდებელი ცვლადის. დამოკიდებული ცვლადები U_x და δ_x დაკავშირებულია ერთმანეთთან დიფერენციალური განტოლებით, რომლის სახე შეიძლება ვიპოვოთ (1.32)-ის პირველი განტოლებიდან.

კომპლექსური ძაბვის \bar{U} მეორე წარმომავალი დამოუკიდებელი X ცვლადის მიხედვით ტოლია:

$$\frac{d^2 \bar{U}}{dX^2} = (r_o + jX_o) \frac{d\bar{I}}{dX} = j(r_o + jX_o) b_x \bar{U} \quad (1.38)$$

(1.38) გამოსახულების მარცხენა ნაწილში $\bar{U} = U_x e^{j\delta_x}$ -ის ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$\frac{d^2 \bar{U}}{dX^2} = \frac{d^2 U_x}{dX^2} e^{j\delta_x} - U_x \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 e^{j\delta_x} + j \left(2 \frac{dU_x}{dX} \frac{d\delta_x}{dX} + U_x \frac{d^2 \delta_x}{dX^2} \right) e^{j\delta_x} \quad (1.39)$$

კავშირის საძიებო განტოლება

$$\frac{d^2 U_x}{dX^2} - U_x \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 + \frac{X_o}{r_o} \left(2 \frac{dU_x}{dX} \frac{d\delta_x}{dX} + U_x \frac{d^2 \delta_x}{dX^2} \right) = 0 \quad (1.40)$$

ხაზის სადენებში მინიმალური დანაკარგების ამოცანა დადის კლასიკური ვარიაციული ამოცანაზე და შეიძლება ამოიხსნას ცნობილი ეილერის განტოლებებით, რომელსაც უნდა აკმაყოფილებდეს საძიებო ფუნქციები U_x და δ_x ექსტრემალური ΔP რეალიზაციისთვის, ე.ი. ინტეგრალი (1.37).

აღნიშნული მიზნისათვის გამოიყენება ორი განტოლება ეილერის:

$$F_u - \frac{d}{dX} F_{U'} = 0 \text{ და } F_\delta - \frac{d}{dX} F_{\delta'} = 0, \quad (141)$$

სადაც $F_U, F_{U'}, F_\delta, F_{\delta'}$ - კერძო წარმოებულები ინტეგრალის ქვეშ ფუნქციების, რომლებიც ღებულობენ შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$F_U = 2U_x \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2; F_{U'} = 2 \frac{dU_x}{dX}; F_\delta = 0; F_{\delta'} = 2U_x^2 \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right) \quad (142)$$

(142)-ის ჩასმით (141)-ში, მივიღებთ:

$$\frac{d^2 U_x}{dX^2} - U_x \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 = 0 \quad (143)$$

$$2U_x \frac{dU_x}{dX} \frac{d\delta_x}{dX} + U_x^2 \frac{d^2 \delta_x}{dX^2} = \frac{d}{dX} \left(U_x^2 \frac{d\delta_x}{dX} \right) = 0 \quad (144)$$

(144)-დან ჩანს, რომ $U_x^2 \frac{d\delta_x}{dX} = C$, სადაც C -ინტეგრირების მუდმივა, რაც მოგვიწოდებს გამოვრიცხოთ δ_x ცვლადი (137) გამოსახულებიდან, რომლის შემდეგ (137) გადაიწერება შემდეგ სახეში

$$\Delta P = \frac{r_0}{r_0^2 + X_0^2} \int_0^t \left[\left(\frac{dU_x}{dX} \right)^2 + \frac{C^2}{U_x^2} \right] dX \quad (145)$$

ინტეგრირების მუდმივა C შეიძლება გამოისახოს აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრით ხაზის მიმდების ბოლოს ($\delta_x = 0$); ამისათვის (135)-ის მეორე განტოლების ორივე მხარეს გავამრავლებთ U_x -ზე:

$$\left(U_x^2 \frac{d\delta_x}{dX} \right)_{x=0} = C = X_0 P_2 + r_0 Q_2 \quad (146)$$

აქ რეაქტიული სიმძლავრე Q_2 ითვლება დადებითი, თუ ის მიეწოდება ხაზიდან ბოლო ქვესადგურის სალტეზე.

ვიღერის მეორე განტოლების გამოყენებით, მივიღებთ (145)-დან მეორე რიგის არახაზოვან დიფერენციალურ განტოლებას U_x საძიებო ცვლადის მიმართ:

$$\frac{d^2 U_x}{dX^2} + \frac{(X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}{U_x^3} = 0 \quad (147)$$

ზოგადი ამონახსნი (147) განტოლების ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$U_x = \sqrt{C_1 (X + C_2)^2 - \frac{1}{C_1} (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}, \quad (148)$$

სადაც C_1 და C_2 - ინტეგრირების მუდმივები, რომლებიც მოიძებნება (148)-დან გამომდინარე იქედან, რომ ხაზის ბოლო მიმდებზე ($X=0$) $U_x = U_2$, ხოლო საწყის ბოლოზე ($x = \ell$) $U_x = U_1$. შესაბამისად მივიღებთ:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{\ell^2} \left[U_1^2 + U_2^2 - 2\sqrt{U_1^2 U_2^2 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2} \right] \\ C_2 &= \frac{\ell}{2} \left[\frac{U_1^2 - U_2^2}{U_1^2 + U_2^2 - 2\sqrt{U_1^2 U_2^2 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}} - 1 \right] \end{aligned} \right\} (1.49)$$

ცვლადი დენის მძლავრი და გრძელი ხაზები ჩვეულებრივ ექსპლუატაციაში იმყოფებიან ტოლი ძაბვებით ხაზის ბოლოებში, ე.ი. $U_1 = U_2$ ამ შემთხვევაში გამოსახულება C_1 და C_2 მარტივდება:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{2}{\ell^2} \left[U_2^2 - \sqrt{U_2^4 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2} \right] \\ C_2 &= -\ell/2 \end{aligned} \right\} (1.50)$$

(1.50)-ის ჩასმით (1.48)-ში განესაზღვრავთ საძიებო ძაბვის განაწილებას ხაზის გასწვრივ, რომელიც უზრუნველყოფს მოცემული აქტიური სიმძლავრის დროს გადაცემის მინიმალურ დანაკარგებს სადენებში:

$$U_x^2 = \frac{(X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}{\sqrt{U_2^4 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2} - U_2^2} \frac{\ell^2}{2} - \left[\sqrt{U_2^4 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2} - U_2^2 \right] \frac{2}{\ell^2} \left(\frac{2x - \ell}{2} \right)^2 \quad (1.51)$$

ხაზის ბოლოებში ერთი და იგივე ძაბვის დროს გადაცემის შუა წერტილში $X = \ell/2$ მყარდება ძაბვის ექსტრემუმი. ძაბვის ცვალებადობა ხაზის გასწვრივ მიმდინარეობს პარაბოლური კანონის მიხედვით.

(1.51) გამოსახულება შეიძლება გამარტივდეს, თუ მხედველობაში არ მივიღებთ აქტიური წინაღობის გავლენას ძაბვის ცვლილების ხასიათზე ხაზის გასწვრივ. დაუშვათ $r_0 = 0$, მაშინ (1.51)-ის ნაცვლად მივიღებთ:

$$\left(\frac{U_x}{U_2} \right)^2 = K^2 - (K^2 - 1) \left(\frac{2x}{\ell} - 1 \right)^2 \quad (1.52)$$

სადაც $K = U_{e/2}/U_2$ -ხაზში ძაბვის მაქსიმალური ჯერადობა. ნახ. 1.3. მოცემულია U_x მრუდების ოჯახი, აგებული (1.52) განტოლების მიხედვით სხვადასხვა სიგრძის ხაზისათვის ძაბვით 1150 კვ ხვედრითი პარამეტრებით:

$r_0 = 0,0135$ ომი/კმ; $X_0 = 0,268$ ომი კმ; $b_0 = 4,45 \cdot 10^{-6}$ (ომი.კმ)⁻¹
როცა $P_2 = P_c$.

როგორც ნახ. 1.3-დან ჩანს დანაკარგების შემცირება სადენებში მიიღწევა ძაბვის ამალღების შედეგად ხაზის შუალედურ წერტილებში, ბოლოებში ძაბვების მიმართ. განივი კომპენსაციის არ არსებობის დროს

ან ძაბვის თანაბარი განაწილებით გადაცემის გასწვრივ ძაბვა რჩება პრაქტიკულად უცვლელი.

ხაზისათვის, რომლის სიგრძე აჭარბებს 600 კმ, ძაბვის ამალგება გამოდის დასაშვები ზღვრების (+5%) გარეთ. ასეთ გადაცემაში მინიმალური დანაკარგების რეჟიმში როცა $P_2 = P_c$ არ შეიძლება განხორციელდეს ხაზის იზოლაციის გაძლიერების გარეშე. გადაცემის მცირე სიმძლავრის დროს ($P_2 \ll P_c$) ძაბვა ხაზის შუა წერტილში მინიმალური დანაკარგების რეჟიმში უნდა იყოს დაბალი, ვიდრე ძაბვა ხაზის ბოლოებში. სადენებში მინიმალური დანაკარგების დასადგენად განივი კომპენსაციის განაწილების კანონის დასადგენად გაუტოლოდ (1.38) და (1.39) გამოსახულებების ნამდვილი ნაწილები:

$$\frac{d^2 U_x}{dX^2} - U_x \left(\frac{d\delta_x}{dX} \right)^2 = -X_0 b_x U_x \quad (1.53)$$

შემდეგ, (1.53)-ში ჩავსვათ $\frac{d\delta_x}{dX}$ მნიშვნელობა (1.46)-დან, მივიღებთ:

$$\frac{d^2 U_x}{dX^2} - \frac{X_0 P_2 + r_0 Q_2}{U_x^3} = -X_0 b_x U_x \quad (1.54)$$

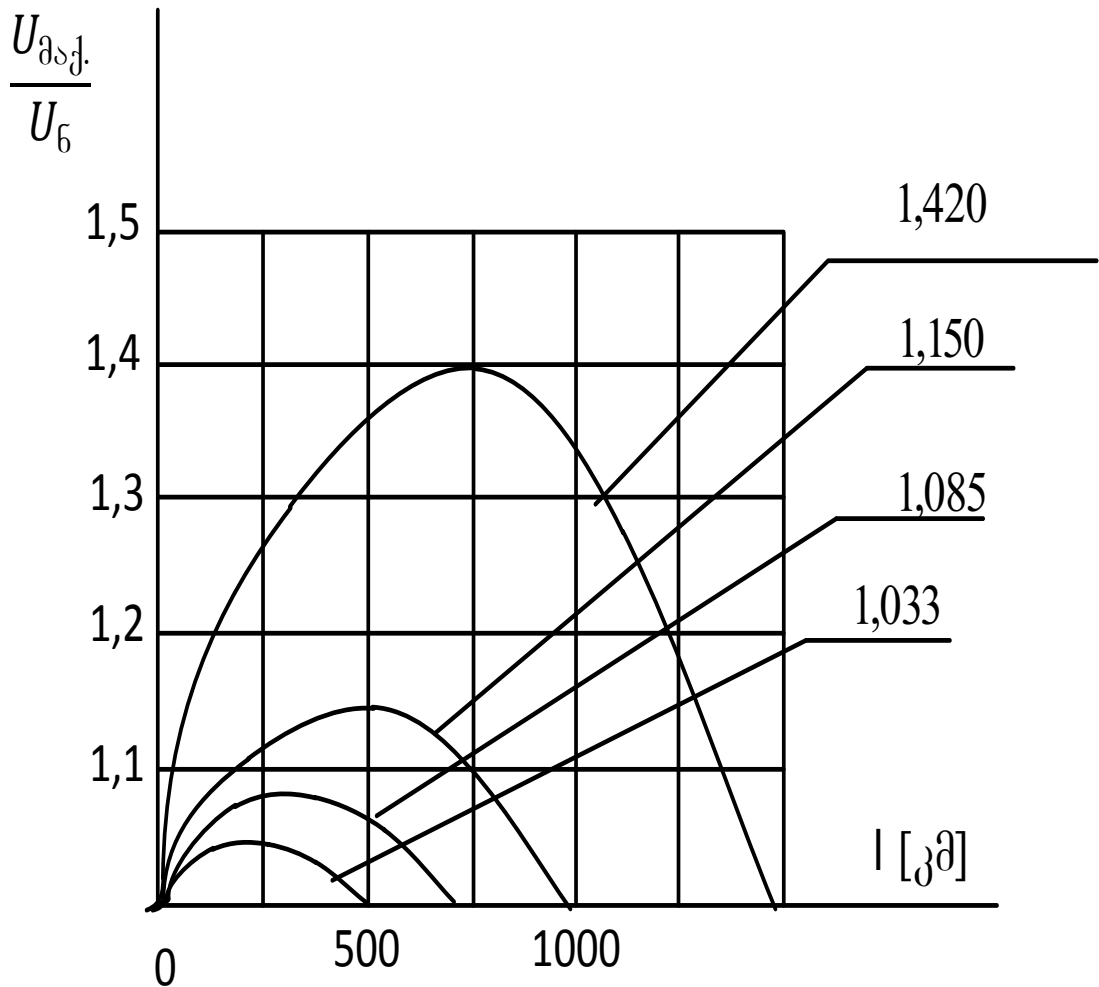
(1.47)-დან $d^2 U_x / dX^2$ მნიშვნელობის ჩასმით (1.54)-ში ვპოულობთ:

$$b_x = \frac{2}{X_0} \frac{(X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}{U_x^4}, \quad (1.55)$$

საიდანაც საძიებო b'_x მნიშვნელობა ტოლია:

$$b'_x = \frac{2}{X_0} \frac{(X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2}{U_x^4} - b_0, \quad (1.56)$$

სადაც U_x -ხაზის ბოლოდან X მანძილზე ძაბვის მნიშვნელობა, განისაზღვრება (1.51)-ის ან (1.52)-ის მიხედვით.



ნახ. 1.3. ხაზის გასწვრივ ძაბვის ოპტიმალური განაწილება
 თუ ავლნიშნავთ $K_x = U_x/U_2$, მაშინ (1.56) გამოსახულება შეიძლება
 გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$b'_x = b_o \left[\left(\frac{P_2}{P_c} \right)^2 \frac{2}{K_x^4} \left(1 + \frac{r_o Q_2}{X_o P_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (1.57)$$

ხაზში ძაბვის ამაღლების ჯერადობის დროს

$$K'_x = 1,19 \sqrt{\frac{P_2}{P_c} + \frac{r_o Q_r}{X_o P_c}} \quad (1.58)$$

სიდიდე b'_x უახლოვდება ნულს; ეს ნიშნავს, რომ ხაზის მოცემულ
 წერტილში განივი კომპენსაციას განსახილველ რეჟიმში არ საჭიროებს.
 ხაზის იმ წერტილებსათვის, სადაც $K_x > K'_x$, საჭიროა ინდუქციური
 ხასიათის განივი კომპენსაცია, როცა $K_x < K'_x$, - საჭიროა ტევადური
 ხასიათის განივი კომპენსაცია. ამგვარად, მინიმალური დანაკარგების

რეჟიმის უზრუნველყოფისათვის ხაზის სადენებში მართვადი განივი კომპენსაციის მოწყობილობა უნდა ჩაირთოს არა მხოლოდ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილებისთვის, არამედ მისი ნიშნის ცვლილებითაც.

თუ $K'_x < 1$, რაც შეიძლება მოხდეს $P_2 < P_c$ პირობებში, მაშინ მართვადი განივი კომპენსაციას ხაზის ყველა წერტილებში უნდა ქონდეს ინდუქციური ხასიათი.

მინიმალური დანაკარგების რეჟიმი ხასიათდება გარკვეული მნიშვნელობით ხაზის ბოლოებში რეაქტიული სიმძლავრის.

Q_2 -ის ანგარიშისათვის (1.35)-ის პირველი განტოლების მარცხენა და მარჯვენა ნაწილი გავამრავლოთ U_x -ზე; ხაზის ბოლო მიმდებარისათვის ($x = 0$; $\delta_x = 0$) მიიღება:

$$U_x \frac{dU_x}{dX} = r_0 P_2 - X_0 Q_2 \quad (1.59)$$

(1.51)-ის დიფერენცირებით X -ის მიხედვით და $U_x dU_x/dx$ მნიშვნელობის ჩასმით (1.59)-დან მივიღებთ:

$$\left(\sqrt{U_2^4 + \ell^2 (X_0 P_2 + r_0 Q_2)^2} - U_2^2 \right) / \ell = r_0 P_2 - X_0 Q_2 \quad (1.60)$$

(1.60)-ის ამოხსნა Q_2 -ის მიმართ, დაშვებით, რომ $r_0^2 / X_0^2 = 0$, მივიღებთ:

$$Q_2 = Q_c \left[1 + 2 \frac{r_0 P_2}{X_0 Q_c} - \sqrt{1 + 2 \frac{r_0 P_2}{X_0 Q_c} + \left(\frac{P_2}{Q_c} \right)^2} \right], \quad (1.61)$$

$$\text{სადაც } Q_c = U_2^2 / (X_0 \ell)$$

დამოკიდებულება P_2 აქტიური სიმძლავრესა და Q_2 რეაქტიული სიმძლავრეს შორის შეიძლება, როგორც დადებითი ისე უარყოფითი. ხაზის ბოლოებში ერთი და იგივე ძაბვის დროს იდეალური ხაზისთვის გადასაცემი რეაქტიული სიმძლავრე $Q_1 = Q_2 = Q$. ნახ. 14 მოცემულია დამოკიდებულება $q = f(P_2)$ ხაზებისათვის სიგრძეებით 500, 700, 1000 და 1500 კმ.

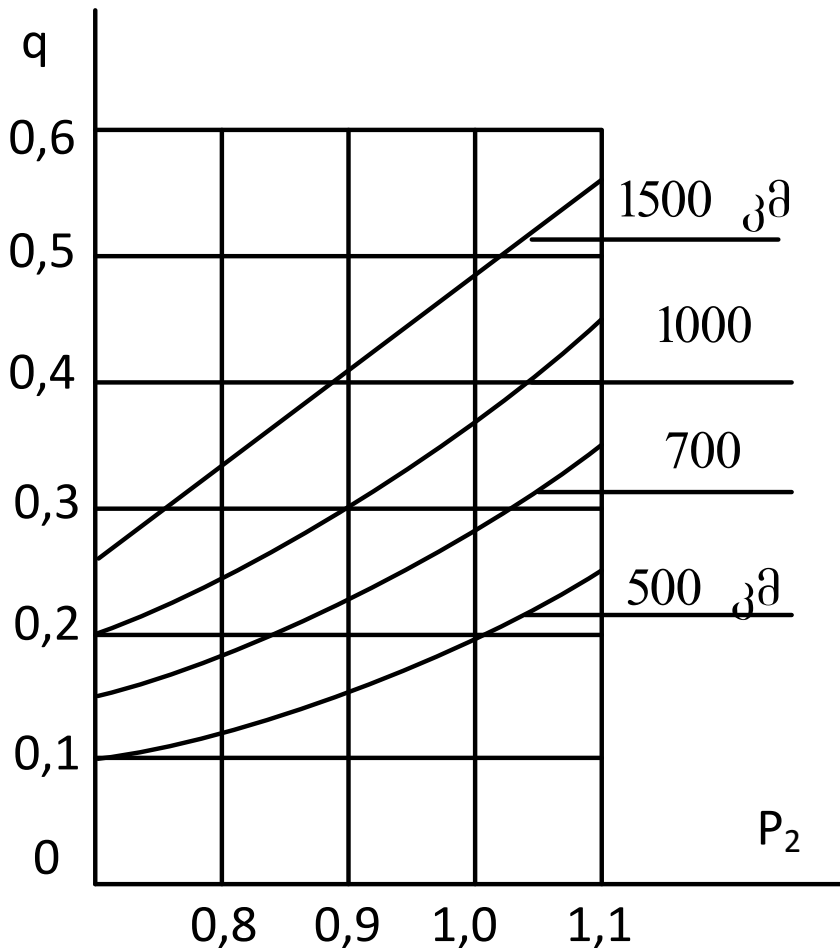
სადენებში მინიმალური დანაკარგების აბსოლუტური სიდიდეების განსაზღვრისათვის (1.45)-ში ჩავსვათ U_x და dU_x/dX მნიშვნელობები, მიღებული (1.48) თანაფარდობიდან, და შევასრულოთ ინტეგრირება.

როცა $U_1 = U_2$ მინიმალური დანაკარგები ხაზის (სამი ფაზა) სადენებში ტოლია:

$$\Delta P = \frac{r_0 \ell C_1}{r_0^2 + \chi_0^2} - \frac{2r_0(X_0 P_2 + r_0 Q_2)}{r_0^2 + \chi_0^2} \ell^n \frac{X_0 P_2 + r_0 Q_2 + C_1 \ell / 2}{X_0 P_2 + r_0 Q_2 - C_1 \ell / 2} \quad (1.62)$$

სადაც C_1 გამოითვლება (1.50)-ის შესაბამისად.

(1.62) გამოსახულების მიხედვით იდეალური ხაზისთვის 1150 კმ ძაბვის, 600 კმ სიგრძის, როცა $P_2 = P_c$, შესრულებული ანგარიშებმა აჩვენა, რომ სადენებში შეიძლება შევამციროდ დანაკარგები 8%-ით განივი კომპენსაციის გზით მაქსიმალური დასაშვები ძაბვის ამადლების გარეშე. აღნიშნულ პარაგრაფში მხედველობაში არაა მიღებული დანაკარგები მაკომპენსირებელ მოწყობილობაში.



ნახ. 14. რეაქტიული სიმძლავრე იდეალური ხაზის ბოლოებში მინიმალური დანაკარგების რეჟიმში ($U_1 = U_2$)

1.3. სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში

მართვადი განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში დანაკარგები დამოკიდებულია არა მხოლოდ მათი კონსტრუქციული განსაკუთრებულობაზე, არამედ გადაცემის რეჟიმზე, განსაზღვრული მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მუშაობით.

განვიხილოდ აღნიშნული საკითხი დეტალურად ორი ტიპის მართვადი განივი კომპენსაციის მოწყობილობების მაგალითზე: სინქრონული კომპენსატორის და რეაქტორის მბრუნავი მაგნიტური ველით. აღნიშნულ მოწყობილობებს გააჩნია დანაკარგები (1-2%). შედარებისთვის განვიხილოთ აგრეთვე დანაკარგები მაშუნტირებელ რეაქტორში ხაზოვანი მახასიათებლით, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება 330 კვ და მაღალი ძაბვის ქსელებში.

- ნომინალური ძაბვის დროს მაშუნტირებელ რეაქტორში სრული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები შეადგენს 0,35-0,5%[3]. დაბალი ციფრი ეკუთვნის დიდი სიმძლავრის რეაქტორს, რომელიც გამოიყენება 750 კვ და მაღალი ძაბვის ქსელებში.

მაშუნტირებელ რეაქტორში დანაკარგები შეიძლება დავეოთ, როგორც სხვა ელექტრომოწყობილობებში, ორი მდგენელით: დანაკარგები მაგნიტოგამტარში და დანაკარგები გრაგნილებში. ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობიდან გადახრის დროს იცვლება სრული დანაკარგები რეაქტორში, თანაც ცალკეული მდგენელები იცვლება სხვადასხვაგვარად. პირველი მიახლოებით, როგორც ეს შეიძლება მიღებული იქნეს გადაცემის რეჟიმების ანგარიშის დროს, სიმძლავრის დანაკარგები მაშუნტირებელ რეაქტორში გამოითვლება ფორმულით

$$\Delta P = \Delta P_{\text{HOM}}(U/U_{\text{HOM}})^2 \quad (1.63)$$

ამ შემთხვევაში რეაქტორი წარმოგვიდგება უცვლელი აქტიური გამტარობით, განსაზღვრული მისი ნომინალური პარამეტრებით. ქსელის სხვა ელემენტებთან შედარებით არამართავად მაშუნტირებელ

რეაქტორში დანაკარგების ცვლილებას ზოგიერთი ანგარიშების დროს მხედველობაში არ ღებულობენ და მიიღებენ მას = ΔP_{HOM} -ის ტოლად.

არამართვად მაშინტირებელ რეაქტორში დანაკარგების დამოკიდებულება ძაბვისაგან აირჩევა შესაბამისად რეჟიმების ანგარიშის მიხედვით, - სინქრონული კომპენსატორი შეიძლება შეერთებული იქნეს მაღალი ძაბვის ხაზთან მხოლოდ ტრანსფორმატორის საშუალებით, ქვესადგურზე.

დანაკარგები ტრანსფორმატორში შეიძლება განისაზღვროს ცნობილი მეთოდით [3] უქმი სვლის ΔP_x და დატვირთვის ΔP_K დანაკარგების მიხედვით

$$\Delta P_T = \Delta P_x + \Delta P_K (S/S_{\text{HOM}})^2, \quad (1.64)$$

სადაც S - ტრანსფორმატორის დატვირთვა, მვა.

დიდი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში ფარდობითი დანაკარგები ჩვეულებრივ შეადგენს [3] ნომინალური სიმძლავრის %-ს:

$$\Delta P_x = 0,06 \div 0,12 \text{ და } \Delta P_K = 0,24 \div 0,35$$

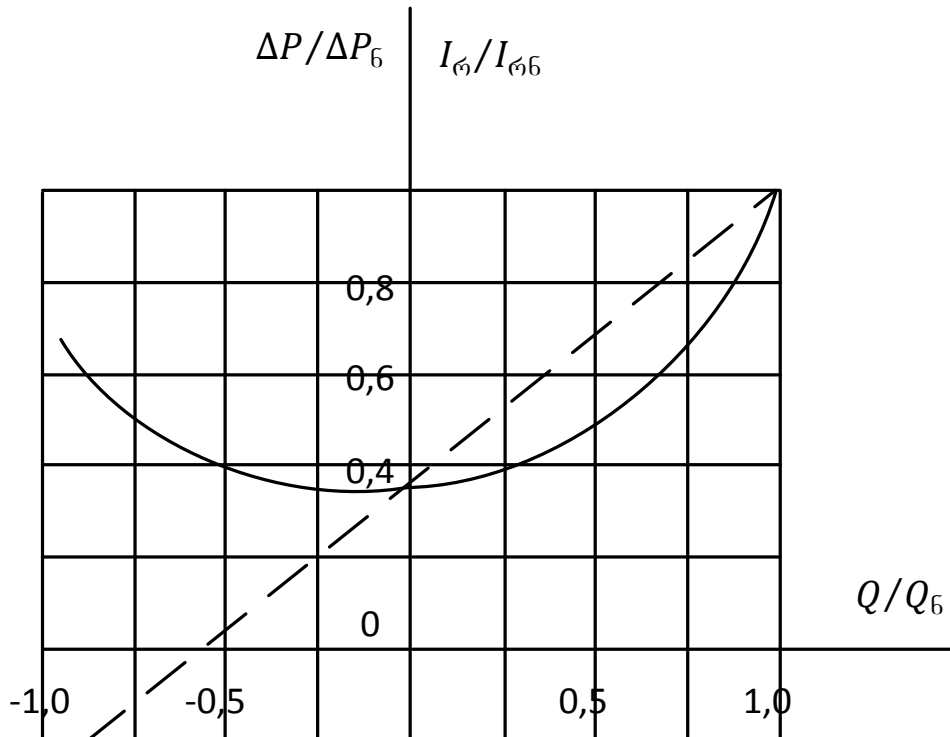
მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარში დიდი გამტარუნარიანობის ხაზისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს მძლავრი სინქრონული კომპენსატორი, რომელშიც სრული დანაკარგები ნომინალურ რეჟიმში ტოლია $1,0 \div 1,3\%$, მათ შორის [4]-ის თანახმად: მუდმივი დანაკარგები $0,35\Delta P_x$, ცვლადი დანაკარგები სტატორში $0,25\Delta P_x$, ცვლადი დანაკარგები როტორში $0,20\Delta P_x$, დამატებითი დანაკარგები $0,20\Delta P_x$, სადაც ΔP_x - სრული დანაკარგები კომპენსატორის ნომინალური სიმძლავრის დროს.

დამატებითი დანაკარგები დაკავშირებულია რთულ დამოკიდებულებაში სინქრონული კომპენსატორის რეჟიმთან. ტექნიკო-ეკონომიური ანგარიშების შესრულების დროს მიზანშეწონილია შემოვიტანოთ გამარტივებული დაშვება, რომლის თანახმად ფარდობითი სიდიდე აღნიშნული დანაკარგების ნომინალურ რეჟიმში იყოფა თანაბრად სტატორისა და როტორის წრედებს შორის, ხოლო სხვა რეჟიმებში იცვლება სტატორისა და როტორის დენის კვადრატის პროპორციულად. ასეთი გამარტივების შედეგად ნომინალური რეჟიმისათვის შეიძლება მივიღოთ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{მუდმივი დანაკარგები } 0,35\Delta P_{\Sigma}; \\ \text{ცვლადი დანაკარგები სტატორში } 0,35\Delta P_{\Sigma}; \\ \text{ცვლადი დანაკარგები როტორში } 0,3\Delta P_{\Sigma} \end{array} \right\} (1,65)$$

სინქრონული კომპენსატორის სხვა განსაკუთრებულობა, რომელიც აგრეთვე უნდა იქნას გათვალისწინებული, წარმოადგენს დამოკიდებულება როტორის დენის დატვირთვისაგან. როგორც ცნობილია, სინქრონული კომპენსატორს შეუძლია იმუშაოს რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმში ან მისი მოხმარების რეჟიმში; უკმა სვლის რეჟიმში ($Q = 0$) შეესაბამება როტორის დენს განსხვავებულს ნულისგან. როცა როტორის დენი ნულის ტოლია სინქრონული კომპენსატორი მოითხოვს განსაზღვრულ რეაქტიულ სიმძლავრეს; როტორის დენის მიმართულების შეცვლის დროს (უარყოფითი აგზნება) რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნა შეიძლება კიდევ გაიზარდოს.

სინქრონული კომპენსატორის როტორის დენის დამოკიდებულება მის რეჟიმზე ატარებს რთულ ხასიათს; დაუშვათ, რომ აღნიშნული დამოკიდებულება სწორხაზოვანია (ნახ.15).



ნახ. 15. სიმძლავრის დანაკარგები (მთლიანი ხაზი) და როტორის დენი (პუნქტირით) სინქრონული კომპენსატორის.

შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$C = \frac{|Q_{I_{\phi=0}}|}{Q_{\phi} + |Q_{I_{\phi=0}}|}, \quad (1.66)$$

სადაც Q_{ϕ} - სინქრონული კომპენსატორის ნომინალური სიმძლავრე, მვარ; $Q_{I_{\phi=0}}$ - სინქრონული კომპენსატორის სიმძლავრე აგზნების მოხსნის დროს, მვარ.

დანაკარგები როტორში წარმოგვიდგება შემდეგი სახით:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\phi, \phi} [C^2 + 2C(1 - C) Q/Q_{\phi} + (1 - C)^2 (Q/Q_{\phi})^2], \quad (1.67)$$

სადაც $\Delta P_{P, \phi}$ - სინქრონული კომპენსატორის როტორში დანაკარგები ნომინალური სიმძლავრის დროს; Q - სიმძლავრე მოცემულ რეჟიმში, დადებითი გენერაციის დროს და უარყოფითი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების დროს.

ამგვარად, დანაკარგები სინქრონულ კომპენსატორში ნებისმიერი Q დატვირთვის დროს, მიიღება როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მნიშვნელობა, (1.65) და (1.67) საფუძველზე მივიღებთ:

$$\Delta P_{\phi, \phi} = \Delta P_{\Sigma} \{0,35 + 0,3C^2 + 0,6c(1 - c) Q/Q_{\phi} + [0,35 + 0,3(1 - c)^2] (Q/Q_{\phi})^2\} \quad (1.68)$$

ნახ. 1.5 ნაჩვენებია დამოკიდებულება დანაკარგების სინქრონული კომპენსატორის რეჟიმისაგან. დანაკარგები სინქრონულ კომპენსატორში პრაქტიკულად გაგლენას არ ახდენს მის სრულ სიმძლავრის მნიშვნელობაზე და ამიტომ შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ ტრანსფორმატორი დატვირთვის განსაზღვრის დროს, რომლის საშუალებით სინქრონული კომპენსატორი უერთდება მაღალი ძაბვის ხაზს.

ჯამური დანაკარგები ბლოკში ტრანსფორმატორი - სინქრონული კომპენსატორი განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\Delta P = \Delta P_x + \Delta P_K (Q/S_{\phi})^2 + \Delta P_{\phi, \phi} \quad (1.69)$$

სადაც Q - სინქრონული კომპენსატორის სიმძლავრე;

$S_{\phi}, \Delta P_x, \Delta P_K$ - ნომინალური სიმძლავრე, მვა, და დანაკარგები, მგვტ, ტრანსფორმატორის ნომინალურ რეჟიმში.

- მართვადი რეაქტორი მბრუნავი მაგნიტური ველით, როგორც სინქრონული კომპენსატორი, შეერთებულია მაღალი ძაბვის ხაზთან

ტრანსფორმატორით, რომელიც წარმოგვიდგება ერთიანი ბლოკით ტრანსფორმატორი - მართვადი რეაქტორი. დანაკარგები ტრანსფორმატორში განისაზღვრება (1.64)-ით.

მართვადი რეაქტორი მბრუნავი მაგნიტური ველით დიდი სიმძლავრით, წინასწარი შეფასებით ხასიათდება შემდეგი დანაკარგების ფარდობითი მნიშვნელობებით: ნორმალურ რეჟიმში 2%-მდე; მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში ტოლია ნომინალურის 10%.

ფარდობითი დანაკარგების ცვლილება მართვად რეაქტორში მბრუნავი მაგნიტური ველით ზემოდ მოცემული საწყისი მონაცემებით წარმოგვიდგება კვადრატული დამოკიდებულებით შემდეგი სახით:

$$\Delta P_{ა.რ} = Q_6 \left[0,0065 + 0,0135 \left(\frac{Q - 0,1Q_6}{0,9Q_6} \right)^2 \right], \quad (1.70)$$

სადაც Q და Q_6 -სიმძლავრე მოცემულ რეჟიმში და ნომინალური სიმძლავრე მართვადი რეაქტორის, მგვა.

ნახ. 1.6 ნაჩვენებია დამოკიდებულება დანაკარგების მართვად რეაქტორში მისი რეჟიმისაგან ნომინალური ძაბვის დროს.

ჯამური დანაკარგები აქტიური სიმძლავრის ბლოკში ტრანსფორმატორი - მართვადი რეაქტორი წარმოგვიდგება შემდეგი გამოსახულებით:

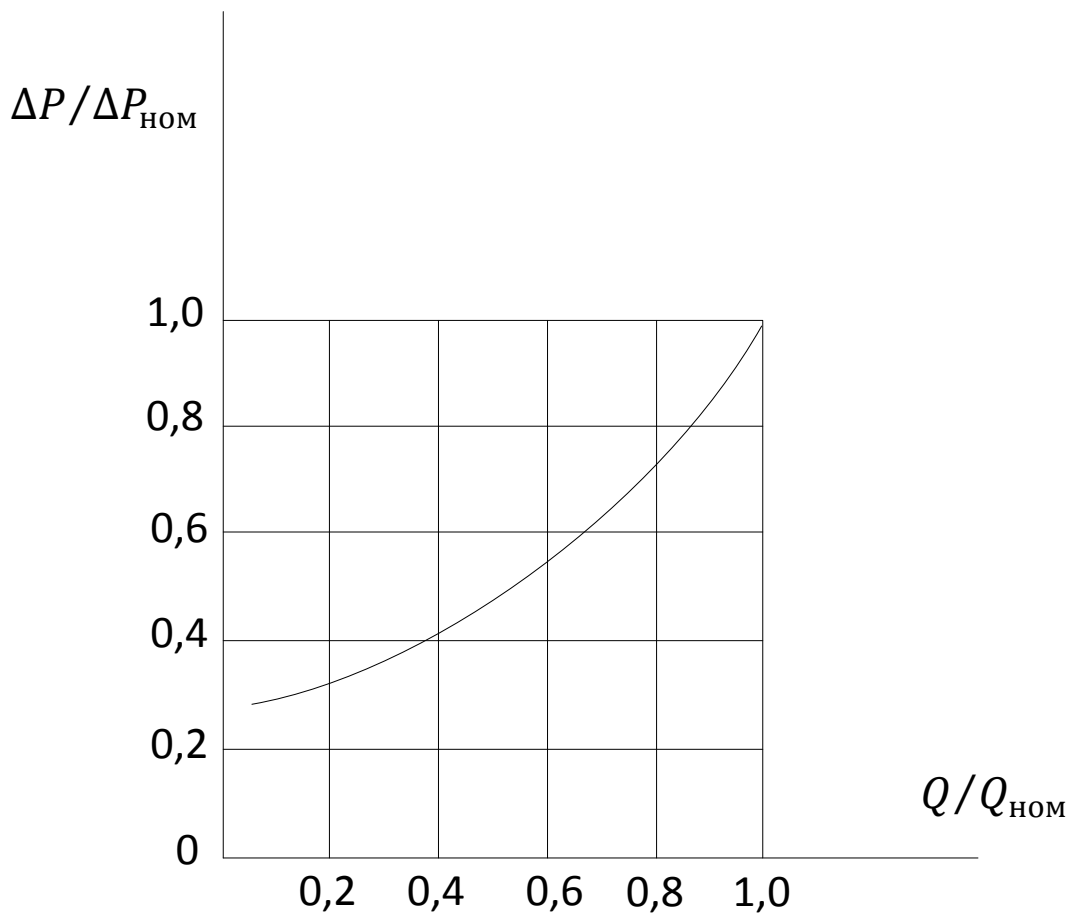
$$\Delta P = \Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{Q}{S_6} \right)^2 + \Delta P_{ა.რ} \quad (1.71)$$

სადაც $S_6, \Delta P_x, \Delta P_k$ -ნომინალური სიმძლავრე და დანაკარგები ტრანსფორმატორში ნორმალურ რეჟიმში.

წინასწარ ჩართული ტრანსფორმატორის არსებობა განივი კომპენსაციის დანადგარში, შესრულებული მართვადი რეაქტორის ბაზაზე მბრუნავი მაგნიტური ველით ან სინქრონული კომპენსატორით, ზემოქმედებს ბლოკის ჯამურ მახასიათებელზე: ტრანსფორმატორი მოქმედებს როგორც მიმდევრობით ჩართული არამართვადი რეაქტორი, რის შედეგად ქსელიდან მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე აღმოჩნდება მეტი ფაქტიური დატვირთვაზე მართვადი მაკომპენსირებელ მოწყობილობაზე, ხოლო გაცემული ქსელში (სინქრონული კომპენსატორის ვარიანტში) ნაკლები:

$$Q_{ს.კ} = \frac{I_x}{100} S_6 + \frac{\ell_K}{100} \left(\frac{Q}{S_6} \right)^2 + Q, \quad (1.72)$$

სადაც S_n, I_x, ℓ_k -ნომინალური სიმძლავრე, მგვა და ტრანსფორმატორის პარამეტრები, %; Q -დატვირთვა მაკომპენსირებელი მოწყობილობის, მგვა.



1.6. სიმძლავრის დანაკარგები მართვად რეაქტორში მბრუნავი მაგნიტური ველით

1.4. სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე

საჰაერო ხაზის სადენებზე განსაზღვრულ პირობებში აღიქმება გვირგვინისებრი განმუხტვა (გვირგვინი), განპირობებული ენერჯის განბნევით გარემომცველი სივრცეში, რასაც მიეყვართ სიმძლავრის და ენერჯის საერთო დანაკარგების გაზრდასთან ელექტროგადაცემაში.

გვირგვინისებრი განმუხტვის პროცესის ანალიზი საჰაერო ხაზის სადენებზე განხილულია სპეციალურ ლიტერატურაში [5]. უნდა აღინიშნოს, რომ გვირგვინის წარმოშობის პირობას წარმოადგენს ხაზის ძაბვის გაზრდა კრიტიკულ დონემდე - გვირგვინის საწყისი ძაბვა.

გვირგვინის საწყისი ძაბვა დამოკიდებულია სხვადასხვა ფაქტორებზე, რომლებიც შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად: პირველ ჯგუფში შედის სადენის გეომეტრიული ზომები, ფაზა, ფაზებს შორის მანძილი, ფაზებსა და მიწას შორის, სადენის გარე ზედაპირის მდგომარეობა; მეორე ჯგუფში შედის ფაქტორები, დაკავშირებული ატმოსფეროს მდგომარეობასთან, - ჰაერის სიმკვრივე, მისი ფარდობითი ტენიანობა, ხასიათი და ინტენსივობა ნალექის, სადენზე ყინულის დანალექი და სხვა. სხვადასხვა პირობებში ძაბვის გაზრდით დანაკარგები გვირგვინზე უეცრად იზრდება. გვირგვინი ხაზის სადენებზე თანხმლებია, გარდა სიმძლავრის დანაკარგებისა, ეგრედწოდებული რეაქტიული ეფექტისა, რომელიც გამოვლინდება დამმუხტავი სიმძლავრის გაზრდით, ფაზის ჯამური მუშა ტევადობის ცვლილების შედეგად.

სამფაზა ხაზში კორიზონტალურად განლაგებულ სადენებით, გვირგვინის რეაქტიული ეფექტი დიდი ხარისხით გამოვლინდება შუა ფაზაზე, ვიდრე კიდური ფაზებზე, მათზე გვირგვინი აღიძვრება უფრო დაბალ ძაბვაზე და გამოვლინდება უფრო ინტენსიურად. სიმძლავრის დანაკარგები შუა ფაზაზე შეიძლება მიაღწიოს 150%-ს კიდური ფაზების დანაკარგების.

ზემოდ თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ გვირგვინისებრი განმუხტვის აღძვრა და ინტენსივობა საჰაერო ხაზის სადენებზე განხილული უნდა იქნეს, როგორც შემთხვევითი მოვლენა, ხოლო სიმძლავრის დანაკარგები მოცემულ დროის მომენტში - როგორც შემთხვევითი სიდიდე.

გასაშუალებელი მახასიათებელი გვირგვინისებრი განმუხტვის საშუალო წლიური ხვედრითი დანაკარგების სახით გვირგვინზე, კვტ.სთ/კმ ან კვტ/კმ, გამოიყენება ელექტროგადაცემის დაგეგმარების დროს, არ იძლევა საშუალებას ვიმსჯელოთ ფაქტიურ სიმძლავრის დანაკარგებზე მოცემულ დროის მომენტში. წლიური ენერჯის დანაკარგების სიდიდე მიიღება დანაკარგებიდან, რომელსაც ადგილი აქვს სხვადასხვა დროის მომენტში გარე პირობების გათვალისწინებით,

და არ განსაზღვრავს აღნიშნული დანაკარგების განაწილებას მისი გამოვლენის ალბათობით.

საჰაერო ხაზისთვის მისი კონსტრუქციული შესრულების დამოუკიდებლად ერთადერთ საშუალებას ზემოქმედებისა სიმძლავრის დანაკარგების დონეზე, დაკავშირებული გვირგვინისებრი განმუხტვასთან, წარმოადგენს ძაბვის ცვლილება. ასეთი დონისძიების დასაბუთებისათვის, როგორც ძაბვის დადაბლება, ასდენს ზეგავლენას გადაცემის რეჟიმის სხვა მაჩვენებელზე (დანაკარგები სადენების გახურებაზე, მდგრადობაზე და ა.შ). აუცილებელია გაგვანდეს საიმედო წარმოდგენა მომქმედი სიმძლავრის დანაკარგებზე გვირგვინზე განსახილველ დროის მომენტში.

სიმძლავრის დანაკარგების აბსოლტური სიდიდე გამოწვეული გვირგვინისებრი განმუხტვისაგან იანგარიშება მეოთხით, რომელიც აღწერილა [5], ან უშუალოდ გაზომვით მომქმედ გადაცემაზე სპეციალური გამზომი მოწყობილობის საშუალებით.

ხანგრძლივი სისტემატური დაკვირვება მომქმედ ხაზზე საშუალებას იძლევა დაზუსტებისა, წარმოდგენაზე სიმძლავრის დანაკარგების ცვლილების შესაძლებლობის ხასიათზე გამოწვეული გვირგვინით რეალურ პირობებში განხილულია [6].

ცხრილი 1.1-ში [5]-დან მოცემულია კვლევის შედეგები სიმძლავრის დანაკარგების გამოწვეული გვირგვინისებრი განმუხტვისაგან ცუდი ამინდის პირობებში 500 კვ ძაბვის ხაზზე სადენებით 3ACOX330 და გახლეჩილი ბიჯით 400 მმ. მოცემული ექსპერიმენტის ხანგრძლივობა ცუდი ამინდში შეადგენდა 43% სრული დროის დაკვირვების რომელიც გრძელდებოდა დაახლოებით 2,5 წელი. ხაზზე ძაბვა დაკვირვების პერიოდში იცვლებოდა ნომინალურიდან $\pm 1\%$ ზღვრებში.

ერთნაირი ძაბვის დროს საშუალო სიმძლავრის დანაკარგები კარგი ამინდის პირობებში შეადგენდა 5-8-ჯერ ნაკლებს, ვიდრე ცუდ ამინდში.

სიმძლავრის დანაკარგების შეფასების დროს გვირგვინზე განფენილი გადამცემი ხაზისთვის აუცილებელია გავითვალისწინოთ სხვადასხვა კლიმატური პირობები ხაზის ტრასაზე, რომელიც დაკავშირებულია გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგების

მასხასიათებლები გვირგვინის არაერთგვაროვანი ინტენსივობაზე გადაცემის ცალკეულ უბნებზე. განივი კომპენსაციით მართვა იძლევა საშუალებას უბნების მიხედვით ძაბვის რეგულირების.

ცხრილი 1.1

ამინდი	დანაკარგების ხანგრძლივობა, სთ	სიმძლავრის დანაკარგები კვტ/კმ		ცულ ამინდში ენერჯის დანაკარგების წილი, %
		საშუალო დანაკარგები დროში	მაქსიმალური	
წვიმა	734	44,6	313	12,7
სველი თოვლი	390	34,1	198	5,1
მშრალი თოვლი	1035	20,3	119	8,2
ჰაერის ამადლებული ტენიანობა (90%)	3929	17,0	186	25,8
ღრუბელი	1345	28,4	360	14,8
ნამი	220	30,0	170	2,6
მცირე წვიმა	1291	70,7	374	30,4
მოყინვა	49	26,4	56	0,4
სულ	8993	28,7	-	100

1.5. გადაცემის ძაბვის რეგულირებასა და სიმძლავრის დანაკარგებს შორის კავშირი

გადაცემაში ელექტრული ენერჯის სიმძლავრის ნაკადის უცვლელობის დროს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, როგორც იყო ნაჩვენები განისაზღვრება ძაბვის დონით. გადაცემის ძაბვის დასაშვები ზღვარზე ზემოქმედებით, შეიძლება შევცვალოთ სასურველი მიმართულებით აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები და უზრუნველყოთ

ამგვარად სიმძლავრის სრული დანაკარგების მინიმალური მნიშვნელობა, რომელიც შედგენა დანაკარგებისაგან სადენებში, გვირგვინზე, მართვად და არამართვად საკომპენსირებელ მოწყობილობებში და ტრანსფორმატორებში, რომელიც აკავშირებს განსახილველ ელექტროგადაცემას სხვა სიდიდის ძაბვის ქსელთან. ძაბვის ცვლილება სხვადასხვაგვარად აღიქმება დანაკარგების ცალკეულ მდგენელებზე. გადაცემის შედარებით მცირე სიმძლავრის დროს - $0.3P_c$, სადენებში დანაკარგების შემცირებისთვის უნდა შევამციროდ ძაბვა, მაშინ როცა $P > 0,3P_c$ დანაკარგების შემცირებისათვის სადენებში ყოველთვის სასურველია გვექონდეს ხაზი მეტობით დასაშვები (+5%) ძაბვა. სხვა ხასიათი გააჩნია გვირგვინზე დანაკარგების დამოკიდებულებას ძაბვისაგან. მათ შემცირებისათვის ყოველთვის მიზანშეწონილია ხაზის ექსპლუატაცია ნაკლები დასაშვები ძაბვით. დანაკარგები არამართვად საკომპენსაციო მოწყობილობაში მცირდება ძაბვის შემცირებით, როდესაც დანაკარგები მართვად საკომპენსაციო მოწყობილობაში განისაზღვრება არა ძაბვის დონით, არამედ მოწყობილობის განტვირთვით რეაქტიული სიმძლავრისაგან, გამომდინარე საერთო მოთხოვნებით ელექტროგადაცემის რეჟიმისაგან. დანაკარგები კავშირის ტრანსფორმატორში განისაზღვრება ენერჯის ნაკადის სიმძლავრით, გამავალი მასში, და ნაკლებად დამოკიდებულია ძაბვის დონიდან.

მოყვანილი საერთო წარმოდგენა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ხასიათზე ელექტროგადაცემის ელემენტებში ძაბვის რეგულირების დროს გვიჩვენებს, რომ აქტიური სიმძლავრის

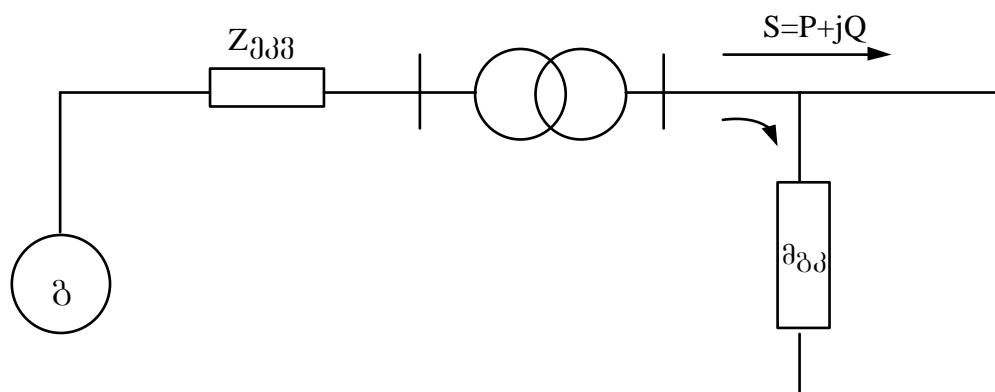
დანაკარგების მინიმიზაციის ამოცანა ძაბვის რეგულირების გზით წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ამოცანას, რომლის პრაქტიკული ამოხსნა შეიძლება მიღებული იქნეს მხოლოდ კომპიუტერული ტექნიკის დახმარებით. ამ შემთხვევაში ამოცანა უნდა ამოიხსნას არა განკერძოებულად ცალკეული ელექტროგადაცემისთვის, არამედ ყველა ქსელისათვის, როგორც მოცემული, ისე უახლოესი შერეული ძაბვებით.

თანამედროვე ელექტრული სისტემებში ძაბვის რეგულირება ხორციელდება ელექტროსადგურების გენერატორებით, სინქრონული კომპენსატორებით, დადგმული საკვანძო ქვესადგურებში, მაკომპენსირებელი მოწყობილობით მომხმარებელებთან, ტრანსფორმატორებით დატვირთვის ქვეშ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის ცვლილებით და რეგულირებადი ტრანსფორმატორებით, დადგმული ქსელში.

ცვლადი დენის მძლავრი ელექტროგადაცემის ძაბვის რეგულირება ეკონომიური რეჟიმის შექმნის მიზნით (სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება) შეძლებისდაგვარად უნდა მოხდეს დეცენტრალიზებულად, ე.ი. განხორციელდეს გადაცემიდან უშუალოდ ახლოს ისე, რომ მინიმალური ხარისხით იმოქმედოს ელექტროსისტემის სხვა ელემენტების ძაბვებზე. ასეთი ადგილობრივი რეგულირებისათვის მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს კავშირის ტრანსფორმატორი, რომელსაც გააჩნია მოწყობილობა დატვირთვის ქვეშ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის ცვლილების. აღნიშნულ კვანძში რეაქტიული სიმძლავრის არსებობის დროს ელექტროგადაცემის ძაბვის ცვლილება

ნაკლებად იმოქმედებს ელექტროგადაცემის დანარჩენი ნაწილის დაბვის დონეზე.

ცვლადი დენის ელექტროგადაცემის დაბვის რეგულირების ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს მოწყობილობა მართვადი განივი კომპენსაციის. განივი კომპენსაციის მოწყობილობის განტვირთვის ცვლილებას მიყვავართ რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადის ცვლილებასთან კავშირის ტრანსფორმატორის გავლით, რაც იწვევს დაბვის ცვლილებას საღტეზე, რომელზეც ჩართულია განსახილველი ხაზი (ნახ. 1.7).



ნახ. 1.7. პრინციპული სქემა დაბვის რეგულირების მართვადი განივი კომპენსაციით.

გ - სისტემის ეკვივალენტური გენერატორი; $Z_{კვვ}$ -სისტემის ეკვივალენტური წინაღობა.

მარტივ შემთხვევაში, როცა ტრანსფორმატორი მიერთებულია მძლავრი ელექტროსისტემის კვანძთან, რომლის დაბვა პრაქტიკულად არ იცვლება, დაბვის ცვლილება გადაცემაზე, %, გამოწვეული მართვადი განივი კომპენსაციის მოქმედებით, ტოლია:

$$\Delta U = \frac{\ell_K \Delta Q_{გკ}}{S_{НОМ}}, \quad (1.73)$$

სადაც $S_{НОМ}$ -კავშირის ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე, მგვა; ℓ_K -ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის დაბვა, %; $\Delta Q_{გკ}$ -მაკომპენსირებელი მოწყობილობის დამატებითი განტვირთვა.

იმ შემთხვევაში, როცა დამატებითი მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე იწვევს ძაბვის ცვლილებას ქვესადგურის სალტეზე, რომელზეც ჩართულია კავშირის ტრანსფორმატორი, რეგულირების ეფექტი იქნება უფრო მეტი, ვიდრე ეს გამოისახება (1.73)-ით.

1.6. გადაცემაში ენერჯის დანაკარგები

ელექტრული ენერჯის დანაკარგები წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად ფაქტორს, რომელიც განსაზღვრავს ეკონომიურ მაჩვენებელს, როგორც ელექტროგადაცემაზე მოლიანად, ისე მისი ცალკეულ ელემენტებში. ზოგად სახეში ენერჯის დანაკარგები T დროის შუალედში ელექტროგადაცემის ნებისმიერ ელემენტში ტოლია:

$$\Delta \Xi = \int_0^T \Delta P(t) dt, \quad (1.74)$$

სადაც $\Delta P(t)$ - სიმძლავრის დანაკარგები მოცემულ დროის მომენტში.

გადაცემის განსახილველი ელემენტებისათვის - ხაზი, მართვადი მაკომპენსირებელი მოწყობილობა, ტრანსფორმატორი - სიმძლავრის დანაკარგები დროის მოცემულ მომენტში განისაზღვრება ელექტრული ენერჯის სიმძლავრის ნაკადით, გადაცემული ხაზით. მხოლოდ არამართვადი მაშუნტირებელი რეაქტორებისათვის განმსაზღვრელ სიდიდეს წარმოადგენს ძაბვა.

ყურადღებას იმსახურებს დანაკარგების ცვლილების ხასიათი სხვადასხვა ელემენტებში გადაცემის სიმძლავრის ცვლილებიდან დროს. P_2 აქტიური სიმძლავრის გაზრდით დანაკარგები ხაზის სადენებში იზრდება, მაგრამ დანაკარგები მართვად განივი კომპენსაციის მოწყობილობაში მცირდება (იგულისხმება, რომ $P < P_c$).

მაქსიმალური დანაკარგები მართვად მაკომპენსირებელ მოწყობილობაში შეესაბამება უქმი სვლის რეჟიმს, როცა დანაკარგები ხაზის სადენებში მინიმალურია.

ცალკე უნდა განვიხილოდ დანაკარგები გვირგვინზე, რომლის, სიდიდე, როგორც ეს ნაჩვენებია იყო გააჩნია შემთხვევითი ხასიათი.

ელექტროგადაცემის ელემენტებში სიმძლავრის დანაკარგების ცვლილების განსაკუთრებულობა, როგორც ეს აღნიშნული იყო ზემოდ, ეჭვის ქვეშ აყენებს სრული დანაკარგების ანგარიშის ცნობილ მეთოდს დანაკარგების წლიური საათების τ რიცხვის გამოყენებით.

გადაცემაში ენერჯიის დანაკარგების განსაზღვრისათვის მეტად მიესადაგება რეჟიმების დამახასიათებელი მეთოდი [7], რომლის თანახმად ელექტროგადაცემის ფაქტიურად არახაზოვანი დატვირთვის გრაფიკი დროის გასწვრივ შეიცვლება საფეხუროვანით, ბუნებრივია, ასეთი შეცვლა გრაფიკის თითოეული საფეხურის წარმოადგენს რეჟიმის დამახასიათებელს, რომლის ხანგრძლივობა აღმოჩნდება ცნობილი.

ასეთი მიდგომით ენერჯიის დანაკარგები T დროის პერიოდში განისაზღვრება გამოსახულებით.

$$\Delta \Xi = \sum_1^n \Delta P_i T_i, \quad (1.75)$$

სადაც ΔP_i -სიმძლავრის დანაკარგები i დამახასიათებელი რეჟიმის; $T_i - i$ დამახასიათებელი რეჟიმის ხანგრძლივობა; აღნიშნულ შემთხვევაში

$$T = \sum_1^n T_i \quad (1.76)$$

გვირგვინზე ენერჯიის დანაკარგების შეფასება, შეადგენს ენერჯიის სრული დანაკარგების მცირე ნაწილს (2%) [3], რეკომენდირებულია არსებული მონაცემების საფუძველზე ჩატარდეს სხვადასხვა ძაბვების ხაზებისათვის გვირგვინზე საშუალო წლიური სიმძლავრის დანაკარგების ანგარიში.

თავი II. მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მაჩვენებლები

2.1. ხაზის დამმუხტავი სიმძლავრე

საჰაერო და საკაბელო ხაზები წარმოადგენენ რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს, როცა მათი განტვირთვა აქტიური სიმძლავრით ნაკლებია ნატურალურზე.

ქვემოთ [3]-ის თანახმად მოცემულია გასაშუალებელი ხვედრითი მნიშვნელობა რეაქტიული (დამმუხტავი) სიმძლავრის, გენერირებული დაუტვირთავი სამფაზა ხაზით, ნომინალური ძაბვის დროს (დიაპაზონის სიდიდე, აღნიშნული ვარსკვლავით, უჩვენებს დამოკიდებულებას დამმუხტავი სიმძლავრის სადენის ან ძაფის კვეთისაგან; კვეთის გაზრდით დამმუხტავი სიმძლავრე იზრდება).

საჰაერო ხაზისთვის:

U , კვ	220	330	500	750	1150
$Q_{\text{დამ}}$, მვარ/კმ	0,13-0,14*	0,37-0,39 *	0,94-0,95*	2,25	5,9

საკაბელო ხაზისთვის:

U , კვ	35	100	220	330	500
$Q_{\text{დამ}}$, მვარ/კმ	0,23-0,29*	1,2-1,6 *	3,6-5,0*	9,0	17,0

ცვლადი დენის დამმუხტავი სიმძლავრე, საჰაერო და საკაბელო ხაზებისთვის, განისაზღვრება მათი კონსტრუქციით: ფაზებს შორის მანძილით და ფაზებსა და მიწას შორის; სადენების განლაგებით ფაზაში; სადენის კვეთით; ფაზებს შორის იზოლაციის დიელექტრიკული თვისებებით. დამმუხტავი სიმძლავრე, მვარ, პროპორციულია ხაზის სიგრძის და მომქმედი ძაბვის კვადრატის:

$$Q_{\text{დამ}} = b_0 U^2 \ell, \quad (2.1)$$

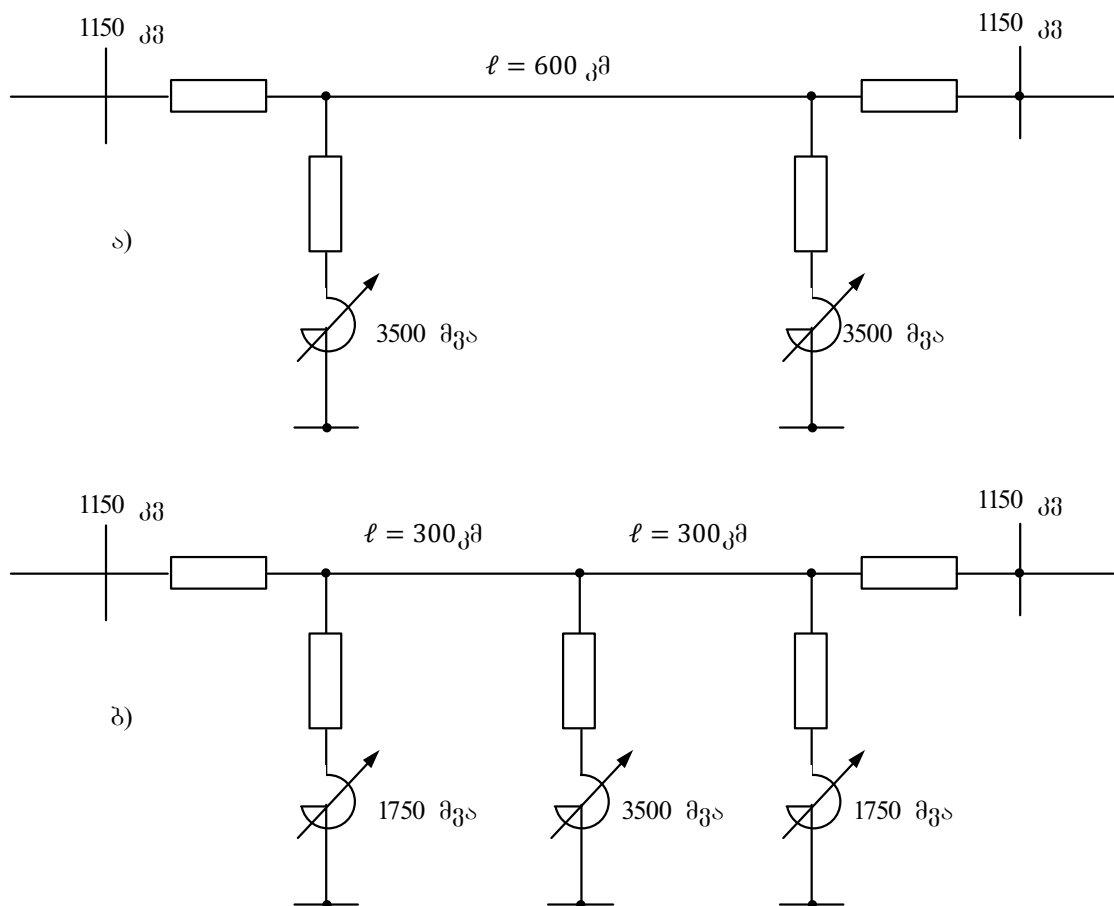
სადაც b_0 -ხაზის ხვედრითი ტევადური გამტარობა, (ომი.კმ)⁻¹; U - მომქმედი ძაბვა; კვ; ℓ - ხაზის სიგრძე, კმ.

კაბელების კონსტრუქციული განსაკუთრებულობიდან გამომდინარე მათი ხვედრითი დამმუხტავი სიმძლავრე 15-30-ჯერ აჭარბებს საჰაერო ხაზის ხვედრითი დამმუხტავი სიმძლავრეს იმავე ნომინალური ძაბვით.

ამიტომ, მიუხედავად შედარებით საკაბელო ხაზის სიგრძე გაცილებით ნაკლებია საჰაერო გადამცემ ხაზზე, საკითხი განივი კომპენსაციის მოწყობილობის გამოყენება საკაბელო ქსელში შედარებით დაბალ ძაბვებზე არა ნაკლებ აქტუალურია, ვიდრე ზემოაღნიშნული ძაბვის საჰაერო ქსელში.

2.2. ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის დანადგარის განაწილება

არსებითი გავლენა ტექნიკურ მაჩვენებელზე, გააჩნია განივი მაკომპენსირებელი მოწყობილობის (როგორც მართვადი ისე არა მართვადი) განლაგებას გადაცემაზე. ნახ. 2.1 ნაჩვენებია მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება.



ნახ. 2.1. მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება

ა) ხაზის ბოლოებში; ბ) ხაზის ბოლოებში და შუაში

1150 კგ ძაბვის ხაზში, 600 კმ სიგრძის, რომლის თითოეული ფაზა წარმოგვიდგება რვა სადენის კონით AC400, როცა განივი მაკომპენსირებელი მოწყობილობა ჯამური სიმძლავრით 3500 მვარ განლაგებულია ერთნაირად ბოლო ქვესადგურებში (50%-50%), სადაც შენარჩუნებულია ნომინალური ძაბვა (ნახ. 2.1, ა), სიმძლავრის დანაკარგები სადენებში (გვირგვინის გათვალისწინების გარეშე) უქმი სვლის რეჟიმში ($P_2 = 0$) შეადგენს დაახლოებით 6,5 მგვტ. იმ შემთხვევაში, როცა იმავე ხაზისთვის, მაგრამ ხაზის შუა წერტილში მოთავსებულია მაკომპენსირებელი მოწყობილობა, იგივე ჯამური სიმძლავრით (25%-50%-25%) (ნახ. 2.1, ბ) უქმი სვლის რეჟიმში, სადენებში დანაკარგები მცირდება 1,55 მგვტ-მდე.

2.3. ძაბვის ხანგრძლივი ამადლების შეზღუდვა

რეაქტიული სიმძლავრე, გენერირებული ხაზებით და მიწოდებული ბოლო ქვესადგურების სალტებზე, განისაზღვრება ძაბვებით გადაცემის ბოლოებში, ან მათი ცალკეულ უბნებზე, მათი სიგრძით და ელექტრული ენერჯის სიმძლავრის ნაკადით, გადაცემული მოცემული ხაზით. დიდი რეაქტიული სიმძლავრეს ბოლო ქვესადგურის სალტებზე აქვს ადგილი უქმი სვლის რეჟიმში და მცირე დატვირთვის რეჟიმში ($P \ll P_c$); ენერჯის ნაკადის სიმძლავრის გაზრდის მიხედვით რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის ინდუქციურ წინააღობაში იზრდება და მისი მიწოდება ბოლო ქვესადგურებზე მცირდება, და უახლოვდება ნულს, როცა აქტიური სიმძლავრე, ახლოსაა ხაზის ნატურალური სიმძლავრესთან. ხაზში დამმუხტავი დენების გავლის შედეგად ძაბვა ხაზის შუალედურ წერტილებში იქნება განსხვავებული ბოლოებში ძაბვისაგან. როგორც ცნობილია, ხაზის ბოლოებში ერთნაირი ძაბვის შემთხვევაში ან მისი ცალკეულ უბნებში და გადაცემის განტვირთვის დროს ხაზის ნატურალური სიმძლავრეზე ნაკლები, ძაბვა იზრდება ხაზის ბოლოებიდან მისი შუა ნაწილისაკენ, სადაც მიიღწევა მაქსიმალური მნიშვნელობა. ძაბვის ამადლების

ჯერადობა ხაზის შუა წერტილში, შედარებით დაბვასთან ხაზის ბოლოებში, იზრდება ხაზის სიგრძის გაზრდასთან, ხოლო მისი მაქსიმალურ მნიშვნელობას ადგილი აქვს უკმა სვლის რეჟიმში.

ელექტრული ენერჯის ნაკადის სიმძლავრის გაზრდით ხაზის ნატურალური სიმძლავრეზე ზევით, იწვევს აუცილებლობას მივაწოდოთ ხაზში რეაქტიული სიმძლავრე ბოლო ქვესადგურებისა სალტებებიდან. აღნიშნულ რეჟიმებში დაბვა ხაზის შუალედურ წერტილებში იქნება დაბალი, ვიდრე მის ბოლოებში. ზემოდ მოყვანილი მოსაზრება დაბვის ცვლილების ხასიათზე მიეკუთვნება ცვლადი დენის ხაზებს, რომლის სიგრძე არ აღემატება 1200-1300 კმ.

500 კვ და მეტი დაბვის საჰაერო ხაზისათვის იზოლაციის ნორმალური მუშაობის პირობის მიხედვით მუშა დაბვის ამაღლება ნომინალურზე არ უნდა აღემატებოდეს 5%. აღნიშნული მოთხოვნის შესრულება დაკავშირებულია საჰაერო ხაზის ქვესადგურებს შორის მანძილის შეზღუდვასთან.

უნდა აღინიშნოს, რომ დაბვის ამაღლება ხაზის ბოლოში იმოქმედებს არა მხოლოდ მის იზოლაციაზე, არამედ ქვესადგურის ძირითადი მოწყობილობის იზოლაციაზე: ტრანსფორმატორები, გამთიშველები, ამომრთველები და ა.შ., რომლისთვისაც აღნიშნული ფაქტორი განსაკუთრებით საშიშია.

განვიხილავთ რა უკმა სვლის რეჟიმს, რომელიც ხასიათდება დაბვის მნიშვნელოვანი ამაღლებით ხაზის შუალედურ წერტილებში, შეიძლება დავადგინოთ მაქსიმალური ხაზის სიგრძე, რომლისთვისაც დაბვა შუალედურ წერტილებში არ გამოვა დასაშვები ზღვრებიდან.

ხაზის უკმა სვლის რეჟიმისათვის კავშირი მაქსიმალური დაბვასა და დაბვას შორის, რომელიც შენარჩუნებულია ხაზის ბოლოებში, განისაზღვრება, მარტივი გამოსახულებით, რომელიც გამომდინარეობს (1.1)-დან:

$$\bar{U}_{\text{მაქს.}} = U_{\text{ბოლ.}} / \text{ch} \gamma \ell_1, \quad (2.2)$$

სადაც ℓ_1 ტოლია ხაზის სიგრძის ნახევრის, რომლის ორივე ბოლოებში შენარჩუნებულია ერთნაირი დაბვა $U_{\text{ბოლ.}}$.

უმრავლეს შემთხვევაში 500 კვ და მეტი ძაბვის გადაცემის ნორმალური რეჟიმი გადაცემის და მიმღების ქვესადგურები განსხვავდებიან უმნიშვნელოდ, რაც იძლევა საშუალებას გამოვიყენოთ (2.2) გამოსახულება წინასწარი ანალიზისათვის ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხასიათით.

ხაზის ერთობლივი ჩართვის დროს ძაბვა გახსნილ ბოლოში

$$\bar{U}_{\text{აქს.}} = \bar{U} / \text{ch}\gamma l \quad (2.3)$$

შევნიშნავთ, რომ ხაზის თავისუფალ ბოლოში ძაბვის ამალღება იმოქმედებს არა მხოლოდ მის იზოლაციაზე, არამედ ქვესადგურის ძირითადი მოწყობილობის იზოლაციაზე: ტრანსფორმატორები, გამთიშველები, ამომრთველები და ა.შ.

საანგარიშო გამოსახულების გამარტივებისათვის შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ ხაზის აქტიური წინაღობა, მისი სიმცირის გამო. 500 კვ და მეტი ძაბვის ხაზისათვის აქტიური წინაღობა 8-20-ჯერ ნაკლებია ინდუქციურ წინაღობაზე. ჩავთვალოდ r_0 სადენის ტოლია ნულის, მივიღებთ გავრცელების კოეფიციენტი

$$\gamma = j\alpha, \quad (2.4)$$

რაც იძლევა საშუალებას (2.3)-ში $\text{ch}\gamma l$ -ის ნაცვლად შემოვიყვანოთ $\cos\alpha l$.

ასეთი დაშვების დროს საჰაერო ხაზის მონაკვეთის ზღვრული სიგრძე საკვანძო წერტილებს შორის, რომელშიც შენარჩუნებულია ნომინალური ძაბვა, ტოლია

$$l_{\text{ზღვ.}} = \frac{2}{\alpha} \arccos\left(\frac{U_{\text{ნომ.}}}{U_{\text{აქს.}}}\right) \quad (2.5)$$

საჰაერო ხაზისთვის 500 კვ და მეტი ძაბვისთვის α -ს მნიშვნელობა იმყოფება ზღვრებში $(1,06-1,09) \cdot 10^{-3}$ რად/კმ, რაც განსაზღვრავს როცა $U_{\text{აქს.}} = 1,05U_{\text{ნომ.}}$ ხაზის საკვანძო წერტილებს შორის მონაკვეთების ზღვრული სიგრძე, რომელშიც შენარჩუნებულია ნომინალური ძაბვა შეადგენს 590-600 კმ. ხაზის ერთმხრივი ჩართვის დროს ზღვრული სიგრძე აღმოჩნდება ორჯერ ნაკლები, ე.ი. არ აღემატება 300 კმ.

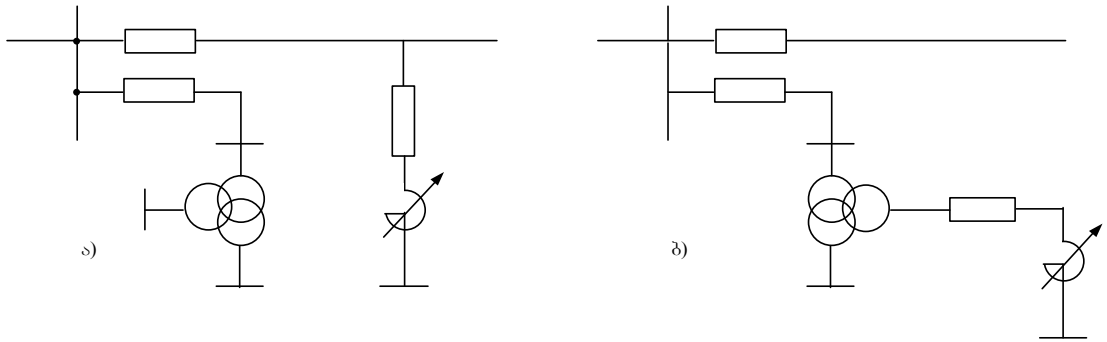
მოცემული მონაცემები გვიჩვენებს, რომ ძაბვის შეზღუდვის მიხედვით უქმი სვლის რეჟიმში და მცირე დატვირთვის დროს საჰაერო

ხაზი სიგრძით 300 კმ-მდე შეიძლება შევიდეს ექსპლუატაციაში ამა თუ იმ დამატებითი მოწყობილობის გარეშე; ხაზი სიგრძით 300-დან 600 კმ-მდე უნდა აღიჭურვოს განივი კომპენსაციის მოწყობილობით, რომელიც ზღუდავს ძაბვას გახსნილი ხაზის ბოლოში;

როცა ხაზის სიგრძე მეტია 600 კმ-ზე, მაკომპენსირებელი მოწყობილობა აუცილებელია მოვათავსოდ ხაზის შუალედურ წერტილებში.

2.4. განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება

განივი კომპენსაციის დანადგარის განლაგება მაღალი ძაბვის ხაზის ბოლოს ქვესადგურებზე, მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მიერთების სქემა შეიძლება დაიყოს ორი პრინციპიალურად განსხვავებული ჯგუფად. პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება ვარიანტი განივი კომპენსაციის მოწყობილობის მიერთება მაღალი ძაბვის ხაზთან უშუალოდ ახლოს ქვესადგურის სალტისგან, სახაზო ამომრთველის შემდეგ (ნახ. 2.2, ა); მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება მიერთება მაკომპენსირებელ მოწყობილობის ქვესადგურის სალტესთან, როგორც მაღალი, ისე დაბალი ძაბვის საფეხურზე (ნახ. 2.2, ბ) უმრავლეს შემთხვევაში ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები, დადგმული დამადაბლებელ ქვესადგურზე, გააჩნიათ მესამე გრადინი ძაბვით 10-35 კვ, საკმარისი სიმძლავრით, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნეს მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მისაერთებლად. ტექნიკური მახასიათებლები მოცემული სქემების შესამჩნევად განსხვავდება.



ნახ. 2.2. მართვადი განივი კომპენსაციის მიერთების სქემები.

ა-ხაზზე ქვესადგურთან ახლოს; ბ- ქვესადგურზე

განვიხილოთ მოცემული სქემები დეტალურად და გამომაგლინოთ მათი უპირატესობა.

ხაზის ცალმხრივი გამორთვის დროს დამყარებული და გარდამავალი რეჟიმებში გადამეტაბვის შეზღუდვა, აგრეთვე მისი დაყენება ძაბვის ქვეშ ერთ-ერთი ქვესადგურის მხრიდან შესაძლებელის განივი კომპენსაციის მოწყობილობით, მხოლოდ იმ პირობით მათი მიერთებით ხაზთან ამომრთველის შემდეგ. ამ შემთხვევაში ტრანსფორმატორის ან ავტოტრანსფორმატორის გამორთვა არ გამოიწვევს საშიშ გადამეტაბვას გადაცემაზე.

ძაბვის რეგულირება ქვესადგურის მაღალი ძაბვის სალტეზე, მართვადი განივი კომპენსაციით, მიერთებული უშუალოდ ხაზთან, მიიღწევა ნაკლები დიაპაზონის რეგულირებით და არ იწვევს მნიშვნელოვან ძაბვის ცვლილებას სხვა ძაბვის ქსელში, დაკავშირებული მოცემულ ქვესადგურთან.

2.5. მართვადი განივი კომპენსაციის დანადგარის სიმძლავრე და მოთხოვნები ღრმა რეგულირებასთან

ფიზიკური პარამეტრები, რომლებიც განსაზღვრავენ განივი კომპენსაციის დანადგარის სიმძლავრეს, წარმოადგენენ ხაზის რეაქტიული სიმძლავრის მაქსიმალურ ჭარბი და დეფიციტურ სიმძლავრეს, მაკომპენსირებელი მოწყობილობის განლაგების ადგილში.

ეს სიდიდეები თვისობრივად გადაცემის რეჟიმების ხასიათიდან განსაზღვრული, სახელდობრ უქმი სვლის რეჟიმებით და გადაცემის მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრით.

მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრის რეჟიმში რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტს მიყვავართ ხაზში ძაბვის შემცირებასთან, რაც ამცირებს პარალელური მუშაობის მდგრადობის მარაგს და ერთდროულად იწვევს ხაზში დანაკარგების გაზრდას.

მომქმედ ელექტროგადაცემაში დამმუხტავი სიმძლავრის კომპენსაციის ხარისხი, რომლის ქვეშ იგულისხმება მისი ფარდობითი წილი, მოთხოვნილი მაკომპენსირებელი მოწყობილობით, იცვლება ფართო ზღვრებში. მაგალითად ყოფილ საბჭოთა კავშირში პირველი გადაცემა 400-500 კვ ძაბვაზე სიგრძით 800-100 კმ, მათი ექსპლუატაციაში შეყვანის მომენტში გამოყენებული იყო არამართვადი განივი კომპენსაცია, რომლის სიმძლავრე არ აჭარბებდა 40% ხაზის მონაკვეთის დამმუხტავი მოწყობილობის. ასეთი ხარისხის კომპენსაციის დროს ადგილი აქვს სიმძლავრებს ზოგიერთი რეჟიმების განხორციელებაში [8].

რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა ტრანსფორმატორებით ან ავტოტრანსფორმატორებით ქვესადგურებში მაღალი ძაბვის ქსელიდან დაბალი ძაბვის ქსელში იწვევს არასასურველ ძაბვის დონეების ცვლილებას, არამწარმოებლურად გადატვირთვას მოწყობილობებს და იწვევს დანაკარგების გაზრდას.

კომპენსაციის ხარისხის არჩევა კონკრეტული გადაცემისათვის ემყარება ადგილობრივ პირობებს, რომელშიც შედის ისეთი ფაქტორები, როგორც ელექტროსისტემის მახასიათებლები, განპირობებული რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსით. ზოგადი რეკომენდაციები განივი კომპენსაციის მოწყობილობის სიმძლავრის მიხედვით მიდის კომპენსაციის ხარისხის ამადლებასთან ხაზის ნომინალური ძაბვის გაზრდასთან, მისი დაყვანა ზღვრულ მნიშვნელობამდე (100%) ან მასთან ახლოს ზემადალი ძაბვის გადაცემისათვის.

ქვემოთ მოყვანილია მონაცემები, რომლებიც ახასიათებენ ნომინალურ სიმძლავრეს განივი კომპენსაციის მოწყობილობის 100 კმ

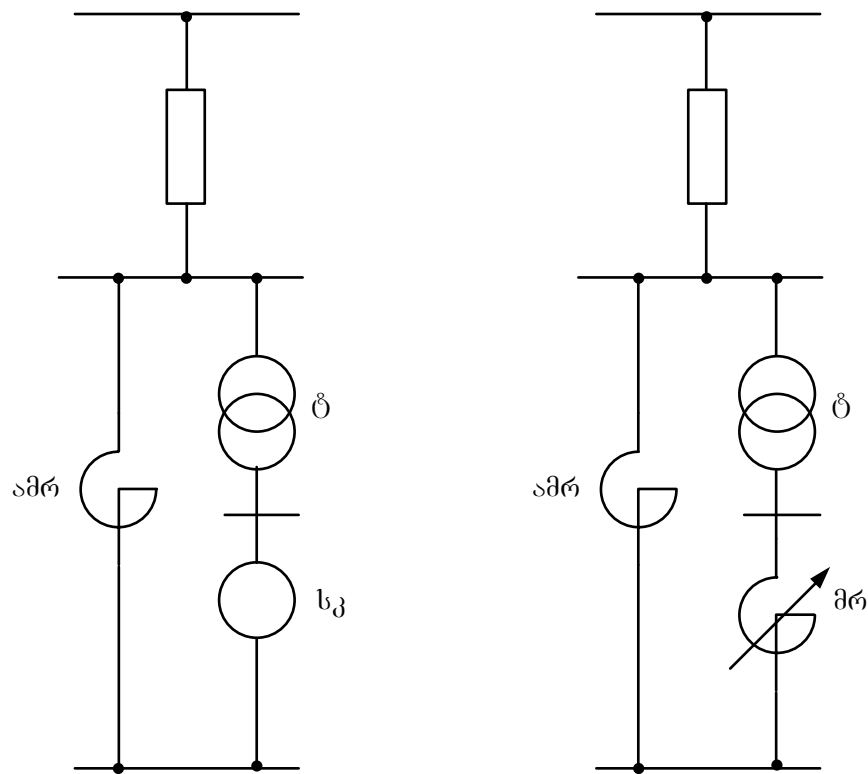
სიგრძეზე ერთჯაჭვიანი საპაერო ხაზის ძაბვის სხვადასხვა დონეებით, რომელიც შეესაბამება დამმუხტავი სიმძლავრის სრულ კომპენსაციას:

$$U_{კვ} \dots\dots\dots 220 \quad 330 \quad 500 \quad 750 \quad 1150$$

მაკომპენსირებელი დანადგარის ნომინალური სიმძლავრე,

$$\text{მგვარ} \dots\dots\dots 13,5 \quad 38 \quad 95 \quad 225 \quad 590$$

ცვლადი დენის მძლავრი გადაცემის რეჟიმების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ბევრი მათგანი, განსაკუთრებით პირველად ატარებენ ელექტროენერგიის ნაკადს, რომლის სიმძლავრე არ აჭარბებს 60-70% ხაზის ნატურალურ სიმძლავრეს. აღნიშნულ პირობებში განივი კომპენსაციის მოწყობილობის სიმძლავრის ცვლილება იმ სიდიდემდე, რომელიც მოეთხოვება მუშა რეჟიმს, იქნება ნაკლები, ვიდრე მათი ნომინალური სიმძლავრის დროს, არჩეული უქმი სვლის რეჟიმის მიხედვით. აქედან გამომდინარე შესაძლებლობა როგორც დავაკომპლექტოდ განივი კომპენსაციის დანადგარი, ისე რომ მათ შემადგენლობაში შედიოდეს როგორც მართვადი მოწყობილობა, ისე არამართვადი. ნახ. 2.3 ნაჩვენებია პრინციპიალური სქემები კომბინირებული დანადგარების. თითოეულ კონკრეტულ შემთხვევაში განივი კომპენსაციის დანადგარის შემადგენლობის შერჩევა უნდა დასაბუთდეს ეკონომიური მოსაზრებით, თუმცა პირველი შეხედვით შეცვლა ნაწილში მართვადი რეაქტორის არამართვადით წარმოგვიდგება მიზანშეწონილი როგორც კაპიტალური დაბანდებით, ისე სიმძლავრის და ენერგიის დანაკარგების მიხედვით.



ნახ. 2.3. განივი კომპენსაციის დანადგარის კომბინირებული სქემები.
 ამრ- არამართვადი რეაქტორი; ტ -ტრანსფორმატორი;
 სკ - სინქრონული კომპენსატორი; მრ - მართვადი რეაქტორი;

თავი III. განივი კომპენსაციისათვის მოწყობილობების სახეობები

3.1. ზოგადი მონაცემები

განივი კომპენსაცია გამოიყენება იმ მიზნით, რომ უზრუნველყოთ ძაბვების განაწილება ხაზებში და ზემოქმედება მოვახდინოთ რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობაზე და ნიშანზე გადაცემის ბოლოებში და კვანძებში, სადაც ხორციელდება ტრანსფორმატორული კავშირი სხვა ძაბვის ხაზებთან. თუ კომპენსაცია სრულდება მართვადი სტატიკური კომპენსატორების საფუძველზე, მაშინ გაჩნდება შესაძლებლობა გადავწყვიტოდ სამი ძირითადი რეჟიმული ამოცანები:

- პარალელური მუშაობის მდგრადობის უზრუნველყოფა;
- ნორმალურ რეჟიმებში ძაბვის რეგულირება;
- შიდა გადამეტაბვების შეზღუდვა.

გადაცემის საწყის ბოლოში და იმ კვანძებში, სადაც გაგვანია გენერატორები ელექტრული ენერჯის, ჩვეულებრივ მიმართულია რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის შენარჩუნებისკენ. მეორე მხრივ სინქრონული გენერატორების ერთეული სიმძლავრის გაზრდა, მიღწეული აქტიური მასალების ინტენსიური გამოყენებით, ზღუდავს მათ შესაძლებლობას, როგორც რეაქტიული სიმძლავრის წყარო და მომხმარებელი. იზრდება ნომინალური სიმძლავრის კოეფიციენტი: 100 მგვტ სიმძლავრის ტურბოგენერატორისთვის - 0,8; 500 მგვტ სიმძლავრის ტურბოგენერატორისთვის - 0,85; 800 და 1200 მგვტ სიმძლავრის ტურბოგენერატორებისთვის - 0,9. მომავალში პერსპექტიული 2000 და 3000 მგვტ სიმძლავრის ტურბოგენერატორებისთვის

გათვალისწინებულია - 0,95. იზრდება გარდამავალი რეაქტიული წინაღობა დაახლოებით 40%-მდე ორპოლუსიანი გენერატორებისთვის და 50%-მდე ოთხპოლუსიანი გენერატორებისთვის. მცირდება როტორის ფორსირების დენის დასაშვები ხანგრძლივობა. შედეგად უარესდება ენერგოსისტემაში გენერატორების პარალელური მუშაობის პირობები, კერძოდ რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნის რეჟიმში.

დიდი სიმძლავრეების გენერატორების აღნიშნული განსაკუთრებულობა, მოითხოვს ელექტროსადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური კომპენსატორების გამოყენებას ძაბვების რეჟიმების უზრუნველყოფისათვის. შესაბამისად იზრდება გადაცემის გამტარუნარიანობა მდგრადობის პირობების მიხედვით [9]. ასეთი დაყოფა ფუნქციის აქტიური (სასარგებლო) და რეაქტიული (გაცვლითი) სიმძლავრეების გენერაციის წარმოადგენს მეტად პერსპექტიულს ენერგეტიკული სისტემის რეჟიმების ეფექტური მართვისათვის.

განივი კომპენსაციის საშუალება, დადგმული გადაცემაზე დამყარებული რეჟიმების პირობების მიხედვით, რა თქმა უნდა ზემოქმედებს ძაბვების განაწილებაზე და მნიშვნელობაზე გარდამავალ რეჟიმებში. გარდა ამისა ზემაღალი ძაბვის (1000 კვ-ზე მეტი) გადაცემაში შიდა გადამეტაბვის შეზღუდვის საკითხები გავლენას ახდენენ კომპენსაციის საშუალების შერჩევაზე [10]. მაკომპენსირებელი მოწყობილობების ზოგიერთი სახეები ითავსებენ მართვის თვისებას არაწრფივი ბუნებრივი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების, ხასიათდებიან გადამეტაბვების შეზღუდვით. რა თქმა უნდა ასეთი

თვისებების შეთავსება ერთ მოწყობილობაში წარმოადგენს მის ღირსებას.

მაკომპენსირებელი მოწყობილობის რეგულირების სიჩქარეს გააჩნია მნიშვნელოვანი მნიშვნელობა გამტარუნარიანობის ამადლებისათვის სტატიკური მდგრადობის პირობის მიხედვით. მაკომპენსირებელი საშუალების ღირებულება და ენერჯის დანაკარგები მასში ზეგავლენას ახდენს მთლიანად გადაცემის ეკონომიკურ მაჩვენებელზე და მით მნიშვნელოვნად, რაც მეტია მისი გამტარუნარიანობა.

მოეთხოვება მაღალი საიმედოობის ხარისხი მაკომპენსირებელ მოწყობილობას, რადგან მისი დაზიანების შემთხვევაში მნიშვნელოვნად მცირდება გადაცემის გამტარუნარიანობა.

ბოლოს, მაკომპენსირებელი საშუალების მიერთებამ არ უნდა გამოიწვიოს გადაცემის ექსპლუატაციის გართულება: სინქრონული კომპენსატორებისთვის ეს შეიძლება იყოს მოკლედ შერთვის დენის გაზრდა, გარდამავალი პროცესის ხარისხის შემცირება, კომპენსატორების გამოვარდნა სინქრონიზმიდან; სტატიკური კომპენსატორებისათვის - მაღალი როგოს ჰარმონიკების წარმოქმნა.

მართვადი განივი კომპენსაციის საშუალება შეიძლება დაიყოს მოქმედების პრინციპის მიხედვით ორ ჯგუფად: ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორი და მარეგულირებელი მოწყობილობა.

მარეგულირებელი მოწყობილობას მიეკუთვნება: მართვადი რეაქტორები, რეაქტორ-ტირისტორული და კონდენსატორულ-

ტირისტორული ბლოკები და სტატიკური კომპენსატორები მათ საფუძველზე, აგრეთვე სინქრონული კომპენსატორები.

ტერმინი სტატიკური კომპენსატორი აღნიშნავს კომპლექსურ მოწყობილობას, არ შეიცავს მოძრავ ნაწილებს, რომელიც სასარგებლოა როგორც მომხმარებლისთვის, ისე რეაქტიული სიმძლავრის გენერირებისათვის. რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობა იცვლება კომპენსატორის მარეგულირებელ ელემენტზე ზემოქმედების გზით, კერძოდ, მის მომჭერებზე ძაბვის უცვლელობის დროს. რეაქტიული სიმძლავრე პარამეტრული სტაბილიზატორის, კომპენსატორისგან და მარეგულირებელი მოწყობილობისაგან განსხვავებით, იცვლება მხოლოდ მომჭერებზე ძაბვის ცვლილების დროს.

500 კვ და მეტი ძაბვის გადაცემაზე ჩვეულებრივ აყენებენ მაშუნტირებელ არარეგულირებად რეაქტორებს ხაზოვანი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებით.

3.2. ძაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორები

პარამეტრული სტაბილიზატორის ძირითად ელემენტს წარმოადგენს გაჯერებული რეაქტორი, ე.ი. რეაქტორი არაწრფივი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებით, განპირობებული გაჯერებით მისი მაგნიტური სისტემის. რეაქტორის მაგნიტური სისტემა მზადდება ცინკალინი ფოლადისაგან, მცირე ხვედრითი დანაკარგებით და პრაქტიკულად დამაგნიტების მართკუთხა მახასიათებლით. წარმოდგენას

მასხასიათებლის დახრილობაზე იძლევა შემდეგი ციფრები, რომლებიც მიეკუთვნება რეაქტორს 45 მგ.ა, 11 კვ; დინამიკური ინდუქციური წინაღობა გაჯერების არეში -0,4 ომი;

გაუჯერებელ არეში - 30 ომი, ე.ი. 75-ჯერ მეტი. აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ნომინალური დენის დროს ნაკლებია 0,7%-ით.

მუშა დაბვა გაჯერებული რეაქტორის არ აჭარბებს 33 კვ, და ის შეერთებულია ხაზთან ტრანსფორმატორით. შუალედური ტრანსფორმატორის მაგნიტური განბნევის წინაღობა ემატება რეაქტორის წინაღობას და იზრდება ის 30-40%-ით. ანგარიშები აჩვენებს, რომ ასეთი დინამიკური წინაღობის დროს და რეაქტორის ნომინალური სიმძლავრის დროს მისი მასტაბილიზირებული მოქმედება სავსებით არასაკმარისია. ამიტომ გაჯერებული რეაქტორის მიმდევრობით ჩართულია კონდენსატორი, რომ შევამციროდ დაბვის მიხედვით სტატიზმი. კონდენსატორების ბატარეების სიმძლავრე შეადგენს 10-15% რეაქტიული სიმძლავრის.

შევნიშნავთ, რომ ტევადური კომპენსაციის დროს რეაქტორის წრედში განბნევის წინაღობა გარდაუვალია და მისი შესრულება მაღალი მუშა დაბვით, ტოლია ხაზის დაბვის.

დაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორი შეიძლება აიგოს გაჯერებული რეაქტორის ბაზაზე მბრუნავი მაგნიტური ველით. უპირატესობა მაგნიტური სისტემის მბრუნავი მაგნიტური ველით გამოიხატება სრული გამორიცხვით მაღალი რივის ჰარმონიკების.

დაბვის პარამეტრული სტაბილიზატორის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს სტატიზმი დაბვის მიხედვით, რომელიც შეადგენს

რამოდენიმე პროცენტს. კონდენსატორის გარეშე პარამეტრული სტაბილიზატორი რეაქტორის წრედში არა ეფექტურია, როგორც საშუალება გამტარუნარიანობის ამაღლებისა, თუმცა სასარგებლოა შიდა გადამეტაბვის შეზღუდვისათვის.

3.3. მართვადი რეაქტორები და ტრანსფორმატორები

რეაქტორები მართვადია, რომლის პარამეტრები იცვლება შემავნიტების საშუალებით. ანალოგიურად მართვადია ტრანსფორმატორები როცა მისი მაგნიტოგამტარი შემავნიტდება რეაქტიული მომხმარებლის გაზრდის მიზნით.

მართვადი რეაქტორები არსებობენ გრძივი, განივი და რგოლისებრი შემავნიტებით (ბოლო - როცა გამოიყენება მბრუნავი მაგნიტური ველი).

რგოლისებრი შემავნიტება გამოიყენება რეაქტორების მართვისათვის მბრუნავი მაგნიტური ველით. ასეთი ტიპის რეაქტორები ხასიათდებიან ელექტრომაგნიტური სიმეტრიით, რომლის შენარჩუნება ხორციელდება მუდმივი დენის შემავნიტებით. პრაქტიკულად გამორიცხულია რეაქტორის დენში მაღალი რივის ჰარმონიკები (ნაკლებია 1%-ზე), ყველა ნორმალურ რეჟიმებში, მიუხედავად იმისა, რომ მიმდინარეობს მაგნიტოგამტარის შემავნიტება და ამით განპირობებულია ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების არაწრფიეობა. რეაქტორის უპირატესობას წარმოადგენს აგრეთვე გამორიცხვა პირდაპირი ელექტრომაგნიტური კავშირის ძირითადი სამფაზა

გრაგნილსა და მართვის გრაგნილს შორის, უზრუნველყოფს მუდმივი დენის წყაროს ფორსირების ეფექტურობას. კონსტრუქციულად ასეთი რეაქტორი შეიძლება დამზადდეს 300-400 მგვა ერთეული სიმძლავრით, 35 კვ ძაბვამდე.

3.4. რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები

რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკები წარმოადგენენ კომბინაციას არამართვადი რეაქტორისა და წრფივი მახასიათებლებით და ტირისტორებით, მართვადი სპეციალური კანონით. ბუნებრივია, რომ ოროვე ელემენტი, მაგროვებლის და რეგულირების უნდა იქნეს გათვლილი ბლოკის ნომინალურ დენზე და ძაბვაზე.

მართვად რეაქტორში გამოიყენება მაგნიტური მაძლიერებლის ეფექტი, ამიტომ მარეგულირებელი რგოლის სიმძლავრე (მუდმივი დენის წყარო) მიიღება ორი-სამი რიგით ნაკლები, ვიდრე რეაქტორის ნომინალური სიმძლავრე.

რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკში გათვალისწინებულია შუალედური ტრანსფორმირება ხაზის ძაბვასთან, რადგან ეკონომიკური მოსახრებით ტირისტორები ხელსაყრელია დაიდგას საშუალო ძაბვაზე 35 კვ-მდე.

პრინციპში ტირისტორები შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც გასაღები რეაქტორების სიმძლავრის საფეხუროვანი რეგულირებისათვის. ტირისტორების საშუალებით კომუტაცია შეიძლება

განგახორციელოდ გარდამავალი პროცესის გარეშე რეაქტორის საკომუტაციო წრედში.

დიდი სიმძლავრის ბლოკებში ხორციელდება მდოვრე რეგულირება რეაქტიული სიმძლავრის ტირისტორების გაღების კუთხის ცვლილებით, ე.ი. დენის გატარების ხანგრძლივობა განსახილველ პერიოდში. ამ დროს აღიძვრება მაღალი რიგის ჰარმონიკები, რომლებიც აღწევს 5% და მეტს. რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკი შეიძლება ჩაირთოს მუშაობაში მხოლოდ მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრთან ერთობლივად.

რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკში სიმძლავრის რეგულირება ხორციელდება სწრაფად, მუშა სიხშირის ერთი-ორი პერიოდში.

3.5. კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკები

რეაქტორ-ტირისტორული ბლოკებისაგან განსხვავებით კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკებში ტირისტორები გამოიყენება გასაღების რეჟიმში და ახორციელებენ კონდენსატორების სიმძლავრის საფეხუროვან ცვლილებას. ბლოკებში არ აქვს ადგილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების გენერაციას.

პარალელურად შეერთებული არამართვადი რეაქტორის კონდენსატორულ-ტირისტორული ბლოკთან წარმოადგენს სტატიკურ კომპენსატორს კარგი ტექნიკური მახასიათებლებით: ფაზური რეგულირების შესაძლებლობა; ძირითადი სიხშირეზე რეჟიმის მდგრადობა; მაღალი რიგის ჰარმონიკების არ არსებობა; სწრაფქმედება.

უნდა აღინიშნოს აგრეთვე, რომ ცვლადი დენის გადაცემის განივი კომპენსაციისათვის, სადაც არაა აუცილებელი ფაზური რეგულირება, შეიძლება შეიქმნას უფრო იაფი და მეტად საიმედო სტატიკური კომპენსატორი კომბინაციის გზით არარეგულირებადი კონდენსატორთა ბატარეებით და მბრუნავი მაგნიტური ველით მართვადი რეაქტორებით.

კონდენსატორულ-ტირისტორულ ბლოკს უწყვეტი (ფაზური) რეგულირებით, უწოდებენ აგრეთვე რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს (რსწ).

3.6. სინქრონული კომპენსატორები

როგორც ცნობილია, კომპენსატორის ნომინალური სიმძლავრე ნაჩვენებია რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის რეჟიმისათვის. მოთხოვნის რეჟიმში ის მცირდება 0,7-0,8 ნომინალურამდე. სიმძლავრის დანაკარგები კომპენსატორში შეადგენს დაახლოებით 1% ნომინალურის, თანაც დანაკარგების მესამე ნაწილი არაა დამოკიდებული სტატორში დენის სიდიდეზე.

ძირითადი უპირატესობა სინქრონული კომპენსატორის, როგორც საშუალება განივი კომპენსაციის, წარმოადგენს მდოვრე რეგულირება და გამოსადგია, როგორც გენერაციისათვის, ისე მომხმარებლისათვის რეაქტიული სიმძლავრის, აგრეთვე შედარებით დაბალი ღირებულება.

სინქრონული კომპენსატორის ნაკლოვანებას წარმოადგენს მისი მბრუნავი ნაწილი, რომელიც საჭიროებს მუდმივ კონტროლს. არა

ნაკლებ წელიწადში ერთხელ სინქრონული კომპენსატორი გამოირთვება კონტროლისა და რემონტისათვის.

სინქრონული კომპენსატორს გააჩნია დიდი შიდა წინაღობა და დიდი დროის მუდმივა აგზნების წრედს, და ამიტომ უნდა იყოს აღჭურვილი ძლიერი მოქმედების ავტომატური რეგულატორით, რომლის სტრუქტურული სქემა მნიშვნელოვნად რთულია, ვიდრე, მაგალითად, იმ შემთხვევაში, როცა გვაქვს მართვადი რეაქტორი მბრუნავი მაგნიტური ველით.

კომპენსატორის მომჭერებზე ძაბვის სტაბილიზაციისათვის მისი აგზნების სისტემა უნდა იყოს გათვლილი 10-15 ჯერადზე ძაბვის ფორსირების, რაც მნიშვნელოვნად ამადლებს კომპენსატორის ღირებულებას და ართულებს მის კონსტრუქციას.

კომპენსატორის შიდა წინააღობის გავლენა შეიძლება შემცირდეს კონდენსატორების ჩართვით სტატორის გრაგნილების წრედში. მეორე მხრივ ამ დროს იქმნება პირობა, თვითაგზნების აღძვრის და მანქანის თვითგაშვების. თვითაგზნება შეიძლება გასწორდეს დამატებითი აგზნების გრაგნილის დახმარებით განივი ღერძში, რომელიც იკვებება ცალკე აგზნებით. სიმძლავრე დამატებითი გრაგნილის 7-10% შეადგენს ძირითადი აგზნების გრაგნილის სიმძლავრის ნორმალურ რეჟიმში.

ბოლოს, შეიძლება აღინიშნოს, რომ სინქრონული კომპენსატორი ახდენს მცირე გავლენას გადაცემაში შიდა გადამეტაბების მნიშვნელობაზე. მათი შეზღუდვისათვის აუცილებელია მაშუნტებელი რეაქტორი წრფივი, ან უკეთესია არაწრფივი მახასიათებლით.

3.7. განივი კომპენსაციისათვის სხვადასხვა სახის

მოწყობილობების შეპირისპირება

მართვადი განივი კომპენსაცია შეიძლება რეალიზებული იქნეს სინქრონული კომპენსატორების საშუალებით და სტატიკური კომპენსატორებით არ შეიცავს მბრუნავ ნაწილებს. მუშა ძაბვა კომპენსატორების და სტატიკური მოწყობილობების არ აჭარბებს 35 კვ. მიერთება გადაცემაზე ხორციელდება შუალედური ტრანსფორმატორით. მარეგულირებელი რგოლი მართვადი კომპენსაციის აღმოჩნდა მიზანშეწონილი შესრულებულიყო საშუალო ძაბვაზე.

სინქრონული კომპენსატორები დიდი ხანია გამოიყენება ელექტრულ ქსელებში ძაბვის დაჭერისათვის ნორმალურ რეჟიმებში და ქსელებში ელექტრული ენერჯის დანაკარგების შემცირებისათვის. ასეთი კომპენსატორების გამოყენება ცვლადი დენის გადაცემის გამტარუნარიანობის ამაღლებისათვის რთულდება. ეს ნაკლოვანებები განპირობებულია კომპენსატორის მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე.

ტექნიკურ ლიტერატურაში ნათლად იკვეთება ტენდენცია სინქრონული კომპენსატორებზე უარის თქმის და მათი შეცვლით სტატიკური კომპენსატორებით.

ნებისმიერი სტატიკური კომპენსატორი შეიცავს მაგროვებელ ელემენტებს (ინდუქციურობას, ტევადობას) და მარეგულირებელ ელემენტს. მარეგულირებელ ელემენტს წარმოადგენს ტირისტორი.

კომპენსატორი მართვადი რეაქტორის საფუძველზე რეგულირდება მაგნიტური მაძლიერებლის ეფექტის გამოყენებით, რომლის კოეფიციენტი დიდი სიმძლავრის რეაქტორში იცვლება 300-დან 500-მდე.

ეს ნიშნავს, რომ ტირისტორული დანადგარის სიმძლავრე, რომელიც კვებას მართვის წრედს, შეადგენს 1-2% რეაქტორის ნომინალური სიმძლავრის.

სხვადასხვა ტიპის სტატიკური კომპენსატორები შეიძლება შესრულებული იქნეს სწრაფმომქმედი, ეკვივალენტური დროის მუდმივათი 0,05-0,1 წმ, როგორც ეს მოეთხოვება სტატიკური მდგრადობის პირობის მიხედვით გამტარუნარიანობის ამადლებისათვის. უზრუნველყოფილია აგრეთვე აუცილებელი ზღვრები რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირების და ძაბვის სტაბილიზაციის სიზუსტე.

გაჯერებული და მართვადი რეაქტორები, აგრეთვე რეაქტორული-ტირისტორული ბლოკები ეფექტურად ზღუდავენ შიდა გადამეტაბვას. ამაში მდგომარეობს მათი მნიშვნელოვანი უპირატესობა სინქრონული კომპენსატორებთან შედარებით.

თავი IV. საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციების შემუშავება

4.1. ზოგადი მონაცემები

მომხმარებლების ნომინალური მუშაობის უზრუნველყოფისათვის აუცილებელია როგორც აქტიური, ისე რეაქტიული სიმძლავრე. რეაქტიული სიმძლავრე იხარჯება მაგნიტური ველის შექმნისათვის და არ მოითხოვს საწვავის ხარჯს. თუმცა მისი გადაცემა ხაზით დაკავშირებულია გარკვეულ ხარჯებთან აქტიური სიმძლავრის ქსელის ელემენტებში. აღნიშნულ ელემენტებში იხარჯება რეაქტიული სიმძლავრე, რაც მოითხოვს მისი გენერაციის გაზრდას. ამიტომ რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნის შემცირებას მიყვავართ აქტიური სიმძლავრის ეკონომიასთან, სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებასთან.

ქსელის რაციონალური დაგეგმარების ამოცანა (არჩევა კონფიგურაციის, კვეთის, ტრანსფორმატორების სიმძლავრეები და სხვა) და ქსელის განვითარების ოპტიმიზაცია მდგომარეობს შენარჩუნებული იქნეს თანაფარდობა ქსელის ღირებულებასა და სიმძლავრის დანაკარგებს შორის, ე.ი. უზრუნველყოფაში დაყვანილი დანახარჯების მინიმუმის. მეორე მხრივ შესაძლებელია ღონისძიებების ჩატარება სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებისათვის, რომელიც არ მოითხოვს დიდ დანახარჯებს; დაყენება სპეციალური პირველადი (ვოლტსამატი ტრანსფორმატორების, მაკომპენსირებელი მოწყობილობების და სხვა) და მეორადი (ავტომატიკის და სარელეო დაცვის) მოწყობილობა.

ცხრილი 4.1-ში ნაჩვენებია სიმძლავრის დანაკარგების ძირითადი სახეები ქსელის სხვადასხვა პირობითი ჯგუფებისათვის. თავის მხრივ დანაკარგები იყოფა: ტექნიკური, ორგანიზაციული და კომერციული.

ტექნიკური - ითვალისწინებს ქსელის რეკონსტრუქციას და შეცვლას ან დაყენებას დამატებითი მოწყობილობების. მათ მიეკუთვნება:

- მაკომპენსირებელი მოწყობილობის დაყენება;
- სადენების შეცვლა სადენებით დიდი ან ნაკლები კვეთებით;
- გადატვირთული და დაუტვირთავი ტრანსფორმატორების შეცვლა;
- მარეგულირებელი მოწყობილობის დადგმა;
- ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის ავტომატური რეგულირება;
- კონდენსატორთა ბატარეების სიმძლავრის ავტომატური

რეგულირება;

- სიმძლავრის ნაკადების რეგულირების მოწყობილობის დაყენება მაღალი და ზემდაღალი ძაბვის არაერთგვაროვანი შეკრულ ქსელებში.

- ქსელების გადაყვანა უფრო მაღალი ნომინალური ძაბვაზე;
- ობიექტების კაპიტალური მშენებლობის შემდეგ ქსელების კონფიგურაციის და ოპტიმალური სქემების შექმნა;

- დანერგვა თანამედროვე რელეური დაცვის, ავტომატიკის, ტელემექანიკის და გაზომვის მოწყობილობების.

ორგანიზაციული - ითვალისწინებს მომსახურების გაუმჯობესებას, ქსელების სქემების და მათი მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაციას.

მათ მიეკუთვნება:

- რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით ქსელების დამყარებული რეჟიმების ოპტიმიზაცია;
- 10-35 კვ. ძაბვის ქსელის გაყოფის ოპტიმიზაცია;
- სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტის დროს სისტემის გენერატორების გადაყვანა სინქრონული კომპენსატორების რეჟიმში;
- რადიალური ქსელების კვების ცენტრში მუშა ძაბვების ოპტიმიზაცია;
- მცირე დატვირთვის რეჟიმებში ტრანსფორმატორების გამორთვა;
- ქსელებში ფაზების დატვირთვის გათანაბრება;
- მომსახურების და რემონტების ხარისხის გაუმჯობესება და ხანგრძლივობის შემცირება;
- დანაკარგების შემცირების ახალი მეთოდების გამოკვლევა და დამუშავება.

კომერციული - ითვალისწინებს მომსახურების გაუმჯობესებას.

მათ მიეკუთვნება:

- მრიცხველების დაყენება;
- ბრძოლა დატაცებასთან;
- აღრიცხვიანობის სისტემის გაუმჯობესება.

სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიება ხორციელდება როგორც დაგეგმარების ისე ექსპლუატაციის პროცესში. საექსპლოატაციო ღონისძიებას ატარებენ მუდმივად რეჟიმების ოპტიმიზაციით.

ცხრილი 4.1. სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგების სახეები

ენერგოსისტემის ქსელების ჯგუფები	დანაკარგების ძირითადი სახეები
<p>ზემაღალი ქსელი (330-750 კვ) და მაღალი (110-330 კვ) ძაბვის 110-750 კვ (გრძელი ელექტროგადაცემა; სისტემათა შორისი კავშირი; სისტემადწარმოქმნილი ქსელი 110-500 კვ)</p> <p>განმანაწილებელი ქსელი საშუალო ძაბვების 10-35 კვ.</p> <p>განმანაწილებელი ქსელი დაბალი ძაბვის 1000 ვ-მდე</p>	<p>უქმი სვლა: (დატვირთვაზე არა დამოკიდებული)</p> <ul style="list-style-type: none"> - გვირგვინზე - ტრანსფორმატორები ფოლადში - მაკომპენსირებელი მოწყობილობის პარალელურ წრედებში <p>დატვირთვის: (დამოკიდებული დატვირთვაზე)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ხაზებში - ტრანსფორმატორების გრაგნილებში - მაკომპენსირებელი მოწყობილობის მიმდევრობით წრედებში <p>დატვირთვის:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ხაზებში - ტრანსფორმატორების გრაგნილებში <p>უქმი სვლა: ტრანსფორმატორების გრაგნილებში</p> <p>დატვირთვის:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ხაზებში - გამოწვეული ფაზის არასიმეტრიული დატვირთვით

ქსელში დატვირთვის გაზრდით დანაკარგები იზრდება და თანაფარდობა ქსელის ღირებულებასა და დანაკარგებს შორის გადაიხრება ნომინალურისაგან, მომხმარებლების ქსელში აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის ცვლილება დაკავშირებულია აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების გადადინების ცვლილებასთან ენერგოსისტემაში შესაბამისი ცვლილებით მასში დანაკარგების. ამიტომ

დანაკარგების დონე აუცილებელია მუდმივად ვაკონტროლოთ, რადგანაც ისინი ახასიათებენ მთელი ქსელის მუშაობის ეკონომიურობას.

4.2. ელექტროგადაცემის არსებული და პერსპექტიული სისტემები

დღემდე დაახლოებით 95% ელექტროენერჯის გადაცემა საჰაერო ხაზებით. ეს განპირობებულია მთელი რიგი არსებითი უპირატესობით, რომლებითაც ხასიათდება საჰაერო ხაზები:

- ნაკლები დანახარჯები მშენებლობაზე. ღირებულება ერთი საჰაერო ხაზის შეადგენს 1/9-1/26-ის მიწისქვეშა კაბელის ღირებულების იგივე გამტარუნარიანობით [11];

- დაზიანების სწრაფი აღმოფხვრა;

- დაბალი დიელექტრიკული დანაკარგები, ვინაიდან იზოლაციად გამოყენებულია ჰაერი;

- შესაძლებლობა უზრუნველყოფის მაღალი ძაბვის ხარჯზე დიდი გამტარუნარიანობის მიღწევა.

გრძელი საჰაერო ხაზისთვის გამტარუნარიანობა განისაზღვრება ნატურალური სიმძლავრით, ხოლო მოკლე საჰაერო ხაზისთვის გახურების სიმძლავრით. ნატურალური სიმძლავრე განისაზღვრება ძაბვით

$$P_{\text{ნატ.}} = \frac{U^2}{Z_{\text{ტაღლ.}}},$$

სადაც U -გადაცემის ძაბვა; $Z_{ტაღლ.}$ - საჰაერო ხაზის ტაღლური წინაღობა. ტაღლური წინაღობა მძლავრი საჰაერო ხაზისთვის შეადგენს 200-400 ომს.

ამგვარად, საჰაერო ხაზის გამტარუნარიანობა შეიძლება გაიზარდოს ორი მეთოდით. პირველი, შეიძლება გავზარდოთ ძაბვა 1000-1500 კვ. ამ მიმართულებით მიმდინარეობს წარმატებითი კვლევები.

მეორე, შეიძლება გავზარდოთ სიმძლავრე, გაცხელების მიხედვით, რომელიც 3-7 ჯერ აჭარბებს ნატურალურ სიმძლავრეს. ამის მიღწევა შეიძლება სადენების ზომების გაზრდით და წრედების რიცხვის გაზრდით ერთ საყრდენზე.

ამჟამად მიწისქვეშა საკაბელო წრედი, მაღალი სიმძლავრის შეადგენს 4-5% ყველა მძლავრი ხაზის სიგრძის. ამის მიზეზი დაკავშირებულია კაბელის მაღალი ღირებულებით და მისი მონტაჟის სირთულეზე, რომელიც 10-20 ჯერ მეტია მისი ღირებულება, შესაბამისი საჰაერო ხაზის ღირებულებასთან.

როგორც არნიშნული იყო დღესდღეობით ელექტროენერგია ძირითადად გადაიცემა საჰაერო გადამცემი ხაზებით და მხოლოდ მისი მცირე ნაწილი გადაიცემა უშუალოდ მიწისქვეშა კაბელებით. ძირითად ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს შედარებით საჰაერო გადამცემი ხაზების არამაღალი ღირებულება.

მეორე მხრივ უნდა აღინიშნოს, რომ მომავალში ეტაპობრივად გაიზრდება ელექტროგადაცემა მიწისქვეშა კაბელებით, განსაკუთრებით დიდი ქალაქების რაიონებში, სადაც ასეთი მიწისქვეშა კაბელები მისაღებია.

ინტერნეტის ბოლო მონაცემებით აშშ-ში მიმდინარეობს მშენებლობა მსოფლიოში პირველი ელექტროგადამცემი ხაზის - მაღალტემპერატურული ზეგამტარული კაბელის. 600 მეტრი სიგრძის ხაზი აწყობილია ზეგამტარებისაგან სიგრძით 100 მეტრი მონაკვეთებისაგან და გათვლილია 140ა დენის ძალაზე და 138 კვ. ძაბვაზე. დენგამტარი ზეგამტარი წარმოდგენილია კომპოზიციური მასალის ზოლებისაგან (იტრიუმი-ბარიუმი-სპილენძი) სისქით 0,2 მმ და სიგანით 4 მმ. მთელი კონსტრუქცია კაბელის ცივდება თხევადი აზოტით - 196°C ტემპერატურამდე. შედარებისთვის კაბელი სპილენძის ძარღვებით, გათვლილი გადაცემაზე ასეთი ელექტრული სიმძლავრით, უნდა იყოს ასჯერ მეტი კვეთის.

4.3. ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით

ზეგამტარული გრაგნილების გამოყენება ძალოვან ტრანსფორმატორებში გავლენას ახდენს, როგორც ელექტრომაგნიტურ პროცესებზე, რომლებიც მიმდინარეობს მასში, ასევე მის კონსტრუქციულ შესრულებაზე, აუმჯობესებს ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებს და აფართოებს მისი პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობას.

ზეგამტარული ტრანსფორმატორის (ზგტ) გრაგნილები შეიძლება შესრულებული იქნეს, როგორც დაბალტემპერატურულ 4,2 კ

ზეგამტარების (დტზგ), ასევე მაღალტემპერატურულ 77 კ ზეგამტარების (მტზგ) გამოყენების საფუძველზე.

ზეგამტარული სადენების (ზგს) გამოყენების ძირითად უპირატესობას წარმოადგენს მასში დენის სიმკვრივის გაზრდის შესაძლებლობა ორი-სამი რიგით, შედარებით ჩვეულებრივ (სპილენძი, ალუმინი) სადენების დენის სიმკვრივესთან. არსებითი განსხვავება ზგს-ა და ჩვეულებრივ სადენებს შორის წარმოადგენს ის, რომ ზგს-ში დანაკარგების და დენის სიმკვრივის დასაშვები სიდიდეები მთლიანობაში დამოკიდებულია მაგნიტური ველის ინტენსივობაზე, როცა ჩვეულებრივ სადენებში ასეთი დამოკიდებულებას ადგილი არა აქვს. ამასთან დაკავშირებით ანგარიშის მეთოდები და ოპტიმიზაციის ამოცანები ჩვეულებრივ სადენებში და ზგს-ში სხვადასხვაა. ჩვეულებრივ სადენებში დენის სიმკვრივე j სადენის მთლიან კვეთში რჩება მუდმივი და ოპტიმიზაციის ამოცანა დადის სადენში ჯოჯოხის ელექტრული დანაკარგების მინიმალურ მიღებასთან. დენი წრიული კვეთის d დიამეტრის ჩვეულებრივ სადენში არ არის დამოკიდებული მაგნიტურ ველზე

$$i = \frac{\pi}{4} j d^2 \quad (4.1)$$

სადენის კვეთის მიხედვით დენის სიმკვრივე $j = const$ და დენი სადენის დიამეტრის კვადრატის პროპორციულია.

ზგტ-ის ძალოვანი გრაგნილების ზგს-ში ოპტიმიზაციის ამოცანა ფართოა და მდგომარეობს შემდეგში:

1. სადენის ზეგამტარულ დენგამტარის ძარღვებში ჰისტერეზისული და გრიგალური დანაკარგების შემცირება და ასევე ზგს-ის

მასტაბილიზებელი მეტალში ელექტრული და გრიგალური დანაკარგების შემცირება.

2. ზგს-ის დენგამტარუნარიანობის ამაღლება და სადენის ხარჯის შემცირება.

3. ზგს-ის და ტრანსფორმატორის ზეგამტარული გრავნილების ინდუქციურობის და ინდუქციური წინააღობის შემცირება. ზგტ-ის მოკლე შერთვის ძაბვის $U_K\%$ შემცირება.

4. ზგს-ის საიმედოობის ამაღლება მისი სტაბილიზაციის საფუძველზე.

ზგს-ში დენების სიმკვრივე არ რჩება მუდმივი ზგს-ის კვეთის მიხედვით და დამოკიდებულია ველის მაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელობაზე განსახილველ წერტილში და ზგს-ის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის სიდიდეზე. ზგს-ის ზედაპირზე მაგნიტური ველი შეიძლება შეიქმნას არა მხოლოდ თვით ზგს-ის დენით, არამედ სხვა დენებით, ახლოს განლაგებული ზგს-ით. ჯამური მაგნიტური ველის ინტენსივობის გაზრდით, დენის სიმკვრივე და დენგამტარუნარიანობა მკვეთრად მცირდება და დანაკარგები ზგს-ში იზრდება. მაქსიმალური დენგამტარუნარიანობა მინიმალური დანაკარგების შემთხვევაში მიიღწევა, როცა სრულად გამორიცხულია გარე მაგნიტური ველები, როცა ზგს იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, შექმნილი თვით ზგს-ის დენით. ამ შემთხვევაში დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ზგს-ში დამოკიდებულია მხოლოდ სადენის საკუთარ პარამეტრებზე. ასეთ სადენებს შემდგომში ვუწოდებთ ზგს ლოკალიზებულ მაგნიტური ველით (ზგსლ). ზგსლ ოპტიმალურ ფორმად ითვლება სადენის

ცილინდრული ფორმა. მაგნიტური ველი ასეთ ზგს-ში შეიღწევა სადენის ზედაპირიდან, რომელიც განსაზღვრულია შეღწევადობის სიღრმით λ და, როცა λ ტოლია ზგს-ის რადიუსის r_0 , ასეთი ზგს სრულად შევსებულია დენით. აღნიშნული დენის სიდიდე მიღებულია კრიტიკული დენის მნიშვნელობად

$$i_{\text{კ}} = \frac{\pi}{\mu_0} B_{\text{კ}} d, \quad (4.2)$$

სადაც d -ზგს-ის დიამეტრია; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰნ/მ.

კრიტიკული დენი შეესაბამება ველის მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკულ მნიშვნელობას ზგს-ის ზედაპირზე.

$$B_0 = B_{\text{კ}}$$

დენის სიმკვრივე $j_{\text{კ}}$ ამ შემთხვევაში, აგრეთვე აღწევს თავის კრიტიკულ მნიშვნელობას

$$j_{\text{კ}} = \frac{i_{\text{კ}}}{S_{\text{კ}}} = 4 \frac{B_{\text{კ}}}{\mu_0 d}, \quad (4.3)$$

სადაც $S_{\text{კ}}$ -სადენის კვეთის ფართობია.

(4.2) ფორმულიდან ჩანს, რომ ზგს-ის დენგამტარუნარიანობა იზრდება მისი d დიამეტრის პროპორციულად და არა დიამეტრის კვადრატისა d^2 , რასაც ადგილი აქვს ჩვეულებრივ სადენებში (4.1) ფორმულა. გარდა ამისა, ზგს-ის დენგამტარუნარიანობა განისაზღვრება ველის მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობით სადენის ზედაპირზე. ეს გარემოება დაკავშირებულია იმასთან, რომ, როგორც (4.3) ფორმულიდან ჩანს, ზგს-ის d დიამეტრის გაზრდით კრიტიკული დენის სიმკვრივე მცირდება. შესაბამისად, ზგს-ის დიამეტრის შემცირება იწვევს კრიტიკული დენის სიმკვრივის და სადენის

დენგამტარუნარიანობის გაზრდას. ზგს-ის დიამეტრის შემცირებით მიიღწევა, აგრეთვე მნიშვნელოვანი შემცირება ჰისტერეზისული და გრიგალური დანაკარგების სადენში. აღნიშნულთან დაკავშირებით, მიზანშეწონილია დიდი დიამეტრის ერთპარღვიანი ზგს-ის ნაცვლად გამოყენებული იქნეს, მრავალპარღვიანი ზეგამტარული სადენები ლოკალიზებული მაგნიტური ველით (მმზგსლ), რომელშიც ზეგამტარული ძარღვის დიამეტრის d_1 , შედარებით სადენის დიამეტრთან შეადგენს უმნიშვნელო სიდიდეს. ლოკალიზებულობა მაგნიტური ველის მრავალპარღვიანი ზეგამტარული სადენის $d_1 \ll d_2$, მიიღწევა ზეგამტარულ ძარღვებს შორის მანძილის გაზრდის ხარჯზე, ე.ი. ზგს-ის შევსების კოეფიციენტის შემცირებით, გარკვეულ ოპტიმალურ სიდიდემდე, რომლის დროსაც ურთიერთ მაგნიტური გავლენა ზეგამტარულ ძარღვებს შორის პრაქტიკულად გამორიცხებულია.

მმზგსლ-ის საფუძველზე მიზანშეწონილია შესრულება ტრანსფორმატორების ძალოვანი გრაგნილების, როცა გარდა დენგამტარუნარიანობისა და მ.ქ.კ-ის გაზრდისა, დგას ამოცანა გარე მაგნიტური ველების და ძალოვანი გრაგნილების რეაქტიული წინააღობების შემცირების.

მმზგს-ში დენგამტარუნარიანობის გაზრდა და მატრიცაში გრიგალური დენებისაგან გამოწვეული დანაკარგების შემცირება მიიღწევა დაგრეხილი სადენების ხარჯზე.

ზგს-ის საიმედოობის ამაღლებისათვის, როცა გამოვლინდება მასში გრაგნილის ნორმალური ფაზა, აუცილებელია ზეგამტარული სადენების სტაბილიზაციის გამოყენება, რათა აღიკვეთოს ნორმალური ფაზის

გაგრძელება. ზეგამტარული ძარღვის კვეთსა და სტაბილიზაციის მეტალს შორის თანაფარდობის ცვალებადობით, შეიძლება შევცვალოთ სტაბილიზაციის ხარისხი და ურთიერთგავლენის ხარისხი ზეგამტარულ ძარღვებს შორის. მძგს-ის შევსების კოეფიციენტი

$$K_{\text{შ}} = \frac{S_{\text{ზგდ}}}{S_{\text{სრ}}}$$

სადაც $S_{\text{ზგდ}}$ -ზეგამტარული ძარღვების კვეთი,

$S_{\text{სრ}}$ -ზეგამტარული სადენის სრული კვეთი.

მძგს-ის $K_{\text{შ}}$ შეადგენს 0,3-0,6: მძგსლ-ის კი $K_{\text{შ}} \ll 1$. ენერგეტიკული დანიშნულების ზგტ-ის შექმნისათვის აუცილებელია გამოყენებული იქნეს ზგს მაღალი გამტარუნარიანობით. აღნიშნული მიზნის მიღწევისათვის გამოიყენება მძგსლ, რომელშიც ურთიერთზემოქმედება ცალკეული ზეგამტარული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილის სადენების ასეთი შესრულებით განისაზღვრება გამტარუნარიანობა.

მსოფლიოში პირველი ერთფაზა ზგტ სიმძლავრით 15 კვა, ძაბვით 22/2,23 იყო დამზადებული და გამოცდილი აშშ-ში 1961 წელს [12]. მისი გრაგნილები იყო დამზადებული ტყვიის სადენისაგან.

1963 წელს საფრანგეთში იყო დამზადებული და გამოცდილი ზგტ სიმძლავრით 2,75 კვა [13]. მისი გრაგნილები იყო დამზადებული $Nb - 15\%Zr$ შენადნობისაგან. გრაგნილებში დენის სიმკვრივე შეადგენდა 2×10^4 ა/სმ² ტრანსფორმატორის მაქსიმალური სიმძლავრის დროს, მ.კ.კ. -99,3%, როცა მეორად გრაგნილში დენი შეადგენდა 15 ა-ს.

1967 წელს საფრანგეთში იყო დამზადებული და გამოცდილი მეორე მოდელი ზგტ-ის სიმძლავრით 6,6 კვა [14]. აღნიშნული მოდელი

წინა მოდელთან განსხვავებით იყო დამზადებული უფრო მტკიცე და საშუალებას იძლეოდა ჩატარებულიყო გამოცდა ხანგრძლივი დროით მოკლე შერთვის, უქმი სვლისა და დატვირთვის რეჟიმებში. შედეგად შესწავლილი იქნა ზგტ-თან დაკავშირებული პრობლემა. ზგტ-ის პირველადი და მეორადი ძაბვები შესაბამისად შეადგენდა 220/440 ვ. ტრანსფორმატორს გააჩნდა ორი იდენტური დაბალი ძაბვის (220 ვ) გრაგნილი, რომლებიც ტრანსფორმატორის გარეთ გამოწყვანებზე ერთმანეთთან შეერთებული იყო მიმდევრობით 440 ვ ძაბვაზე ან პარალელურად 220 ვ ძაბვაზე, რაც საშუალებას იძლეოდა ზგტ-ის გამოცდისა მათი შეერთების სხვადასხვა სქემების დროს. გრაგნილების შესრულებისათვის გამოყენებული იყო ზგს $Nb - 25\%Zr$ დიამეტრით 0,254 მმ. ზგტ-ის მაქსიმალური სიმძლავრე იყო მიღწეული 6,6 კვა, ორი დაბალი ძაბვის გრაგნილებში ერთი და იგივე სიდიდის დენებით 15ა, შეერთებული პარალელურად. ზგტ-ის მაქსიმალური მ.ქ.კ. შეადგენდა 99,53%, მაღალი ძაბვის გრაგნილში 5ა დენის დროს და 99,83%, 15 ა დენის დროს, ხოლო სრული მ.ქ.კ. ანგარიშის მიხედვით, გაცივებაზე დახარჯული სიმძლავრის გათვალისწინებით შეადგინა 96%.

ზგტ-ის დამუშავება ფერომაგნიტური გულარას გარეშე წარმოდგენილია ავსტრიაში [15,16] ჩატარებული სამუშაოებში. ძალოვანი ზგტ ფერომაგნიტური გულარას გარეშე გამორიცხავს დანაკარგებს გულარაში.

ინგლისური ფირმის Ferranti Ltd მიერ იყო დამუშავებული და გამოცდილი ზგტ-ის ნიმუში სიმძლავრით 250 კვა [17].

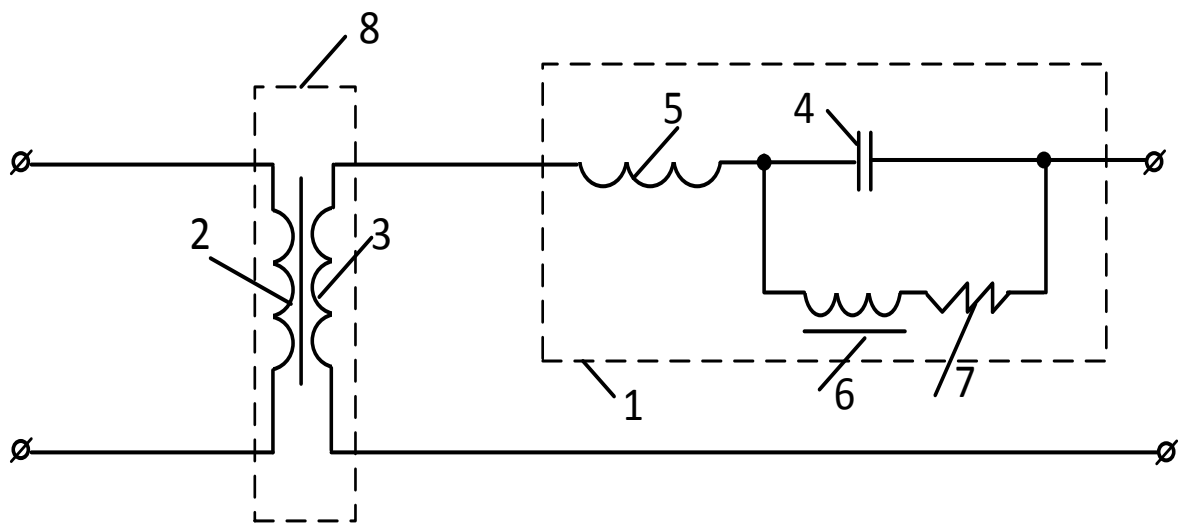
ფირმამ Westinghouse (აშშ) დაამუშავა პროექტი სამფაზა ძალოვანი ზგტ-ის სიმძლავრით 1000 მვა, ძაბვებით 22/500 კვ, მოკლე შერთვის ძაბვით $U_K = 12\%$, ზეგამტარული გრაგნილები შესრულებულია $NbTi$ და Nb_3S_n მასალისაგან. ჩატარებული იქნა შედარება ზეთიან ტრანსფორმატორთან, რომელსაც გააჩნია ანალოგიური პარამეტრები [18]. დაბალი და მაღალი ძაბვის თითოეული ზეგამტარული გრაგნილი შედგება პარალელურად შეერთებული ძირითადი და დამხმარე გრაგნილებისაგან. ძირითადი გრაგნილი ატარებს თითქმის სრულ დატვირთვას დამყარებულ რეჟიმში, ხოლო დამხმარე - ავარიულ რეჟიმში.

დაბალი ძაბვის გრაგნილი -ერთფენიანია სადენის კვეთით $0,43 \times 0,32 \text{ სმ}^2$, ხოლო მაღალი ძაბვის გრაგნილი -ხუთფენიანია სადენის კვეთით $0,15 \times 0,8 \text{ სმ}^2$. კაბელის შევსების კოეფიციენტი $K_{\text{ა}} = 1/3$. კაბელის ძარღვის დიამეტრი ნაკლებია 100 მკმ. გრაგნილები მოთავსებულია ტოროიდულ კრიოსტატში. ზეგამტარული გრაგნილების გაცივებისათვის გამოიყენება თხევადი ჰელიუმი, რომელსაც გააჩნია მაღალი ელექტროსაიზოლაციო სიმტკიცე და დაბალი $t_{\text{გდ}}$.

ზგტ-ის მ.ქ.კ. ნომინალური სიმძლავრის 1000 მვა დროს ტოლია 99,85%. ზგტ-ის შედარებამ ზეთიან ტრანსფორმატორთან აჩვენა, რომ საიმედოობის მიხედვით ზგტ შეიძლება შესრულდეს ტოლფასიანი ზეთიანი ტრანსფორმატორისა; ამ შემთხვევაში ზგტ-ს გააჩნია ნაკლები მასა, ხოლო ზომები მისი თითქმის იგივეა, როგორც ზეთიანი ტრანსფორმატორის (1000 მვა ზგტ-ის მასა, 500 კვ მაღალი ძაბვით, შეადგენს 64%-ს ზეთიანი ტრანსფორმატორის მასის); ზგტ-ის სრული

ღირებულება მოელი მისი ექსპლუატაციის ვადაში დანაკარგების გათვალისწინებით შეადგენს 71%-ს ზეთიანი ტრანსფორმატორის სრული ღირებულების.

ძალოვანი ზგტ-ის შექმნისა და პრაქტიკული გამოყენების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს მისი ზეგამტარული გრაგნილების გადასვლა ნორმალურ გამტარობის ფაზაში, რომელიც წარმოადგენს ზგტ-ის მუშაობის ავარიულ რეჟიმს. აღნიშნული მიმართულებით მიმდინარეობს ინტენსიური მუშაობა ზგტ-ის დამუშავების პარალელურად. ნახ. 4.1 ნაჩვენებია ზგტ-ის დაცვის სქემა დენშემზღუდველი მოწყობილობის საშუალებით [19]. დენშემზღუდველი მოწყობილობა 1 ავარიულ რეჟიმში ზრდის ტრანსფორმატორის 8 გრაგნილების რეაქტიულ წინააღობას და ამცირებს დენს უსაფრთხო დონემდე.



ნახ. 4.1. ზეგამტარული ტრანსფორმატორის გრაგნილების დაცვა დენშემზღუდველი მოწყობილობის საშუალებით

ტეკადობა შერჩეულია რეზონანსში ინდუქტორ 5-თან. მოკლე შერთვის რეჟიმის აღძვრის დროს რეაქტორი 6, რომელიც მიმდევრობით ჩართულია აქტიური წინაღობასთან 7, გაიჟლინთება და ამოკლებს ტეკადობას, იზრდება ტრანსფორმატორის რეაქტიული წინაღობა ინდუქციური წინაღობა 5-ის სიდიდით. ინდუქტორი 5-ის შესრულების შემთხვევაში ზგს-ით და რკინის გულარით, შეიძლება გაერთიანდეს ზგტ-ის მეორად გრაგნილთან და მოთავსდეს ზგტ-თან ერთად ერთ კრიოსტატში.

რუსეთის ფედერაციაში ზგს ამზადებენ სხვადასხვა ზეგამტარული მოწყობილობებისათვის, მათ შორის ზგტ-ისთვის НПО ВНИИКП [20] და ВНИИHM [21]. ამჟამად ВНИИHM აწარმოებს:

- მრავალძარღვიან სადენებს $NbTi$ და Nb_3Sn ბაზაზე.
- წრიული სადენები სპილენძის მატრიცაში (50-ზე მეტი ტიპური ზომებით დიამეტრით 0,1-2,0 მმ დიაპაზონში, ბოჭკოთა რიცხვით 6-დან 130000 მდე, სიგრძით 30 კმ-მდე);
- სადენები მართკუთხა კვეთით (7 დან 28 მმ²-მდე) კრიტიკული დენებით 18000 ა-მდე, მაგნიტურ ველში 5 ტლ.

თანამედროვე სამამულო და უცხოურ ლიტერატურაში გამოქვეყნებულ სამეცნიერო-ტექნიკური მასალების ანალიზის შედეგად ჩანს, რომ ბოლო პერიოდში დტზგ 4,2 კ ტრანსფორმატორების პროექტების დამუშავება მცირდება. ეს დაკავშირებულია მტზგ 77 კ მოვლენის აღმოჩენასთან და მის საფუძველზე სადენების დამზადებასთან. ტრანსფორმატორის დტზგ ძალოვანი გრაგნილების გაცივებისათვის გამოიყენება თხევადი ჰელიუმი 4,2 კ, რაც

დაკავშირებულია მაღალი ენერგოდანახარჯებთან. მტზგ 77 კ ძალოვანი გრაფილების გაცივებისათვის გამოიყენება თხევადი აზოტი 77 კ, რომელსაც გააჩნია გაცივებით დაბალი ენერგოდანახარჯები. აღნიშნულმა გარემოებამ მისცა უდიდესი ბიძგი არა მხოლოდ ძალოვანი ზგტ-ის განვითარებას, არამედ ყველა ზეგამტარულ ელექტრომოწყობილობებს [22]. დიელექტრიკული თვისებები თხევადი აზოტოს უკეთესია, ვიდრე თხევადი ჰელიუმის.

ბოლო დროს მიღწეულია დიდი წარმატება მტზგ სადენების დამუშავებაში და დამზადებაში ძალოვანი ელექტრომოწყობილობებისათვის. ისინი ხასიათდებიან მაღალი კრიტიკული დენებით და დაბალი თვითღირებულებით, რაც აჩქარებს მის პრაქტიკულ გამოყენებას ზგტ-ებში.

ფირმა Alcatel Cables and Components გამოუშვა მაღალტემპერატურული სადენი ვისმუტის საფუძველზე, 1 კმ-ის სიგრძის, რომლის ბაზაზე, შეიძლება დამზადდეს ძალოვანი გრაფილები ტრანსფორმატორისათვის. სადენის დენის კრიტიკული სიმკვრივე აჭარბებს 2×10^4 ა/სმ² თხევადი აზოტის ტემპერატურის 77 კ დროს. აღნიშნული ფირმის საწარმოო სიმძლავრე საშუალებას იძლევა ყოველწლიურად დაამზადოს ასეთი სადენი 150 კმ სიგრძის [23].

რუსეთის ფედერაციაში ამჟამად მაღალტემპერატურული სადენებისა და მის საფუძველზე კაბელების დამზადებაზე მუშაობს ВНИИHM (მოსკოვი. მის ნაწარმს წარმოადგენს [24] მაღალტემპერატურული სადენები იტრიუმის და ვისმუტის კერამიკული შენაერთებით.

პირველად მსოფლიოში მაღალტემპერატურული ზეგამტარული ძალოვანი ტრანსფორმატორის პროექტი სიმძლავრით 100 მვა, დაბვებით 66/22 კვ იყო განხორციელებული 1988 წელს, მაღალტემპერატურული ზეგამტარობის მოვლენის აღმოჩენიდან 2 წლის შემდეგ [25]. აღნიშნული მიმართულებით ინტენსიურად მიმდინარეობს მუშაობა.

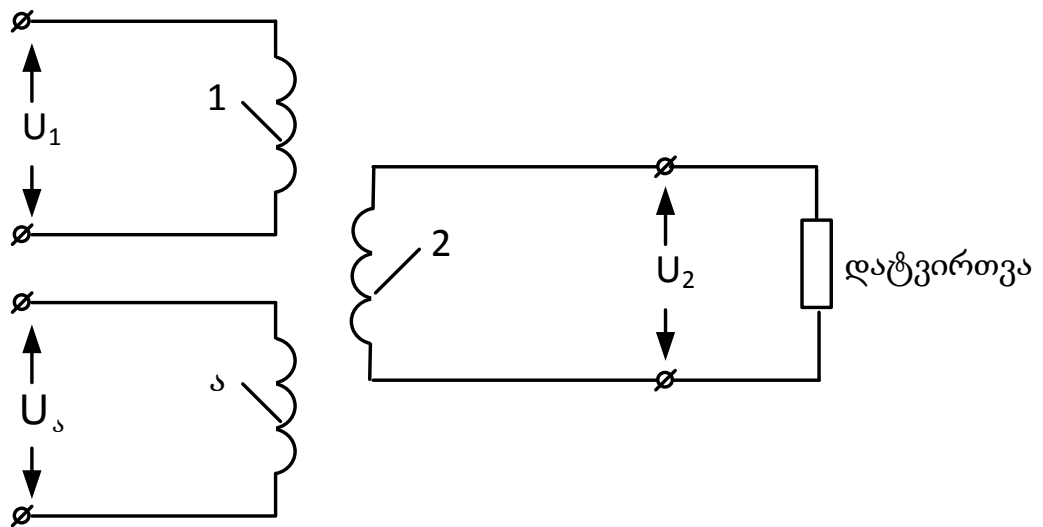
ზგტ-ი ლოკალიზებული განბნევის მაგნიტური ველით სრულდება ფერომაგნიტური მაგნიტოგამტარით და მის გარეშეც. ზგტ-ებში ფერომაგნიტური მაგნიტოგამტარით განბნევის მაგნიტური ველის ლოკალიზირება მიიღწევა:

- მძზგ-დან დამზადებული სექციონირებული პირველადი და მეორადი გრაგნილების გამოყენებით. პირველადი გრაგნილი დატვირთულია არა მხოლოდ მუშა დენით, არამედ დამაგნიტების დენითაც, რომელიც ქმნის არაკომპენსირებულ განბნევის მაგნიტურ ველს და აუარესებს ძალოვანი გრაგნილების მუშაობის პირობებს;
- გრაგნილებისათვის მძზგს-ის გამოყენება, აღნიშნულ შემთხვევაში გრაგნილები სრულდება ხვიების მჭიდრო დახვევით. გრაგნილის შევსების კოეფიციენტი თითქმის 1-ის ტოლია.

ზგტ-ში ფერომაგნიტურ მაგნიტოგამტარის გარეშე, განბნევის მაგნიტური ველის ლოკალიზირების მიღწევა შეუძლებელია, როცა ტრანსფორმატორის პირველადი ძალოვანი გრაგნილი გამოყენებულია აგზნების მაგნიტური ველის შექმნისათვის. ამ შემთხვევაში დამაგნიტების დენი აჭარბებს მუშა დენს, ზგტ-ში წარმოიქმნება

ძლიერი, არაკომპენსირებული დაუშვებელი სიდიდის მაგნიტური ველი. ამასთან დაკავშირებით აღიძვრება აუცილებლობა აგზნების მაგნიტური ველის შექმნისათვის, ცალკე გრაგნილის გამოყენებისა ზგტ-ში [26]. ცალკე აგზნების გრაგნილი სრულდება აგრეთვე მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენისაგან და მისი ოპტიმიზაციის ძირითადი ამოცანა მდგომარეობს, შექმნას აგზნების მაგნიტური ველი ზგტ-ის საჰაერო მაგნიტოგამტარში, გრაგნილებში მინიმალური დანაკარგების და ზეგამტარული მასალების მინიმალური დანახარჯის პირობებში.

ნახ.4.2. ნაჩვენებია ზგტ ცალკე აგზნების გრაგნილით, რომლის პირველადი მხარეს ერთი გრაგნილის ნაცვლად შესრულებულია ორი გრაგნილი „1“ და „ა“, ხოლო მეორე მხარეს შესრულებულია ერთი გრაგნილი „2“. გრაგნილები „1“ და „ა“ იკვებებიან ძაბვებიდან U_1 და U_a , ხოლო „2“ გრაგნილი შეერთებულია დატვირთვის წრედთან U_2 ძაბვით. ასეთი სამგრაგნილა ტრანსფორმატორს ძაბვებით U_1, U_2, U_a შეუძლია იმუშაოს სხვადასხვა ენერგეტიკულ რეჟიმებში.



ნახ. 4.2. ზეგამტარული ტრანსფორმატორი ცალკე აგზნების გრაგნილით
 თუ, მაგალითად, „1“ და „2“ გრაგნილებს გააჩნია ერთმანეთის
 მიმართ ძლიერი მაგნიტური კავშირი და სუსტი მაგნიტური კავშირი „ა“
 გრაგნილთან, მაშინ დენის ნებისმიერი ცვლილება „2“ გრაგნილში
 გამოიწვევს შესაბამის დენის ცვლილებას ძირითადად „1“ გრაგნილში
 და არა „ა“ გრაგნილში. ამ პირობებში, ელექტრული ენერგია „2“
 გრაგნილს და დატვირთვის წრედს მიეწოდება, ძირითადად „1“
 გრაგნილიდან. მეორად წრედში დატვირთვის ცვლილება გავლენას არ
 მოახდენს „ა“ გრაგნილზე. „ა“ გრაგნილში გაივლის დენი დაახლოებით
 ისეთი სიდიდის, როგორც იყო დატვირთვის ცვლილებამდე და „ა“
 გრაგნილი მოითხოვს რეაქტიულ სიმძლავრეს. „ა“ გრაგნილის მიერ
 მოთხოვნილი რეაქტიული დენი და რეაქტიული სიმძლავრე იქნება
 დამოკიდებული მასზე მოდებული ძაბვის სიდიდეზე U_3 . ასეთ
 პირობებში, „ა“ გრაგნილი ასრულებს აგზნების როლს, ხოლო „1“ და
 „2“-ძალოვანი გრაგნილების როლს. ძალოვანი გრაგნილებიდან
 უშუალოდ აგზნების დენის გამორიცხვა იძლევა საშუალებას

ერთმანეთისგან პირველადი და მეორადი გრაგნილების სრული კომპენსაციისა და აღნიშნული გრაგნილების გარშემო ყველა მაგნიტური ნაკადების შემცირებისა, რაც თავის მხრივ იწვევს ზგტ.-ში დანაკარგების შემცირებას, დენგამტარუნარიანობის და სიმძლავრის გაზრდას.

4.4. ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი [28]

ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორის [27] მათემატიკური მოდელის დამუშავებისათვის და ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზის ჩატარებისათვის სტაციონარულ და გარდამავალ რეჟიმებში, აუცილებელია ზეგამტარული ტრანსფორმატორის (ზგტ) პარამეტრების განსაზღვრა - მისი აქტიური წინაღობების და ინდუქციურობების.

ზგტ-ის აქტიური წინაღობები დაკავშირებულია თბური დანაკარგების გამოყოფასთან ზეგამტარულ გრაგნილებში, როცა მათში გადის ცველადი დენი, აგრეთვე მაგნიტოგამტარში (ფერომაგნიტური გულარას არსებობის დროს), ცველადი მაგნიტური ველის აგზნების დროს. ზგტ-ის ინდუქციურობა და ინდუქციური წინაღობა დაკავშირებულია განბნევის არხში განბნევის მაგნიტური ველების წარმოქმნასთან, შექმნილი დატვირთვის დენებით და მაგნიტოგამტარში აგზნების ველებით, წარმოქმნილი დამაგნიტების დენებით.

თითოეული ზეგამტარული გრაგნილის აქტიური წინაღობა შედგება სამი მდგენელისაგან:

ΔR – აქტიური წინაღობა, დაკავშირებული ზეგამტარულ სადენში ელექტრულ დანაკარგებთან;

$\Delta R_{\text{ჰის.}}$ - ეკვივალენტური წინაღობა, დაკავშირებული ზეგამტარულ სადენში ჰისტერიზისულ დანაკარგებთან;

$\Delta R_{\text{გრიგ.}}$ - წინაღობა, დაკავშირებული ზეგამტარულ სადენში და ფუძე-ძრეში გრიგალურ დანაკარგებთან.

ამგვარად სრული აქტიური წინაღობებისთვის მუშა გრაგნილების და აგზნების გრაგნილისთვის შესაბამისად გვექნება;

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \Delta R_1 + \Delta R_{1\text{ჰის.}} + \Delta R_{1\text{გრიგ.}} \\ r_2 &= \Delta R_2 + \Delta R_{2\text{ჰის.}} + \Delta R_{2\text{გრიგ.}} \\ r_{\text{ს}} &= \Delta R_{\text{ს}} + \Delta R_{\text{ს.ჰის.}} + \Delta R_{\text{ს.გრიგ.}} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

სადაც: $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_{\text{ს}}$ - ელექტრული დანაკარგები შესაბამისად პირველადი, მეორადი და აგზნების გრაგნილის;

$\Delta R_{1\text{ჰის.}}, \Delta R_{2\text{ჰის.}}, \Delta R_{\text{ს.ჰის.}}$ - ეკვივალენტური აქტიური წინაღობები, ითვალისწინებს ჰისტერიზისულ დანაკარგებს შესაბამისად პირველად, მეორად და აგზნების გრაგნილში;

$\Delta R_{1\text{გრიგ.}}, \Delta R_{2\text{გრიგ.}}, \Delta R_{\text{ს.გრიგ.}}$ - წინაღობები, ითვალისწინებს გრიგალურ დანაკარგებს შესაბამისად პირველად, მეორად და აგზნების გრაგნილში.

ზგტ-ის განხილვის დროს, ცალკეული აგზნების გრაგნილით, როგორც სამგრაგნილა ტრანსფორმატორი, აუცილებელია ცხრა ინდუქციურობის განსაზღვრა. თუმცა, გამარტივებული მიდგომის დროს, შეიძლება შემოვიფარგლოთ ინდუქციურობების ნაკლები რაოდენობით,

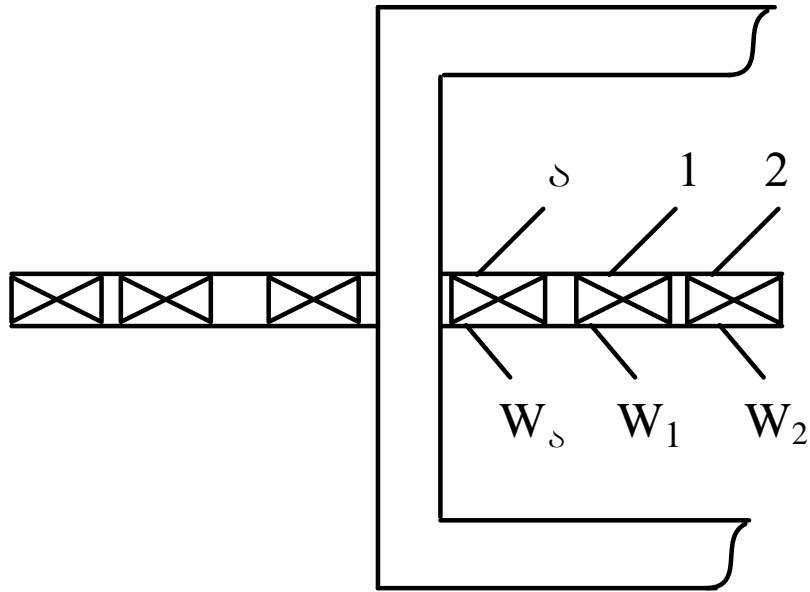
სახელდობრ: $L_{1გან.}, L_{2გან.}$ -პირველადი და მეორადი გრაგნილების განხვევის ინდუქციურობები;

$L_{ა.გან.}$ -აგზნების გრაგნილის განხვევის ინდუქციურობა;

M -პირველად (მეორად) გრაგნილებს და აგზნების გრაგნილს შორის ურთიერთინდუქციურობა.

ზეგამტარულ ტრანსფორმატორში, განსხვავებით ჩვეულებრივ ტრანსფორმატორისაგან, აუცილებელია დამატებით გავითვალისწინოთ გრაგნილის კინეტიკური ინდუქციურობა, დაკავშირებული გრაგნილებში ზეგამტარული ელექტრონების თავისუფლად მოძრავი კინეტიკური ენერგიასთან. კინეტიკური ინდუქციურობის L_k სიდიდისგან არის დამოკიდებული ელექტრული წინააღობების სიდიდეები $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ და შესაბამისად ზეგამტარული გრაგნილების დენგამტარუნარიანობა. $L_{1გან.}, L_{2გან.}, L_{ა.გან.}, M, M_3$ ინდუქციურობების სიდიდეზე კინეტიკური ინდუქციურობა L_k პრაქტიკულად გავლენას ვერ ახდენს შედარებით უმნიშვნელო სიდიდის გამო.

ნახ. 4.3 ნაჩვენებია ცალკეული აგზნების გრაგნილით ზგტ-ის გრაგნილების განლაგება. ასეთი დაყოფა გრაგნილების ფუნქციის შეიძლება დაუშვათ, გრაგნილების გარკვეული განლაგებით ერთმანეთის მიმართ. მაგალითისთვის ნაჩვენებია გრაგნილების განლაგება ღეროიანი ტიპის ზგტ-ში.



ნახ. 4.3. ცალკეული აგზნების გრაგნილით ზგტ-ის
გრაგნილების განლაგება

აგზნების გრაგნილი - ა ხვიათა რიცხვით W_{α} იმყოფება გულარასთან ახლოს, ხოლო პირველადი - 1 და მეორადი - 2 გრაგნილები ხვიათა რიცხვებით W_1 და W_2 იმყოფებიან გარკვეული დაშორებით აგზნების გრაგნილისაგან და განლაგებულია ახლოს ერთმანეთის მიმართ.

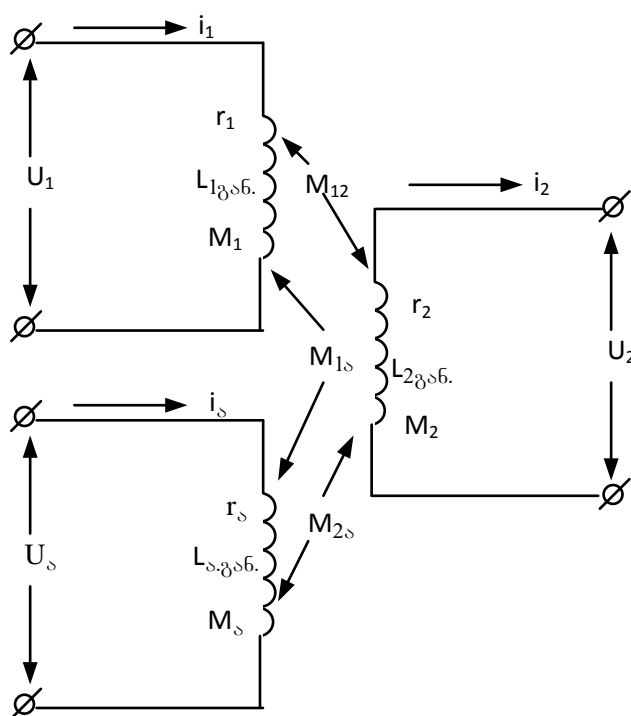
ჩვეულებრივ ორგრაგნილა ტრანსფორმატორში პირველადი გრაგნილი ითავსებს ძალოვანი გრაგნილის და აგზნების გრაგნილის დანიშნულებას. ამასთან დაკავშირებით, დატვირთვის რეჟიმში პირველადი გრაგნილის დენი შედგება ორი მდგენელისაგან: აგზნების დენი, რომელიც წარმოქმნის ძირითად მაგნიტურ ნაკადს ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარში, და დატვირთვის დენი, რომელიც აკომპენსირებს მეორად გრაგნილში დენს.

ზგტ-ში პირველადი მხარეს, როგორც იყო აღნიშნული, შესრულებულია ორი გრაგნილი, ამ შემთხვევაში 1 - გრაგნილში უნდა გაიაროს მხოლოდ დატვირთვის დენმა, ხოლო აგზნების გრაგნილში- მხოლოდ აგზნების დენმა.

ვითვალისწინებთ, რომ ზგტ-ის სამივე გრაგნილი ერთმანეთთან მაგნიტურად დაკავშირებულია, დენები და სიმძლავრეები დამოკიდებულია გრაგნილების პარამეტრებზე.

ზგტ-ის თანაფარდობების მიღებისათვის, აუცილებელია გამოვიდეთ სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის ზოგადი განტოლებებიდან [29].

გარკვეული დაშვებებით, საანგარიშო სქემა სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის მიიღებს სახეს, ნახ. 4.4.



ნახ. 4.4. ცალკეული აგზნების გრაგნილით ზგტ-ის საანგარიშო სქემა.

მიღებულია შემდეგი დაშვებები:

- წრედი შეიცავს მხოლოდ აქტიურ და ინდუქციურ წინაღობებს, ტევადური დენები გამორიცხულია;

- გრაგნილების ყველა პარამეტრები მუდმივია, და წრედი ხაზოვანია;

- ზოგადი ამონახსნის მიღებისათვის, გრაგნილებს გააჩნია აქტიური წინაღობა: r_1, r_2, r_s .

ზგტ-ის გრაგნილებისათვის ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს ექნება შემდეგი სახე.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_1 i_1 + (L_{1გან.} + M_1) \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{1s} \frac{di_s}{dt} \\ -U_2 &= r_2 i_2 + (L_{2გან.} + M_2) \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{2s} \frac{di_s}{dt} \\ U_s &= r_s i_s + (L_{sგან.} + M_s) \frac{di_s}{dt} + M_{1s} \frac{di_1}{dt} + M_{2s} \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

(4.5) განტოლებათა სისტემაში r_1, r_2, r_s - გრაგნილების აქტიური წინაღობები; $L_{1გან.}, L_{2გან.}, L_{sგან.}$ - გრაგნილების განბნევის ინდუქციურობები;

$M_1, M_2, M_s, M_{1s}, M_{2s}$ - ურთიერთინდუქციურობების კოეფიციენტი.

ინდუქციურობების კოეფიციენტებისათვის გვექნება:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= W_1^2 \Lambda_1 = M; & M_{2s} &= M_{s2} = W_2 W_s \Lambda_{2s}; \\ M_2 &= W_2^2 \Lambda_2; & L_{1გან.} &= W_1^2 \Lambda_{1გან.}; \\ M_s &= W_s^2 \Lambda_s; & L_{2გან.} &= W_2^2 \Lambda_{2გან.}; \\ M_{12} &= M_{21} = W_1 W_2 \Lambda_{12}; & L_{sგან.} &= W_s^2 \Lambda_{sგან.}; \\ M_{1s} &= M_{s1} = W_1 W_s \Lambda_{1s}; & & \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

(4.6) განტოლებათა სისტემაში $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_s, \Lambda_{12}, \Lambda_{1s}, \Lambda_{2s}, \Lambda_{1\text{გან}}, \Lambda_{2\text{გან}}, \Lambda_{s\text{გან}}$ -შესაბამისი გრაგნილების მაგნიტური გამტარობები, ზოგად შემთხვევაში განსხვავდება ერთმანეთისაგან; W_1, W_2, W_s -პირველადი, მეორადი და აგზნების გრაგნილების ხვიათა რიცხვი.

ანგარიშის გამარტივებისათვის, იმ შემთხვევაში, როცა 1 და 2 გრაგნილები განლაგებულია ერთმანეთისაგან ახლოს (ნახ.4.3), შეიძლება დაუშვათ:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_{12} = \Lambda; \\ \Lambda_{1s} = \Lambda_{2s} = \Lambda_s \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

(4.7) თანაფარდობის გათვალისწინებით, (4.6) განტოლებებიდან მივიღებთ:

$$\left. \begin{aligned} M_{12} = M_{21} = W_1 W_2 \Lambda; \\ M_{1s} = M_{s1} = W_1 W_s \Lambda_s; \\ M_{2s} = M_{s2} = W_2 W_s \Lambda_s; \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

(4.6-4.8) თანაფარდობების გათვალისწინებით (4.5) განტოლებათა სისტემა მიიღებს შემდეგი სახეს:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_1 i_1 + W_1^2 \Lambda_{1\text{გან}} \frac{di_1}{dt} + W_1^2 \Lambda \frac{di_1}{dt} + W_1 W_2 \Lambda \frac{di_2}{dt} + W_1 W_s \Lambda_s \frac{di_s}{dt} \\ -U_2 &= r_2 i_2 + W_2^2 \Lambda_{2\text{გან}} \frac{di_2}{dt} + W_2^2 \Lambda \frac{di_2}{dt} + W_2 W_1 \Lambda \frac{di_1}{dt} + W_2 W_s \Lambda_s \frac{di_s}{dt} \\ U_s &= r_s i_s + W_s^2 \Lambda_{s\text{გან}} \frac{di_s}{dt} + W_s^2 \Lambda_s \frac{di_s}{dt} + W_s W_1 \Lambda_s \frac{di_1}{dt} + W_s W_2 \Lambda_s \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

შემოვიყვანოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$K_{1s} = \frac{W_1}{W_s}$ - ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი პირველად გრაგნილსა და აგზნების გრაგნილს შორის;

$K_{12} = \frac{W_1}{W_2}$ - ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი პირველად და მეორად გრაგნილებს შორის;

$$i_2' = -\frac{1}{K_{12}} i_2, \quad i_s' = \frac{1}{K_{1s}} i_s \quad (4.10)$$

i_s' - აგზნების დენი დაყვანილი პირველად გრაგნილთან;

i_2' - მეორადი დენი დაყვანილი პირველად გრაგნილთან.

თუ დაგიყვანთ მეორად გრაგნილის და აგზნების გრაგნილის ყველა სიდიდეებს პირველად გრაგნილთან, გავითვალისწინებთ (4.9) და (4.10) განტოლებებს, გარდაქმნის შემდეგ, მივიღებთ ტრანსფორმატორის შემდეგი დაყვანილი განტოლებათა სისტემას

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_1 i_1 + L_{1გაბ.} \frac{di_1}{dt} + M \frac{d(i_1 - i_2')}{dt} + \alpha M \frac{di_s'}{dt} \\ U_2' &= -r_2' i_2' - L_{2გაბ.} \frac{di_2'}{dt} + M \frac{d(i_1 - i_2')}{dt} + \alpha M \frac{di_s'}{dt} \\ U_s' &= r_s' i_s' + L_{s,გაბ.} \frac{di_s'}{dt} + \alpha M \frac{d(i_1 - i_2' + i_s')}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

(4.11) განტოლებათა სისტემაში გვაქვს შემდეგი აღნიშვნები:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\Lambda_s}{\Lambda}; & L'_{s,გაბ.} &= K_{1s}^2 L_{s,გაბ.}; \\ U_2' &= -K_{12} U_2; & r_2' &= K_{12}^2 r_2 \\ U_s' &= K_{1s} U_s; & r_s' &= K_{1s}^2 r_s \\ L'_{2გაბ.} &= K_{12}^2 L_{2გაბ.} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

(4.11) განტოლებათა სისტემა აღწერს გარდამავალ პროცესებს ზგტ-ში. მივიღოთ აღნიშვნა $P = \frac{d}{dt}$, რამოდენიმე გარდაქმნის შემდეგ (4.11) განტოლებათა სისტემიდან მივიღებთ:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_1 i_1 + PL_{1გაბ.} i_1 + PM(i_1 - i_2') + P\alpha M(i_1 - i_2' + i_s') \\ -U_2' &= -r_2' i_2' - PL'_{2გაბ.} i_2' + P(1 - \alpha)M(i_1 - i_2') + P\alpha M(i_1 - i_2' + i_s') \\ U_s' &= r_s' i_s' + PL'_{s,გაბ.} i_s' + \alpha PM(i_1 - i_2' + i_s') \end{aligned} \right\} \quad (4.13')$$

(4.13') განტოლებათა სისტემიდან იოლად მივიღებთ, ზგტ-ის სტაციონარული პროცესების განტოლებებს, თუ P -ს შევცვლით $j\omega$ -თი, სადაც ω - კუთხური სიხშირე, პირველადი გრაგნილზე მოდებული ძაბვის. თუ ავღნიშნავთ $\omega M = x_M$, მაშინ სტაციონარული რეჟიმებისათვის განტოლებათა სისტემას კომპლექსურ ფორმაში აქვს შემდეგი სახე:

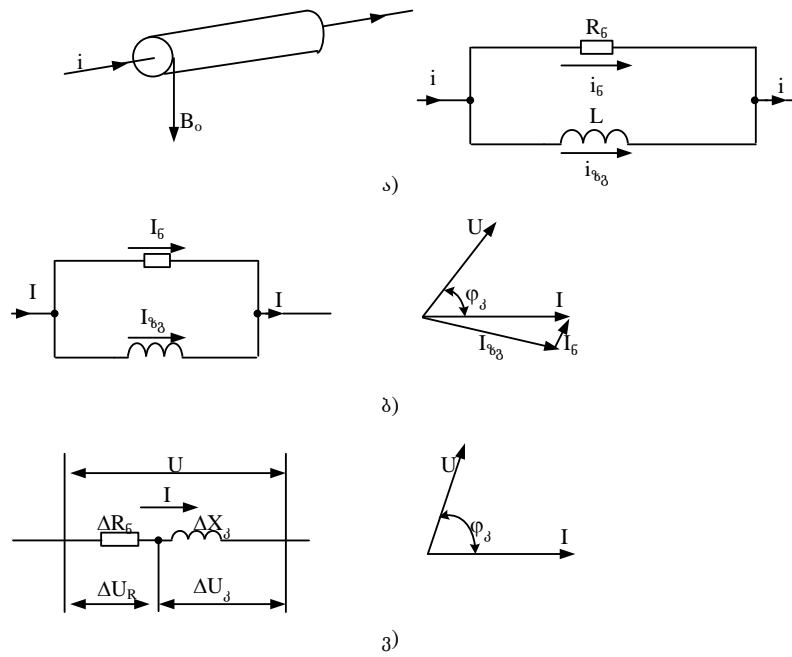
$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= r_1 \underline{I}_1 + jX_{1\text{გან}} \underline{I}_1 + j(1-\alpha)X_M(\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) + j\alpha X_M(\underline{I}_1 - \underline{I}'_2 + \underline{I}'_s), \\ -\underline{U}'_2 &= r'_2 \underline{I}'_2 + jX_{2\text{გან}} \underline{I}'_2 - j(1-\alpha)X_M(\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) - j\alpha X_M(\underline{I}_1 - \underline{I}'_2 + \underline{I}'_s), \\ \underline{U}'_s &= r'_s \underline{I}'_s + jX_{\text{გან}} \underline{I}'_s + j\alpha X_M(\underline{I}_1 - \underline{I}'_2 + \underline{I}'_s) \end{aligned} \right\} (4.13)$$

ზეგამტარულ ტრანსფორმატორებში სტაციონარული და გარდამავალი პროცესების ანგარიშისათვის დამუშავებული საინჟინრო მეთოდი, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ელექტრომაგნიტური პროცესების შესწავლისათვის ზეგამტარული ელექტრულ მანქანებში, მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტროგადამცემ ხაზებში, ზეგამტარულ ინდუქციურ მაგროვებლებში და ა.შ. რომლის ბაზაზე, შეიძლება შეიქმნას ზეგამტარული ელექტრული და ელექტრომაგნიტური სისტემები.

4.5. ზეგამტარული ტრანსფორმატორების გრაგნილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში [30]

ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორების დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული (ზგ) სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით (მძზგსდ), რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილების ასეთი შესრულებით დენგამტარუნარიანობა თითოეული ზგ ძარღვის განისაზღვრება საკუთარი მაგნიტური ველით და საკუთარი პარამეტრებით. თუ ერთძარღვიანი ზგ სადენში (ნახ. 4.5, ა) გადის ცვლადი სინუსოიდური დენი

$$i = I_a \sin \omega t = {}^* I_a I_\beta \sin \omega t, \quad {}^* I_a = \frac{I_a}{I_\beta} \quad (4.14)$$



ნახ.4.5 სქემები და ვექტორული დიაგრამები

სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციისათვის გვექნება:

$$B_o = \mu_o \frac{i}{2\pi r_o} = {}^*i B_j; \quad B_o = \frac{B_o}{B_j} = {}^*i; \quad B_{o\theta} = {}^*i_j; \quad B_j = \mu_o \frac{I_j}{2\pi r_o}; \quad (4.15)$$

სადაც I_j -დენის კრიტიკული მნიშვნელობა,

$${}^*I_j = \frac{I_j}{I_j} - \text{მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.}$$

ზეგამტარულ სადენში დენი შედგება ორი მდგენელისაგან (ნახ.4.5ა)

$$i = i_6 + i_{60} \quad (4.16)$$

სადაც i_6 -დენის აქტიური მდგენელია, ან დენი გამოწვეული ნორმალური ელექტრონებისაგან,

i_{60} - დენის ზეგამტარული მდგენელი.

სრული დენის აქტიური მდგენელი იზღუდება წინააღობით, რომლისთვისაც

$$R_6 = \rho_6 \frac{\ell}{S_\lambda} = \frac{\rho_{6o}}{n_6^* S_o S_\lambda^*} \ell = \frac{1}{n_6^* S_\lambda^*} R_{6o}, \quad (4.17)$$

$$\text{სადაც } R_{6o} = \rho_{6o} \frac{\ell}{S_o},$$

ℓ -სადენის სიგრძეა,

$$\rho_6 = \frac{\rho_{6o}}{n_6^*} - \text{სადენის ხვედრითი წინააღობაა,}$$

$s_{\lambda}^* = \frac{S_{\lambda}}{S_o}$ - ზგ სადენის დენით დაკავებული ფარდობითი ფართია მთლიანი ფართის $S_o = \pi r_o^2$ ნაწილიდან,

ρ_{60} -ხვედრითი წინაღობაა, როცა $n_6^* = 1$,

$n_6^* = \frac{n_6}{n_o}$ - ნორმალური ელექტრონების სიმკვრივის ფარდობითი მნიშვნელობაა,

n_6 - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი,

n_o - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი.

R_{60} -ნორმალურ მდგომარეობაში ზგ სადენის წინაღობა, როცა $n_6^* = 1$

სრული დენის ზეგამტარული მდგენელი იზღუდება კინეტიკური ინდუქციურობით

$$L_{\lambda} = \ell_{\lambda} \frac{\ell}{S_{\lambda}} = \frac{\ell_{\lambda}}{n_{\lambda}^*} \frac{\ell}{S_{\lambda} S_o} = \frac{1}{n_{\lambda}^* S_{\lambda}^*} L_{\lambda o} \quad (4.18)$$

სადაც $n_{\lambda}^* = \frac{n_{\lambda}}{n_o}$ - ზეგამტარული ელექტრონების სიმკვრივის ფარდობითი მნიშვნელობაა

$L_{\lambda o} = \ell_{\lambda o} \frac{\ell}{S_o}$; $\ell_{\lambda} = \frac{\ell_{\lambda o}}{n_{\lambda}^*}$ -ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა, n_{λ}^* -

ერთეულ მოცულობაში ზეგამტარული ელექტრონების რიცხვი.

$\ell_{\lambda o}$ -ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა, როცა $n_{\lambda}^* = 1$;

$\ell_{\lambda o} = \frac{m}{n_o e^2}$, სადაც m -ელექტრონების მასა; e - ელექტრონების მუხტის მნიშვნელობა.

n_{λ}^* და n_6^* ელექტრონების სიმკვრივის ცვლილების განსაზღვრისათვის, მაქსიმალური დენისაგან დამოკიდებულებაში გვექნება

$$n_{\lambda}^* = 1 - \frac{\gamma_o}{B_{\lambda}} \frac{1 - \gamma_o}{I_{\lambda}} ; \quad n_6^* = \frac{\gamma_o}{B_{o6}} = \frac{\gamma_o}{I_{o6}}$$

სადაც γ_o -უგანზომილებო კოეფიციენტი, რომელიც მიიღება ექსპერიმენტალური გზით [1].

დენით დაკავებული ფართი, იცვლება დენის შეღწევის სიღრმისაგან დამოკიდებულებაში:

$$s = \frac{S_{\lambda}}{S_o} = \frac{2\pi \left(r_o - \frac{\lambda}{2}\right) \lambda}{\pi r_o^2}, \quad (4.19)$$

სადაც λ -დენის შეღწევალობის სიღრმე,

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{n_{\text{ზბ}}^*}} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1-I_{\text{ა}}^{*\gamma_0}}} \quad (4.20)$$

λ_o - დენის შეღწევადობის სიღრმე (ლონდონისებური).

ზგ სადენის მაქსიმალური დენგამტარიანობა განისაზღვრება დენის შევსებით, რომლის დროსაც დენის ზეგამტარული მდგენელი მიაღწევს მაქსიმუმს. $\lambda = r_o$ პირობის დროს დენის შევსებისათვის მივიღებთ:

$$J_{\text{ა}}^{\text{შევს.}} = r_o \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{r_o}\right)^2} \quad (4.21)$$

დენების მომქმედი მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის, გვექნება (ნახ. 4.5, ბ).

$$I^* = I_{\text{გ}}^* + I_{\text{ზბ}}^*, \quad (4.22)$$

სადაც $I_{\text{გ}}^* = \frac{\dot{U}}{R_{\text{გ}}}$; $I_{\text{ზბ}}^* = \frac{\dot{U}}{jX_{\text{ჯ}}}$; $X_{\text{ჯ}} = \omega L_{\text{ჯ}}$

დენი იწვევს სადენში ძაბვის ვარდნას (ნახ. 4.5, ე):

$$\dot{U}^* = \Delta Z I^* = (\Delta R_{\text{გ}} + j\Delta X_{\text{ჯ}}) I^*, \quad (4.23)$$

სადაც $\Delta Z = \frac{jX_{\text{ჯ}}R_{\text{გ}}}{R_{\text{გ}} + jX_{\text{ჯ}}} = \Delta R_{\text{გ}} + j\Delta X_{\text{ჯ}} = |\Delta Z| e^{j\varphi_{\text{ჯ}}}$,

$$\Delta R_{\text{გ}} = \frac{R_{\text{გ}}X_{\text{ჯ}}^2}{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{ჯ}}^2},$$

$$\Delta X_{\text{ჯ}} = \frac{X_{\text{ჯ}}R_{\text{გ}}^2}{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{ჯ}}^2},$$

$$\varphi_{\text{ჯ}} = \arctg \frac{\Delta X_{\text{ჯ}}}{\Delta R_{\text{გ}}},$$

$$|\Delta Z| = \frac{R_{\text{გ}}X_{\text{ჯ}}}{\sqrt{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{ჯ}}^2}}.$$

სრული დენის მდგენელებისათვის გვექნება:

$$I_{\text{გ}} = \frac{\Delta Z}{R_{\text{გ}}} I = \frac{X_{\text{ჯ}}}{\sqrt{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{ჯ}}^2}} I, \quad (4.24)$$

$$I_{\text{ზბ}} = \frac{\Delta Z}{X_{\text{ჯ}}} I = \frac{R_{\text{გ}}}{\sqrt{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{ჯ}}^2}} I, \quad (4.25)$$

ფარდობითი ფართი სადენის დენით შევსებამდე ტოლია:

$$s^* = \frac{\lambda}{r_o} \left(2 - \frac{\lambda}{r_o}\right) = \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1-I_{\text{ა}}^{*\gamma_0}}} \left(2 - \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1-I_{\text{ა}}^{*\gamma_0}}}\right) \quad (4.26)$$

$0 < I_{\text{ა}}^* < I_{\text{ა}}^{\text{შევს.}}$, სადენის დენით შევსების შემდეგ $s^* = 1$

ΔR წინააღმდეგობაში აქტიური დანაკარგების განსაზღვრისათვის გვექნება

$$\Delta P = I_6^2 R_6 = I^2 \Delta P = \frac{R_6 X_d^2}{R_6^2 + X_d^2} I^2 \quad (4.27)$$

სადენის კვეთის დენით შევსებით, კინეტიკური ინდუქციური წინააღმდეგობა უსასრულოდამდე, დენი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას:

$$I = I_3 = I_6; I_{\text{ზ}} = 0; \Delta P = R_6 I^2 \quad (4.28)$$

სადენი სრულად გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში.

ტრანსფორმატორის ზეგამტარულ გრაგნილებში დანაკარგების განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ დანაკარგების ცალკეული სახეების სიდიდე სადენის ზგ ძარღვებში, გამოწვეული ძარღვების საკუთარი დენებით, სახელდობრ: ელექტრული დანაკარგები ძარღვის დენისაგან გამოწვეული; გრიგალური და ჰისტერეზისული დანაკარგები მაგნიტური ველის მიერ გამოწვეული, შექმნილი ძარღვების დენების მიერ; ელექტრული დანაკარგები ზგ სადენის მატრიცაში, მატრიცის დენისგან გამოწვეული; გრიგალური დანაკარგები მატრიცაში ძარღვების მაგნიტური ველისგან გამოწვეული.

დაუშვათ, რომ ზგ ძარღვში გადის სინუსოიდური დენი

$$i = I_3 \sin \omega t,$$

სადაც I_3 -მაქსიმალური დენის მნიშვნელობაა ზგ ძარღვებში,

ω – კუთხური სიხშირე, $\omega = 314$ რ/წმ.

i დენი შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$i = I_3 I_3^* \sin \omega t,$$

სადაც - i დენის მყისა მნიშვნელობა, ზგ ძარღვებში;

$$I_3^* = \frac{I_3}{I_3}; 0 < I_3^* < 1,$$

სადაც I_3^* - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.

როცა $I_3^* = 1$ ძარღვი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში, იკარგება ზეგამტარობა. ძარღვების დენი მის ზედაპირზე ქმნის ველს

$$B_{\text{ო.დ.}} = \mu_0 \frac{i}{\pi d_j},$$

სადაც d_d – ზგ ძარღვის დიამეტრი, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ჰ/მ}$

B_{od} მაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელობას, I_d კრიტიკული დენის საშუალებით ექნება შემდეგი სახე:

$$B_{od} = \mu_0 \frac{I_d I_d^*}{\pi d_d} \sin \omega t$$

მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

$$B_d = \mu_0 \frac{I_d}{\pi d_d},$$

შესაბამისად $B_{od} = B_d^* I_d \sin \omega t$

მაქსიმალური მაგნიტური ინდუქციის ფარდობითი მნიშვნელობა:

$$B_{om}^* = \frac{B_{odm}}{B_d} = I_d^*$$

თუ სადენი შეიცავს N ზგ ძარღვს, მაშინ მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე

$$B_s = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi D_s},$$

სადაც D_s - სადენის დიამეტრი.

თუ სადენი შესრულებულია მჭიდროდ შევსებული ზგ ძარღვებით, მაშინ

$$D_s \cong \sqrt{N} d_d$$

ამ შემთხვევაში სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_s = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi \sqrt{N} d_d} = B_{od} \sqrt{N},$$

ე.ი. B_s აჭარბებს B_{od} სიდიდეს \sqrt{N} -ჯერ, და როცა $B_s = B_d$ დენგამტარუნარიანობა სადენის მცირდება \sqrt{N} -ჯერ, შედარებით ერთი ძარღვის დენგამტარუნარიანობასთან.

სადენის B_s ინდუქციის შენარჩუნებისათვის ერთი ძარღვის B_{od} დონეზე აუცილებელია:

- გაიზარდოს სადენის დიამეტრი \sqrt{N} -ჯერ, ზგ ძარღვების რიცხვის შენარჩუნებით და მათი თანაბარი განლაგებით სადენის კვეთის მიხედვით; მაშინ სადენის დენგამტარუნარიანობა იქნება გაზრდილი \sqrt{N} -ჯერ.
- შემცირდეს \sqrt{N} -ჯერ ზგ ძარღვის რიცხვი სადენში, მისი დიამეტრის შენარჩუნების დროს; დენგამტარუნარიანობა ამ

შემთხვევაში არ იქნება შეცვლილი, მაგრამ ზგ ძარღვის მოცულობა სადენში შემცირდება \sqrt{N} -ჯერ.

ორივე შემთხვევაში, ყველა ზგ ძარღვები სადენში იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში.

ამასთან დაკავშირებით, დანაკარგების განსაზღვრის დროს, ვგულისხმობთ, რომ ზგ სადენი თავისუფალია გარე მაგნიტური ველებისაგან.

ელექტრული დანაკარგები ზეგამტარის ΔR წინააღობაში

$$\Delta P_{\text{ელ.ზგ.}} = I^2 \Delta R = \frac{1}{2} I_{\text{ა}}^{*2} I_{\text{კ}}^2 \Delta R, \text{ რადგან } I = \frac{I_{\text{ა}}}{\sqrt{2}}$$

აქტიური ΔR წინააღობისთვის გვექნება:

$$\Delta R = \frac{X_{\text{კ}}^2}{R_{\text{გ}}^2 + X_{\text{კ}}^2} R_{\text{გ}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{გ}}}{X_{\text{კ}}}\right)^2} R_{\text{გ}},$$

სადაც $R_{\text{გ}}$ -წინააღობა, რომელიც ზღუდავს დენს, შექმნილი ნორმალური ელექტრონების მოძრაობით.

$$R_{\text{გ}} = \frac{1}{I_{\text{ა}}^{*\gamma 0}} R_{\text{გ}0}$$

$$R_{\text{გ}0} = \frac{\ell}{S} \rho_{\text{გ}0},$$

სადაც $R_{\text{გ}0}$ - გრაგნილის წინააღობა ნორმალურ მდგომარეობაში, როცა $I_{\text{ა}}^{*\gamma} = 1$; $\rho_{\text{გ}0}$ -ზეგამტარის ხვედრითი წინააღობა ნორმალურ მდგომარეობაში.

კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა $X_{\text{კ}}$, რომელიც ზღუდავს ზეგამტარულ დენს ტოლია

$$X_{\text{კ}} = X_{\text{კ}0} \frac{1}{1 - I_{\text{ა}}^{*\gamma 0}}$$

$$X_{\text{კ}0} = \ell_{\text{კ}0} \frac{\ell}{S}$$

სადაც $X_{\text{კ}0}$ -გრაგნილის კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა, როცა $I_{\text{ა}}^{*\gamma 0} = 0$

ΔR -ის რიცხოვრივი შეფასება, როცა $\rho_{60} = 4 \cdot 10^{-7}$ ომი. მ, $\ell_{30} = 10^{-22}$ ომი, მ როცა $I_{\theta}^{*0} = 0,5, \Delta R = 10^{-22} R_{60}$, ე.ი. ელექტრული დანაკარგები მეტად მცირეა და ისინი მხედველობაში არ მიიღება.

გრიგალური დანაკარგების განსაზღვრისათვის, განვიხილოთ ელემენტარული dx ფენა, რომელიც იმყოფება x მანძილზე ზე ძარღვის ზედაპირიდან. ეს ელემენტარული dx ფენა შებმულია ϕ_x მაგნიტურ ნაკადთან

$$\phi_x = \ell B_0 X = \ell B_j B_0^* X = \ell I_{\theta}^* I_j X$$

$$\text{სადაც } B_0^* = \frac{B_0}{B_j}$$

მაგნიტური ნაკადი წარმოიქმნება ზეგამტარული დენის მდგენელით. დაუშვათ, რომ მაგნიტური ინდუქცია სადენის შიგნით ინარჩუნებს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას B_0 , სადაც $-B_0$ მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე. ე.მ.ძ-ის მაქსიმალური მნიშვნელობა, წარმოქმნილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებით, ტოლია

$$E_{\theta} = \omega \ell x I_{\theta}^* I_j$$

R_x წინაღობა ელემენტარული dx ფენის ტოლია

$$R_x = \rho_6 \frac{\ell}{S_x}$$

სადაც S_x -განივი კვეთის ფართი, $S_x = 2\pi(r-x)dx$ ელემენტარულ dx ფენაში დანაკარგები დამოკიდებულია მაგნიტური ველის შეღწევალობის სიღრმეზე λ და ტოლია:

$$\Delta P_x = \frac{E_{\theta}^2 x}{R_x} = \frac{\omega^2}{\rho_6} 2\pi \ell x^2 (r-x) I_{\theta}^{*2} I_j^2 dx$$

გრიგალური დანაკარგების განსაზღვრისათვის აუცილებელია გაინტეგრირება ΔP_x , როცა x იცვლება 0-დან λ -მდე:

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \Delta P_x dx = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \frac{\omega^2}{\rho_6} 2\pi \ell I_{\theta}^{*2} I_j^2 X^2 (r-x) dx$$

გაინტეგრირებისას, მივიღებთ:

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{\omega^2}{3\rho_6} I_{\theta}^{*2} I_j^2 \ell r \lambda^3 \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda}{r}\right) \pi$$

ჩავსვათ ρ_6 და λ -ის მნიშვნელობები

$$\rho_6 = \frac{\rho_{60}}{I_a^{*\gamma_0}} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - I_a^{*\gamma_0}}}$$

გრიგალური დანაკარგებისათვის მივიღებთ გამოსახულებას

$$\Delta P_{გრიგ.} = \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\rho_{60}} \ell r \pi I_a^{*2} I_j^2 \lambda_0^3 \frac{1}{(1 - I_a^{*\gamma_0})^{\frac{3}{2}}} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\lambda_0}{r \sqrt{1 - I_a^{*\gamma_0}}} \right)$$

I_a^{*2} -ის გაზრდით დანაკარგები იზრდება. როცა $I_a^{*2} = I_a^{*შვეს.} \approx 1, \lambda = r$

მიიღწევა მაქსიმალური მნიშვნელობა.

$$\Delta P_{გრიგ.მ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{60}} I_j^2 \ell r \pi \frac{1}{4}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ზგ ძარღვის მოცულობა $V = \pi r^2 \ell$, მაშინ

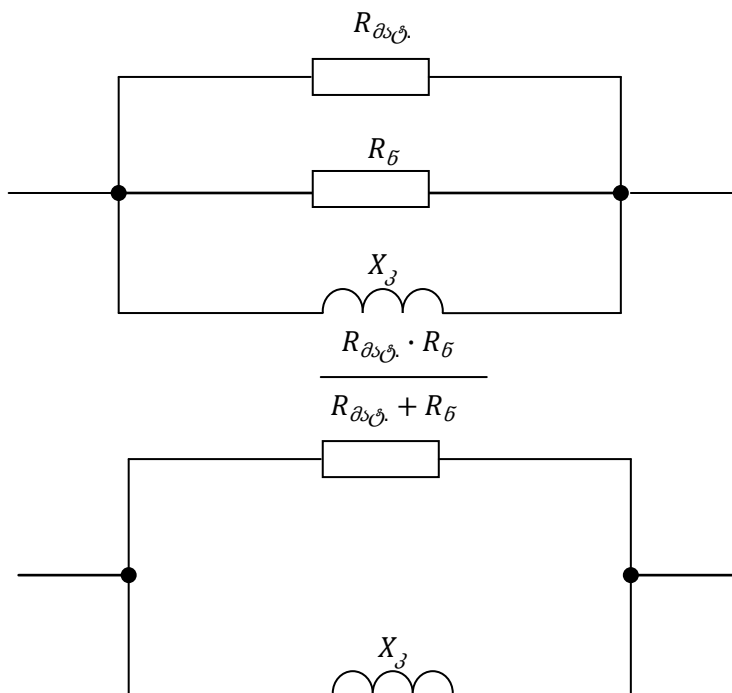
$$\Delta P_{გრიგ.მ.} = \frac{1}{12\rho_6} \omega^2 r^2 V I_j^2$$

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგებისათვის ანალოგიურად, შეიძლება მივიღოთ გამოსახულება

$$\Delta P_{გრიგ.მატ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{მატ.}} I_j^{*2} \ell b^4 \pi \frac{1}{4}$$

სადაც $\rho_{მატ.}$ - მატრიცის ხვედრითი წინააღობა; b - მატრიცის სიგანე; ℓ - ძარღვის სიგრძე; λ -მაგნიტური ველის შეღწევის სიღრმე; r_0 ზეგამტარული ძარღვის რადიუსი.

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგების გარდა, მიღებულია შეფასდეს ზგ ძარღვის წინააღობის გავლენით ელექტრული დანაკარგები. მატრიცის წინააღობა $R_{მატ.}$ შეერთებულია პარალელურად R_6 წინააღობასთან (ნახ.4.6)



ნახ. 4.6. მატრიცის წინალობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე $R_{m\phi}, R_b$ წინალობების შეცვლით ერთი ეკვივალენტური წინალობით R_{33} , მივიღებთ წრედს, რომელშიც კინეტიკური ინდუქციური წინალობა X_j შეერთებულია პარალელურად ეკვივალენტური წინალობასთან

$$R_{33} = \frac{R_b \cdot R_{m\phi}}{R_b + R_{m\phi}}$$

რაც ახდენს გავლენას ΔR წინალობაზე, რომელიც განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\Delta R = \frac{R_{33} X_j^2}{R_{33} + X_j^2}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები $\Delta P_{33\phi}$ გამოწვეული საკუთარი მაგნიტური ველით განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [31]:

$$\Delta P_{33\phi} = \frac{\mu_0}{\pi} I_j^2 \ell f \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta I}{2I_j} \right)^3$$

ვითვალისწინებთ, რა

$$\frac{\Delta I}{2I_j} = \frac{2I_\theta}{2I_j} = I_\theta^*$$

მივიღებთ:

$$\Delta P_{33\phi} = \frac{\mu_0}{6\pi} f \ell I_j^2 I_\theta^{*3}$$

გამოსახულება მიღებულია იმ შემთხვევისათვის, როცა კრიტიკული დენის სიმკვრივე I_j არაა დამოკიდებული B_o მაგნიტურ ველზე.

გამოვსახოთ კრიტიკული დენი I_j მისი სიმკვრივის j_j -ის საშუალებით:

$$I_j = \pi r^2 j_j$$

და გავითვალისწინოთ, რომ ზეგამტარის მოცულობა

$$V = \pi r^2 \ell,$$

მაშინ ჰისტერეზისული დანაკარგებისთვის გამოსახულებას ექნება შემდეგი სახე:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_o}{6\pi} f \ell (\pi r^2)^2 j_j^2 \frac{1}{I_\theta^3} = \frac{\mu_o}{6\pi} f \pi r^2 j_j^2 \frac{1}{I_\theta^3} V$$

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{1}{6} \mu_o f r^2 j_j^2 V \frac{1}{I_\theta^3}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები ერთეულ მოცულობაში გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{\Delta P_{ჰისტ.}}{V} = \frac{1}{24} \mu_o f d_j^2 j_j^2 \frac{1}{I_\theta^3}$$

სრული დანაკარგები ერთ ზეგამტარულ ძარღვში ტოლია:

$$\Delta P_\theta = \Delta P_{ელ.ზგ.} + \Delta P_{ელ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.ზგ.} + \Delta P_{ჰისტ.ზგ.}$$

მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების (მძგს) მუშაობის პირობა არსებითად განსხვავდება ერთძარღვიანი ზგ სადენის მუშაობის პირობისაგან. ზგ ძარღვი მძგს-ში იმყოფება მძგს-ის სხვა ძარღვების გარე მაგნიტურ ველში.

გარდა ამისა გარე მაგნიტური ველი ზგ ძარღვის შეიქმნება, აგრეთვე ზგ ძარღვებით, შემავალი ზეგამტარული გრაგნილების სხვა მძგს-ში.

ზგ ძარღვის ჯამური მაგნიტური ველი \bar{B}_o ხასიათდება ზგ ძარღვის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის ორი მდგენელით: მაგნიტური ინდუქციის განივი მდგენელი $\bar{B}_{o\perp}$ და პარალელური მდგენელი - $\bar{B}_{o\parallel}$

$$\bar{B}_o = \bar{B}_{o\perp} + \bar{B}_{o\parallel} \quad (4.29)$$

მაგნიტური ველი ზგ ძარღვებში აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$B_{o\perp} = \mu_o \frac{I}{\pi D}, \quad (4.30)$$

სადაც I ზგ სადენის დენი; D - ზგ სადენის დიამეტრი. თუ ზგ სადენში მოთავსებულია ძარღვები d დიამეტრით, შევსების კოეფიციენტი $K_{შვს.} = 1$, ძარღვების რიცხვი N ტოლია,

$$N \cong \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (4.31)$$

ზგ ძარღვში, როცა $i_{\rho} = i_{\rho}$, ზგ სადენში $I = I_{\rho}$ და ინდუქცია $B_{o\perp} = B_{\rho}$, (4.30) განტოლება მიიღებს შემდეგი სახეს:

$$B_{\rho} = \mu_o \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{i_{\rho}^{პერ.}}{\pi D} K_{შვს.} \quad (4.32)$$

სადაც $i_{\rho}^{პერ.}$ -კრიტიკული დენი ზგ პერიფერიული ძარღვის ზგ სადენში. (4.32) განტოლებიდან ძარღვის კრიტიკული დენისათვის მივიღებთ:

$$i_{\rho}^{პერ.} = \frac{\pi D B_{\rho}}{\mu_o K_{შვს.} \left(\frac{D}{d}\right)^2} = i_{\rho}^{განმბ.} \left(\frac{d}{DK_{შვს.}}\right), \quad (4.33)$$

სადაც $i_{\rho}^{განმბ.}$ -განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენი ზგ სადენში.

$$i_{\rho}^{განმბ.} = \frac{\pi}{\mu_o} d_{\rho} B_{\rho}$$

როგორც (4.33) განტოლებიდან ჩანს, გარე ზგ ძარღვის კრიტიკული დენი $\frac{d}{DK_{შვს.}}$ ჯერ ნაკლებია განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენის მნიშვნელობაზე.

$$I_{\rho} - \left(\frac{1}{K_{შვს.}} i_{\rho}^{განმბ.} \frac{d}{D}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^2 K_{შვს.} = \frac{D}{d} i_{\rho}^{განმბ.} \quad (4.34)$$

(4.34) განტოლება გვიჩვენებს, რომ კრიტიკული დენი I_{ρ} იზრდება $\left(\frac{D}{d}\right)$ -ის პროპორციულად. დენგამტარუნარიანობა ზგ სადენის იზრდება $\frac{D}{d}$ -ჯერ ან \sqrt{N} .

ზგ სადენის დენის საშუალო სიმკვრივის შემცირება და ზეგამტარის მოცულობის გაზრდა იწვევს ზეგამტარულ გრაგნილში დანაკარგების გაზრდას. ზეგამტარულ ტრანსფორმატორებში გრაგნილების დანაკარგების შემცირებისათვის და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისათვის გამოიყენება დაგრეხილი მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენები.

გარე მაგნიტური ველი დააინდუქცირებს დენებს ზეგამტარულ ძარღვებში, ქმნის ცვლად მაგნიტურ ველს და დანაკარგებს, როგორც სადენის თვით ზგ ძარღვებში, ისე მის მატრიცაში. დაინდუქცირებული ე.მ.ძ. მრავალძარღვა ზგ სადენში დაგრეხილი ძარღვებით განისაზღვრება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად წარმოქმნილი კონტურში არაერთგვაროვანი სტრუქტურით, შემდგარი ნორმალური მეტალის მატრიცისაგან და ზგ ძაფებისაგან.

დაგრეხილი სადენებში, ძაბვა ორი ზგ ძარღვებს შორის პერიოდულად იცვლის ნიშანს, რაც ძლიერი ხარისხით ზღუდავს დენებს ზეგამტარული სადენის მატრიცაში.

დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების დამოკიდებულება დაგრეხვის ბიჯისგან გრძივი და განივი მაგნიტურ ველებში გამოკვლეულია შრომებში [32-34]. ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებში მაღალი დენგამტარუნარიანობა შერწყმულია დანაკარგების დაბალ დონესთან. ისინი ხასიათდება დაბალი ინდუქციურობით და მაღალი ეფექტურობით.

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული ტრანსფორმატორების გრავნილების წინაშე დგას ამოცანა დანაკარგების შემცირებისა და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისა, აგრეთვე ინდუქციურობისა და გარე მაგნიტური ველების შემცირებისა, მძზგსლ-ის საშუალებით შესაძლებელი ხდება გრავნილის სადენების თითოეული ზგ ძარღვის კრიტიკული დენის მიყვანა მაქსიმალურ სიდიდემდე. ზეგამტარული სადენის შევსების კოეფიციენტის შერჩევით და

$$K_{შვს.} = \frac{d}{D}; N = \frac{D}{d} \quad (4.35)$$

(4.35) პირობის გათვალისწინებით (4.33) განტოლების შესაბამისად მივიღებთ

$$i_{D3}^{შვრ.} = i_{D3}^{განმზ.} \quad (4.36)$$

ე.ი. კრიტიკული დენი პერიფერიული ძარღვის იზრდება განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენამდე. (4.34) განტოლების თანახმად კრიტიკული დენისათვის, (4.35) პირობის გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$I_j = i_{d.3}^{განმ.} \left(\frac{D}{d} \right) \quad (4.37)$$

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული ძარღვები იმყოფებიან საკუთარ ლოკალიზებულ მაგნიტურ ველებში, ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი არ საჭიროებს დაგრეხვას და ტრანსპორმაციას. დანაკარგები ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებში განისაზღვრება ცალკეული ზეგამტარული ძარღვების ჯამური დანაკარგებით.

$$\Delta P_N N \Delta P_{\partial}, \text{ სადაც } N = \frac{D}{d}$$

ზგ სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება, მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. ზგ ძარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალძარღვა სადენში: $N_{\partial} = \frac{D_{\partial}}{d_{\partial}}$, აღნიშნული რაოდენობა ზგ ძარღვების შეესაბამება ზგ სადენის შევსების კოეფიციენტს: $K_{შევს.} = \frac{d_{\partial}}{D_{\partial}}$.

ასეთი გეომეტრიული თანაფარდობის დროს, თითოეული ზგ ძარღვი, ზგ სადენში პრაქტიკულად იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ლოკალიზებულია მის ირგვლივ. ასეთი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენები, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორების ძალოვან გრაგნილებში, ელექტრული მანქანების ღუზის გრაგნილებში, ელექტროკაბელებში, ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სოლენოიდში, ელექტროგადამცემ ხაზებში და სხვა.

ყველა ამ შემთხვევაში მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის, ლოკალიზებული მაგნიტური ველის გამოყენების დროს, მცირდება სადენის ინდუქციურობა, ინდუქციური წინაღობა და ინდუქციური ძაბვის ვარდნა. გრაგნილებში ზეგამტარული მასალის ხარჯი მცირდება $\frac{D_b}{d_a}$ -ჯერ.

4.6. ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება

ელექტრული მომხმარებლების ნორმალური მუშაობის უზრუნველყოფისათვის აუცილებელია, როგორც აქტიური ისე რეაქტიული სიმძლავრე. რეაქტიული სიმძლავრე იხარჯება მაგნიტური ველის შექმნაზე, მისი გადაცემა ხაზებით (გ/ხ) დაკავშირებულია ქსელის ელემენტებში აქტიური სიმძლავრის გარკვეულ დანახარჯებთან. ქსელის ელემენტებში იხარჯება აგრეთვე რეაქტიული სიმძლავრე, რაც მოითხოვს მისი გენერაციის გაზრდას. ამიტომ რეაქტიული სიმძლავრის შემცირებას თან ახლავს აქტიური სიმძლავრის ეკონომია და შესაბამისად სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება.

სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ღონისძიება ხორციელდება, როგორც ქსელის დაპროექტების დროს, ისე მისი ექსპლუატაციის დროს.

როგორც ცნობილია სიმძლავრის დანაკარგები გ/ხ-ში ტოლია [35]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= 3I^2R = \frac{P^2+Q^2}{U^2}R = \frac{S^2}{U^2}R; \\ \Delta Q &= 3I^2X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2}X = \frac{S^2}{U^2}X, \end{aligned} \right\} (4.38)$$

სადაც $\Delta P, \Delta Q$ -გ/ხ-ში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები;

R, X - გ/ხ-ის აქტიური და ინდუქციური წინაღობა;

I - გ/ხ-ში გამავალი დენი;

P, Q - გ/ხ-ში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე;

S - გ/ხ-ში სრული სიმძლავრე.

U - გ/ხ-ის ძაბვა.

როგორც (4.38)-დან ჩანს აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები დამოკიდებულია როგორც P -ზე ისე Q -ზე. დანაკარგები უკუპროპორციულია ძაბვის კვადრატისა. ამიტომ ძაბვის მცირე გაზრდა იძლევა სიმძლავრის დანაკარგების მნიშვნელოვნად შემცირებას.

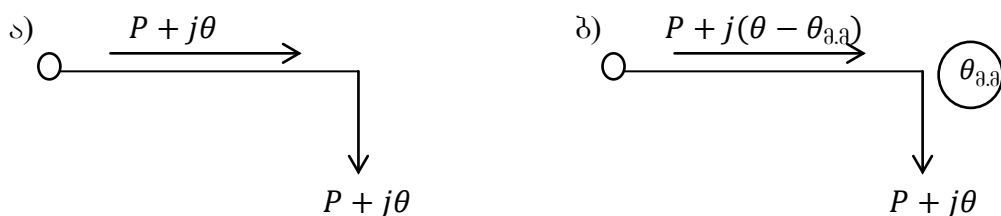
რეაქტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია მომხმარებლის ხასიათზე. როგორც (4.38)-დან ჩანს რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა გ/ხ-ით გენერატორიდან მომხმარებელამდე დიდ მანძილზე, იწვევს დანაკარგების გაზრდას, რადგანაც იზრდება R და X . რეაქტიული სიმძლავრის Q გაზრდით იზრდება, როგორც რეაქტიული ისე აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.

იმისათვის რომ არ გადაიტვირთოს ხაზი რეაქტიული სიმძლავრით, მმ-ს დგამენ მომხმარებელთან ახლოს. მაშინ (ნახ.4.7) დანაკარგები ხაზში მცირდება (4.39) მნიშვნელობიდან

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{P^2+Q^2}{U^2} R; \\ \Delta Q &= \frac{P^2+Q^2}{U^2} X; \end{aligned} \right\} (4.39)$$

(4.40) მნიშვნელობამდე

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{P^2 + (Q - Q_{ა.ა})^2}{U^2} R \\ \Delta Q &= \frac{P^2 + (Q - Q_{ა.ა})^2}{U^2} X. \end{aligned} \right\} (4.40)$$



ნახ. 4.7. გ/ხ-ში სიმძლავრის ცვლილების სქემები მ.მ-ის გარეშე (ა) და მ.მ-ის დადგმით მომხმარებელთან.

როგორც (4.40)-დან ჩანს, რაც მეტია მ.მ-ის სიმძლავრე $Q_{აა}$, მით მეტად მცირდება სიმძლავრის დანაკარგები.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია წარმოადგენს მნიშვნელოვან საშუალებას ელექტრომომარაგების ეფექტურობის ამაღლებისა.

სამრეწველო საწარმოებში ვენტილური ელექტროამძრავების, ელექტროლიზური გამმართველის, მძლავრი ელექტროღუმელების და სხვა მომხმარებლების დანერგვა, მკვეთრადცვალებადი დატვირთვით, არასინუსოიდური დენით უმეტეს შემთხვევაში, იწვევს მკვებავი სისტემის ძაბვის ფორმის დამახინჯებას საერთო მიერთების წერტილში. ეს დამახინჯება გამოვლინდება ჰარმონიკების სახით, ძაბვის რხევით, განათების ციმციმით, ძაბვის ვარდნით, არასიმეტრიით, ელექტრონული მოწყობილობის მუშაობის შეფერხებით. ელექტრული მანქანების გრაგნილების გადახურებით და მათი ექსპლუატაციის ვადის შემცირებით. ძაბვის დამახინჯების დასაშვები დონე საერთო დდანიშნულების ენერგომომარაგების სისტემისათვის რეგლამენტირდება სახელმწიფო სტანდარტით GOST13109-97.

გარდა ამისა, აღნიშნული დატვირთვები წარმოადგენენ მნიშვნელოვან მომხმარებლებს რეაქტიული სიმძლავრის, რის შედეგად შეიძლება მოხდეს ძაბვის დაუშვებელი გადახრა და მკვებავი გ/ხ-ში დანაკარგების გაზრდა.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციისათვის, ძაბვის სტაბილიზაციისათვის და ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების შესაბამისობისათვის სახელმწიფო სტანდარტის GOST13109-97 მოთხოვნებთან, ფართო გამოყენება ჰპოვა სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობებმა. [36].

სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობას შეუძლია, როგორც გასცეს, ისე მიიღოს ქსელიდან რეაქტიული სიმძლავრე. აღნიშნული თვისება საშუალებას იძლევა ძაბვის რეგულირებისა. დამის საათებში, როცა დატვირთვა საგრძნობლად მცირდება, შეიძლება ძაბვა უეცრად გაიზარდოს, რაც საშიშროებას წარმოადგენს ელექტრომოწყობილობების იზოლაციისათვის. იმისათვის, რომ

შეგამციროთ ძაბვა, აუცილებელია გაეზარდოს ძაბვის დანაკარგები (4.41)-დან (4.42)-მდე.

$$\Delta U = \frac{PR+QX}{U} \quad (4.41)$$

$$\Delta U = \frac{PR+(Q+Q_{აა})X}{U} \quad (4.42)$$

ამისათვის მმ-ბამ უნდა მოიხმაროს ქსელიდან რეაქტიული სიმძლავრე. კონდენსატორები კი ძაბვის შემცირების მომენტში უნდა გამოირთოს ნაწილობრივ ან მთლიანად, ვინაიდან კონდენსატორები მხოლოდ გასცემენ ქსელში რეაქტიულ სიმძლავრეს. რეაქტიული სიმძლავრის გაზრდამ (4.42)-ის თანახმად ძაბვის შემცირების მიზნით, შეიძლება გამოიწვიოს სიმძლავრის დანაკარგების გაზრდა (4.38)-ის თანახმად. თუმცა აღნიშნული პროცესი მიმდინარეობს შედარებით მცირე დროით და ელექტრომოწობილობების იზოლაციის შენარჩუნებისათვის, ზოგჯერ თვლიან დასაშვებად დანაკარგების ასეთი გაზრდას.

სამუშაოში განხილულია ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა (ზგსმმ), როგორც ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება.

ნახ. 4.8 გამოსახულია ზგსმმ-ის ელექტრული სქემა მეტალურგიული ქარხნისათვის ელექტრორკალური ღუმელებით (ერდ) და ფოლადის კომპლექსური დამუშავების აგრეგატებით (ფკდა). სქემა შედგება სამი კონდენსატორული ბატარეასაგან, შეერთებული სამკუთხედად, მუდმივად შეერთებული დატვირთვის კეების წრედში. აგრეთვე სამი ინდუქციური დენის რეგულატორისაგან გაყოფილი ზეგამტარული დროსელებით, შეერთებული სამკუთხედად და ჩართულია პარალელურად კონდენსატორების ბატარეასთან. რეგულატორების ტირისტორების მართვა ხორციელდება ავტომატურად. მართვად სიგნალს წარმოადგენს მოცემული რეაქტიული სიმძლავრისა და დატვირთვის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრეს შორის სხვაობა. რაც უფრო მეტ რეაქტიულ სიმძლავრეს მოიხმარს დატვირთვა, მით მეტია რეგულატორების ტირისტორების გაღების კუთხე $Q_{გაღ}$. და მით ნაკლები მნიშვნელობა გააჩნია i_{LA}, i_{LB}, i_{LC} რეაქტიულ დენებს,

მოთხოვნილი რეგულატორების მიერ მკვებავი ქსელიდან. დატვირთვის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრეს განსაზღვრავს გაზომვის სქემა. იმასთან დაკავშირებით, რომ განიხილება სამფაზა სიმეტრიული დატვირთვა, გაზომვა შეიძლება განხორციელდეს ერთ ფაზაში. სიგნალი, რომელიც პროპორციულია მოცემული რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობისა და გაზომვის სქემიდან მიღებული მნიშვნელობას შორის სხვაობის, მიეწოდება რეგულატორის ბლოკს, რომლის გამოსასვლელიდან სიგნალი მიეწოდება ტირისტორული ვენტის მართვის სისტემას. მართვის სისტემის გამოსასვლელიდან მიღებული იმპულსები მიეწოდება ინდუქციური დენის რეგულატორების ტირისტორებს. სრული სიმეტრიის უზრუნველყოფისათვის, ტირისტორების გაღების კუთხეები $Q_{გაღ.}$ ყველა რეგულატორისათვის უნდა იყოს ერთნაირი, რეგულირების ყველა დიაპაზონში. ინდუქციური ხასიათის დატვირთვა მოითხოვს მკვებავი ქსელიდან რეაქტიული სიმძლავრეს, რომელიც შეიძლება იცვლებოდეს გარკვეულ ზღვრებში $Q_{დ.მინ.} \div Q_{დ.მაქ.}$ კონდენსატორთა ბატარეა გამოიმუშავებს კომპენსაციის უზრუნველყოფის პირობიდან დატვირთვის მაქსიმალურ რეაქტიულ სიმძლავრეს Q_c , ე.ი. უნდა შესრულდეს ტოლობა

$$Q_{დ.მაქ.} = Q_c = -\omega CU_{გაქ.}^2/2 \quad (4.43)$$

ინდუქციური დენის რეგულატორმა უნდა შეინარჩუნოს მუდმივ დონეზე მკვებავი ქსელიდან მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე. აღნიშნული პირობა შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით

$$Q_{გ} + Q_L = Q_c = const, \quad (4.44)$$

სადაც Q_L - ინდუქციური დენის რეგულატორის მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე. იმასთან დაკავშირებით, რომ მკვებავი ძაბვა საერთოა მმ-ის ყველა ბლოკებისათვის, (4.44) თანაფარდობა შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$I_{გ,გ} + I_{გ,L} + I_{გ,c} = const, \quad (4.45)$$

$$\text{ან } I_{გ} \sin \varphi_{გ} + I_L \sin \varphi_L = I_c \sin \varphi_c = const \quad (4.46)$$

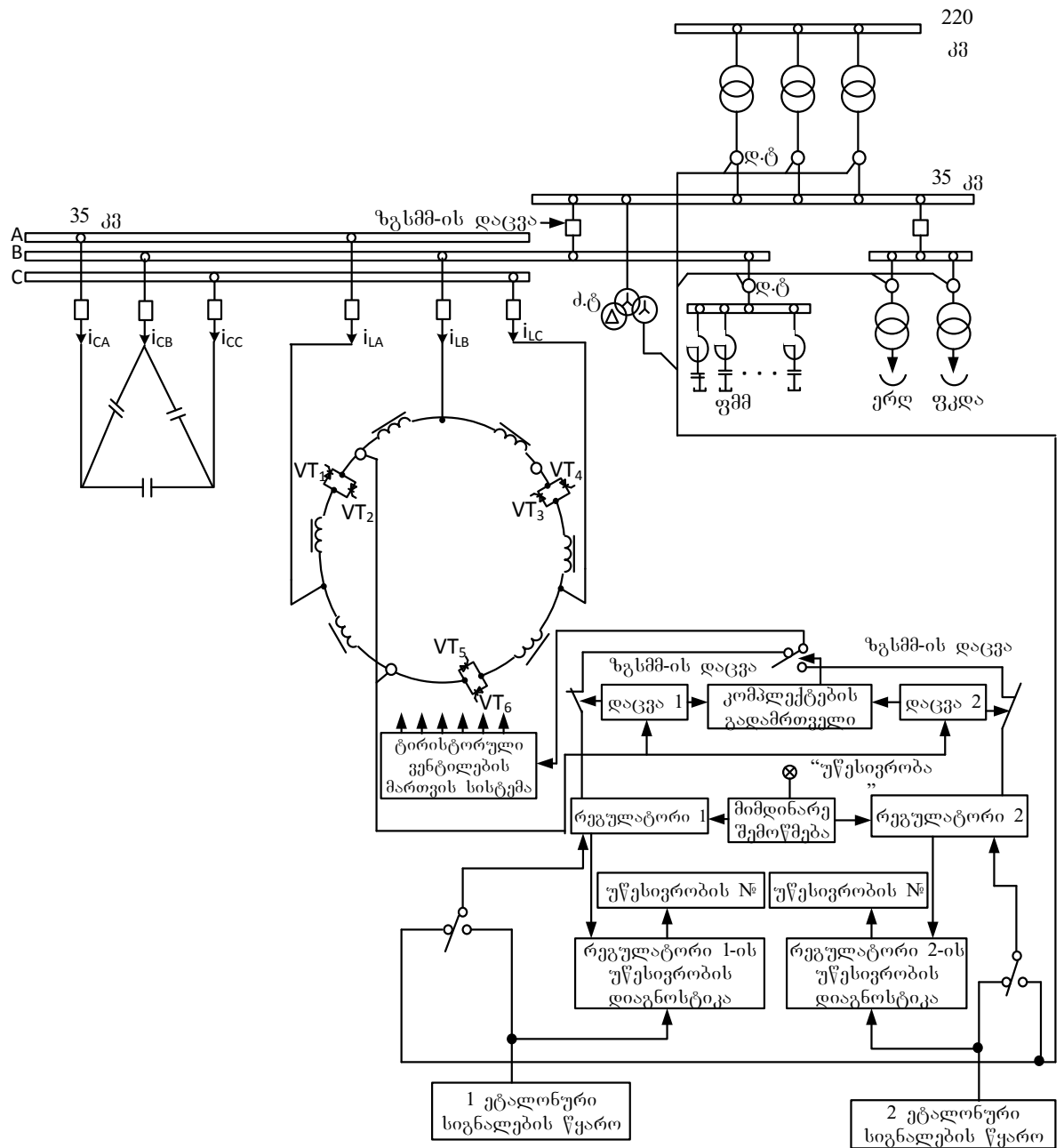
როგორც ჩანს, დატვირთვის რეაქტიული დენის ცვლილება თანხმლები უნდა იყოს ინდუქციური რეგულატორის რეაქტიული დენის ისეთივე ცვლილებისა, რათა აღნიშნული დენების ჯამი დარჩეს

მუდმივი. დატვირთვის რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილების დიაპაზონი, შეპირობებულია რეგულატორის ინდუქციური დენის ცვლილების საჭირო დიაპაზონთან, რომელიც შეიძლება განისაზღვროს თანაფარდობიდან

$$\Delta I_L = \frac{Q_c - (Q_{დ.მაქს.} - Q_{დ.მინ.})}{U_{ქს.}} \quad (4.47)$$

თუ ინდუქციური დენის რეგულირების საჭირო დიაპაზონი ΔI_L არ შეუძლია უზრუნველყოს ერთმა რეგულატორმა, შეიძლება მიუერთდეს პარალელურად კიდევ რამოდენიმე ანალოგიური რეგულატორები. ეს იძლევა პრაქტიკულად შეუზღუდავი შესაძლებლობებს რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებისა, მოთხოვნილი მკვებავი ქსელიდან.

ზგსმმ-ის სქემის რეალიზაცია, უზრუნველყოფს სწრაფქმედებით დატვირთვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას და ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების გაუმჯობესებას, დატვირთვის სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდას და ელექტრული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებას.



ნახ. 4.8. ზგსმმ-ის ელექტრული სქემა და მისი მართვის სისტემა.
 დ.ტ-დენის ტრანსფორმატორი: დ.ტ. - ძაბვის ტრანსფორმატორი; $VT_1 - VT_6$ -ტირისტორული ვენტილები.

4.7. შიდა გადამეტებახეები ელექტროგადაცემაში

შიდა გადამეტებახე ეწოდება ძახვის ამაღლებას ნომინალური მნიშვნელობაზე ზევით, აღძრული ელექტროგადაცემის გარკვეულ რეჟიმებში, როგორცაა დამყარებული ან გარდამავალი. ზემაღალი ძახვს ელექტროგადაცემაში ასეთი გადამეტებახე უფრო საშიშია, ვიდრე ატმოსფერული, აღძრული ჭექა-ქუხილის მოვლენის შედეგად, და სახელდობრ ისინი განსაზღვრავენ იზოლაციის დონეს. შიდა გადამეტებახის შეზღუდვა საშუალებას იძლევა ავამაღლოთ ეკონომიური ეფექტიანობა ზემაღალი ძახვის ელექტროგადაცემის მაქსიმალური შიდა გადამეტებახე ძირითადად შეინიშნება გარდამავალ რეჟიმებში; მათი ხანგრძლივობა იზღუდება ძირითადი სიხშირის რამოდენიმე პერიოდით. თავისუფალი მდგენელის მიღების შემდეგ ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესში დარჩება კვაზი დამყარებული გადამეტებახე, რომლის დონე ნელა იცვლება, მაგალითად, სინქრონული კომპენსატორების და გენერატორების აგზნების რეგულატორების მოქმედებით. კვაზი დამყარებული გადამეტებახე გრძელდება რამოდენიმე წამიდან რამოდენიმე წუთამდე, სანამ არ ჩაირთვება მაშუნტირებელი რეაქტორი ან სხვა დონისძიება.

კვაზი დამყარებული გადამეტებახეს ადგილი აქვს ელექტროგადაცემის გაწყვეტის დროს, მცირე დატვირთვის დროს, დაზიანებული ფაზების გამორთვის დროს და ა.შ.

შიდა გადამეტებახე შეიძლება გაძლიერდეს რეზონანსული მოვლენებით ძირითად სიხშირეზე ან ანომალური სიხშირეზე, გამოვლენილი გადაცემის ზოგიერთი ელემენტების არაწრფივი მახასიათებლები.

ეკონომიური მოსაზრებიდან დასაშვები ჯერადობა შიდა გადამეტებახის ამცირებენ ელექტროგადაცემის ნომინალური ძახვის გაზრდით.

შემოვიტანოთ აღნიშვნები: $U_{\text{დ}}$ -მაქსიმალური ხანგრძლივი დასაშვები მუშა ძახვა; $k_{\text{დ}}=U_{\text{დ}}/U_{\text{ნ}}$ გარდამავალ პროცესში დარტყმის ძახვის $U_{\text{დ}}$

შეფარდება ფაზის მუშა ძაბვაზე, ეწოდება გადამეტაბვის კოეფიციენტი - K .

გადამეტაბვის კოეფიციენტი K შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს კოეფიციენტების ნამრავლის, რომელშიც გათვალისწინებულია გადამეტაბვა სტაციონალურ რეჟიმში K_s და გარდამავალ პროცესში K_d

$$K = \frac{U_d}{U_{მ.ქ.ფ}} = \frac{U_d}{U_{მ.ქ.ს}} = \frac{U_{მ.ქ.ს}}{U_{მ.ქ.ფ}} = k_d k_s \quad (4.48)$$

ერთფაზა ხაზში კომუტაციის დროს საწყისი ნულოვანი პირობებით დარტყმის კოეფიციენტმა არ შეიძლება გადააჭარბოს მნიშვნელობას 2,0. სამფაზა გადაცემაში დარტყმის კოეფიციენტი შეიძლება აღმოჩნდეს 2,0-ზე მეტი. დარტყმის კოეფიციენტის გაზრდა შეიძლება აგრეთვე გამოწვეული იყოს მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნასთან.

110-220 კვ. ძაბვის გადაცემაში შიდა გადამეტაბვის კოეფიციენტი დიდი აღბათობით არ აჭარბებს 3,0, ამიტომ დაცვა გადამეტაბვისგან აირჩევა ატმოსფერული გადამეტაბვის პირობიდან და აიწყობა გვარლის და მარტივი ვენტილური მცდელების საფუძველზე. ზემოაღნიშნული ძაბვის გადაცემაში გადამეტაბვის კოეფიციენტი დიდი აღბათობით აჭარბებს 3,0-ს. მაღალი გადამეტაბვა გადაცემაში დაკავშირებულია ელექტრული ენერჯის დიდი ნაკადების რხევებთან. რხევების პერიოდის განმავლობაში მაგნიტური ენერჯია, დაგროვილი სისტემის ინდუქციურ ელემენტებში, გადადის ელექტრულ ენერჯიაში ტევადურ ელემენტებში, რომელიც ტოლია

$$\exists_c = \frac{1}{2} C U_d^2 = \frac{1}{2} C (U_{მ.ქ.ს} \sqrt{2} K)^2 = C U_d^2 k^2 \quad (4.49)$$

ენერჯის ნაკადის სიმძლავრე, რომელიც მოდის რხევების დროს სიგრძის ერთეულზე, შეიძლება გამოვსახოთ ხაზის ხვედრითი დამმუხტავი სიმძლავრით ნომინალური ძაბვის დროს:

$$S_{\exists} = Q_{დ.მ.} k^2 k_d^2$$

მაგალითად, დაგროვილი ენერჯია ხაზის მონაკვეთზე 1150 კვ ძაბვის 100 კმ სიგრძით, 2,5-ჯერადი გადამეტაბვის მომენტში, ტოლია 12 მგჯოულის, ხოლო ენერჯის ნაკადის სიმძლავრე შეესაბამება 4000 მგვა.

გადამეტაბვის შეზღუდვისათვის მოწყობილობა უნდა იყოს გათვლილი ენერჯის მძლავრი ნაკადის მართვაზე.

გადამეტაბვის შემცირების ტენდენცია ეწინააღმდეგება ღირებულების ამაღლებას და მოთხოვნებს დამცავი მოწყობილობის მოთხოვნებს. მაქსიმალური გადამეტაბვა დამოკიდებულია სისტემის მრავალ პარამეტრებზე, მათ შორის მნიშვნელოვანს წარმოადგენს: მუშა ძაბვა, სისტემის მოკლედ შერთვის (მ.შ.) სიმძლავრე, ელექტროგადაცემის ხაზის სიგრძე, მაკომპენსირებელი მოწყობილობის ტიპი და კომპენსაციის ხარისხი, ხაზის პირდაპირი და ნულოვანი მიმდევრობის რეაქტიული ფარდობა. ცალკეული ფაქტორების ზეგავლენის გამოვლენისათვის განვიხილოთ ზოგიერთი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები.

ცნობილია, რომ დარტყმის გადამეტაბვის დადგომის დრო იზრდება ხაზის სიგრძის გაზრდასთან ერთად: 500 კმ სიგრძის ხაზისთვის დარტყმის გადამეტაბვა შეიმჩნევა პირველი ნახევარპერიოდში, 1000 კმ სიგრძის ხაზში მეორე ნახევარპერიოდში, 1500 კმ სიგრძის ხაზში მესამე ნახევარპერიოდში. დარტყმის კოეფიციენტი მცირდება ხაზის სიგრძის გაზრდით.

გადამეტაბვის ანგარიშის დროს გენერატორები წარმოდგენილია ემძების სახით, ჩართული წინააღმდეგობაზე: ზეგარდამავალი X_d'' , თუ დროის მუდმივა გენერატორის დამამშვიდებელი გრაგნილის მეტია გარდამავალი პროცესის დროზე; გარდამავალი X_d' , თუ დროის მუდმივა დამამშვიდებელი გრაგნილის ნაკლები ან თანაზომადია გარდამავალი პროცესის ხანგრძლივობის. ეკვივალენტური წინააღმდეგობა მკვებავი სისტემის, უკუპროპორციულია მისი სიმძლავრის, აგრეთვე უნდა გავითვალისწინოთ ადგილობრივი დატვირთვის მადემფირებელი ეფექტი, რომელიც იკვებება გენერატორულ ძაბვაზე და საშუალო ქსელის ძაბვიდან.

მაქსიმალური გადამეტაბვა დაუტვირთავი გრძელი ხაზის ჩართვის დროს აღიძვრება ელექტროსისტემის განვითარების პირველ ეტაპზე, როცა მისი სიმძლავრე მცირეა, ხაზის დასაწყისში ძაბვის რეზონანსული ამაღლების შედეგად.

დამყარებული გადამეტება ძირითად სისწორეზე არასიმეტრიულ რეჟიმებში ჩვეულებრივ გამოითვლება სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდით. მოკლედ შერთვის წერტილის მიმართ წრედის შემავალი წინაღობების პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის განსაზღვრით, შეიძლება ვიანგარიშოთ დამყარებული გადამეტება დაუზიანებელ ფაზაში. აუცილებელი პირობა დიდი გადამეტების აღძვრისა წარმოადგენს სხვადასხვა ნიშნები პირდაპირი და ნულოვანი მიმდევრობის შემავალი წინაღობების; ამ დროს ჩვეულებრივ გულისხმობენ, რომ პირდაპირი და უკუ მნიმდევრობის შემავალი წინაღობები ტოლია ($Z_{\text{შეგ},1} = Z_{\text{შეგ},2}$). ასეთი მეთოდი ანგარიშის მკაცრად გამოიყენება წრფივი სისტემებისთვის, სადაც არ შეიცავს გაჯერებულ რეაქტორებს, ტრანსფორმატორებს, აგრეთვე მბრუნავ ელექტრულ მანქანებს დაზიანების ადგილთან ახლოს (ამ შემთხვევაში $Z_{\text{შეგ},1} \neq Z_{\text{შეგ},2}$).

დასკვნები

1. განხილულია სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგები ელექტროგადაცემაში და მისი ელემენტებში. მიღებულია თანაფარდობები დანაკარგების ანგარიშისთვის.

2. შესწავლილია ძაბვების განაწილება, რომელიც უზრუნველყოფს იდეალიზირებულ გადამცემ ხაზებში სიმძლავრის დანაკარგები მინიმუმს.

3. გაანალიზებულია ცვალებადი აქტიური სიმძლავრის პირობებში რეჟიმების მართვა მარეგულირებელი მოწყობილობის საშუალებით, რომლის რიცხვში მნიშვნელოვან ადგილს იკავებს მართვადი განივი კომპენსაცია. შესწავლილია სიმძლავრის დანაკარგები განივი კომპენსაციის მოწყობილობებში.

4. განხილულია სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე, დადგენილია, რომ გვირგვინის წარმოშობის პირობას წარმოადგენს ხაზის ძაბვის გაზრდა კრიტიკულ დონეზე.

5. შესწავლილია მართვადი განივი კომპენსაციის ტექნიკური მაჩვენებლები; ხაზის დამუხტავი სიმძლავრე, ხაზის გასწვრივ განივი კომპენსაციის მოწყობილობის განაწილება, მისი სიმძლავრე და მოთხოვნები ღრმა რეგულირებასთან.

6. განხილულია განივი კომპენსაციის მოწყობილობების ძირითადი ტიპები, მათი შედარებითი ანალიზი, პარამეტრებისა და მაჩვენებლების მიხედვით.

7. დამუშავებულია ელექტროენერჯის ტექნიკური ხასიათის დანაკარგების შემცირების რეკომენდაციები, რომლებიც დაფუძნებულია გადამცემის ელემენტების მოდერნიზაციაზე მარალტემპერატურული ზეგამტარული მასალების გამოყენებით.

8. დამუშავებულია ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით.

9. დამუშავებულია ახალი თაობის ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა როგორც ელექტრული სიმძლავრის

დანაკარგების შემცირების და ძაბვის სტაბილიზაციის ერთ-ერთი ეფექტური საშუალება.

10. დამუშავებულია მათემატიკური მოდელი და შესწავლილია ზეგამტარული ტრანსფორმატორის და ზეგამტარული სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობის გრაგნილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Энергетика СССР в 1976-1980 годах/под ред. А.М. Некрасова, М.Г. Первухина.-М.: Энергия, 1977-288 с.
2. Дальние передачи переменного тока/И.С. Брук, П.И. Зубков, А.А. Крюков и др.-М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 259 с.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем .под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро - 2-е изд. - М.: Энергия, 1977. - 288 с.
4. Синхронные компенсаторы/С.И. Гольденберг, Л.С. Моз, З.Б. Нейман, В.З. Пекне. - М.: Энергия, 1969. - 287 с.
5. Левитов В.И. Корона переменного тока. - М.: Энергия, 1975.-280 с.
6. Левитов В.И., Полков В.И. Исследования короны на высоковольтных передачах. - Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964, №3, с,5-16.
7. К расчету годовых потерь в электрических сетях энергосистем /Г.Ф. Горазеева, В.В. Ершевич, Г.А. Илларионов и др. - электричество, 1969, №11, с.19-23.
8. Совалов С.А. Режимы электропередач 400-500 кв. ЕЭС. - М.: Энергия, 1967. - 304 с.
9. Г.В. Михневич, А.Е. Раздин, В.М. Фиалков, А.Н Курочкин. Повышение устойчивости сверхмощных турбогенераторов с помощью управляемых реакторов. - Электричество, 1970, №7, с.51-55.
- 10.Elslinger R., Lamontagne G., Roy I.C. Transmission of 16000 MW over a distance of 1200 km from James Bay to Hydro-Quebec load centers. - Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques (CIGRE), 25 Session, report 32-07, 1974.
11. Underground Power Transmission Report to the Federal Power Commission by the Commissions Advisory Committee on Underground Transmission, April 1966, by Arthur D. Little.
12. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.П. Сверхпроводящие магнитные системы. Наука, Л., 1967.
13. Веников В.А., Зуев Э.Н., Околотин В.С. Сверхпроводники в энергетике. Энергия, М., 1972,

14. Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.С. Криогенная техника. Энергия, М., 1974.
15. Klaudy P.A. "Some experiments relating to the layout of superconducting transformers" III Advances in Cryogening Engineering, N.Y., 1965, vol.9.
16. Hirczy H. "Kraftlinienverkettung und Streuung bei eisenlosen Transformatoren mit verschachtelten supraleitenden Ringwicklungen", Archiv fur Electrotechnik, 1972, N55, S1-9.
17. „Plastics used for suoerconducting transformers//Applied plastics, 1965, vol. 8, N8, P.68.
18. Riemersma H., Barton M.L., Litz D.C., Eckels P.N., Murphy I.H., Roach J.F. "Application of superconducting technology transformers" IEEE Trans. on Power Appar. and Sist 1981, vol. 100, N7, p.3398.
19. Thanawala H.L. "Improved a.c. power transforming assembly пат: англии кл.: H2H (HO2h), N1119877, заявлю 20.06.67, опубл. 17.07.68.
20. Рычагов А.В., Свалов Г.Г., Сытников В.Е., Таран А.В. "Сверхпроводящие обмоточные провода для магнитных систем различного назначения". Кабельная техника, 1992, №1, с.6-9.
21. ВНИИНМ "Сверхпроводящие материалы различных назначений". Российский электротехнический конгресс Секция 9. Сверхпроводящие и электротехнические установки М. 1999.
22. Глебов И.А., Черноплеков Н.А., Альтов В.А. "Использование сверхпроводимости - магистранльное направление развития электроэнергетики XXI века". Российский электроэнергетический конгресс Секция 9. Сверхпроводящие и энергетические установки, М., 1999.
23. "Alcatel produces 1 km of superconducting wire" Electrical Rev. (Gr.Brit), 1998, 231, N8, с.14.
24. ВНИИНМ им. Акад. А.А. Богвара "Сверхпроводящие материалы различных назначений". Россиский электротехнический конгресс Секция 9. Сверхпроводящие и электротехнические установки М. 1999.
25. Yamamoto M., Ishigohka T., Kaiho K., Kimura Y. "Conceptual design of a power transformer with high Tc superconductor" Proc. 12 th Int. Cryog. Eng. Conf. Southampton 12-15 July 1988, ICEC Cuilford, 1988, с.734-738.

26. Кохреидзе Т.К. Математическая модель электромагнитных устройств трансформаторного типа. Изд-во “технический университет”, 2000.
27. კოხრეიძე თ., კოხრეიძე კ. ახალი თაობის ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორი მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით. “ენერჯია”, №1(69), 2014.
28. თ. კოხრეიძე, კ. კოხრეიძე. ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი. „ინტელექტუალი“, №26, 2014, გვ.205-211.
29. Калантаров П.Л. «Схема эквивалентная трехобмоточному трансформатору». Электричество 1948, №3.
30. თ. კოხრეიძე, კ. კოხრეიძე. ზეგამტარული ტრანსფორმატორების გრაგნილების სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში. “ენერჯია”, №2(70), 2014, გვ.8-17.
31. Г. Брехна. Сверхпроводящие магнитные системы. Мир, М., 1976.
32. Schiiki K., Aharak., Kudo M. A.c. loss and twisting effects in superconducting composite conductor. Japan. J. Appl. phys., 1974, V.13, №2, P.345.
33. Kwasnitza K., Horwath I. Reduction of the a. c. losses of multifilament superconductors by the use of low twist rate. J. Appl. phys., 1976, V.47, №11, P.5038.
34. И.А. Глебов, Ч. Лаверик, В.Н. Шахтарин. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Наука Л., 1980.
35. Блок В.Н. Электрические сети и системы. М.: «Высшая школа» 1986.-430 с.:ил.
36. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск.-М.: Энергоатомиздат, 1985.-136 с., ил.
37. კ. კოხრეიძე, შ. ნემსაძე, თ. კოხრეიძე. მაღალი ძაბვის გადამცემ ხაზებში სიმძლავრის დანაკარგების ანგარიშის მათემატიკური მოდელი. მე-III საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები, მოხსენებების კრებული, ქუთაისი, საქართველო, 2015, გვ.71-75.