

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მალხაზ დვალიძე

ჰიდროგენერატორების მუშაობის რეჟიმები სტატორის
გრაგნილის არასიმეტრიულობის პირობებში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“, შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2016 წ

საავტორო უფლება © 2016 წელი, მალხაზ დვალიძე

თბილისი

2016 წ

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით მალხაზ დვალის მიერ შესრულებულ სადოქტორო ნაშრომს დასახელებით: „ჰიდროგენერატორების მუშაობის რეჟიმები სტატორის გრაგნილის არასიმეტრიულობის პირობებში“, ვაძლევთ რეკომენდაციას ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის საგამოცდო სადისერტაციო საბჭოზე მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი:

ტ.მ.დ. პროფესორი, იაკირ ბიჯამოვი

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016

ავტორი: მალხაზ დვალიძე

დასახელება: „ჰიდროგენერატორების მუშაობის რეჟიმები სტატორის გრაფილის არასიმეტრიულობის პირობებში”

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

აკადემიური ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 2016 წლის

ინდივიდუალური პროფნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების ნაშრომის 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

წინამდებარე ნაშრომში გამოკვლეულია ჰიდროელექტრო-სადგურებზე გენერატორების ანორმალური რეჟიმების გამოყენების შესაძლებლობა განასაკუთრებულ შემთხვევებში ელექტრული ენერჯის გამომუშავების საიმედოობისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების მიზნით.

ცნობილია, რომ ელექტროსადგურების მუშაობის საიმედოობა ნორმალურ და ექსტრემალურ პირობებში უზრუნველყოფილია ძირითადად ელექტროენერჯის წარმოების შესაბამისი ტექნოლოგიით, ნაგებობებისა და ელექტრომოწყობილობების ხარისხით, მართვისა და რეგულირების სისტემების გამართული მუშაობით და სხვა პირობებით, რის გათვალისწინებაც ხდება პროექტირების ეტაპზე. მაგრამ შესაძლებელია და უნდა გამოიყენებოდეს, განსაკუთრებით ექსტრემალურ და ავარიულ პირობებში, საიმედოობის ზრდის და საექსპლუატაციო მოქნილობის დამატებითი ზომები. პირველ რიგში გამოყენებული უნდა იქნას ის დამატებითი ზომები, რომლებიც არ მოითხოვენ დამატებით დაფინანსებას და ამავდროულად იძლევიან საგრძნობ ეკონომიკურ ეფექტს არა მარტო ელექტროენერჯის გამომუშავების იმედიანობის გაზრდით, არამედ ენერგორესურსების დაზოგვით და მათი რაციონალური ხარჯვით.

როგორც წესი, ეს არის ელექტრული მოწყობილობის მუშაობის სპეციალური რეჟიმები, რომლებიც ხელს უწყობენ ელექტროენერჯის წარმოების საიმედოობასა და ეფექტურობას როგორც ავარიული სიტუაციების დადგომის დროს, ასევე ძირითადი ელექტრომოწყობილობის რემონტის და მასთან დაკავშირებული ელექტროსადგურის სიმძლავრის შემცირების პერიოდებში.

ჰიდროელექტროსადგურების ექსპლუატაციის პრაქტიკაში ცნობილია ანორმალური რეჟიმების გამოყენება სადგურის მუშაობის ენერგოეკონომიკური ეფექტურობის ამაღლების მიზნით. შეიძლება მოვიყვანოთ საიანო-შუმენსკაიას ჰიდროელექტროსადგურის ბლოკის არასიმეტრიულ რეჟიმში მუშაობის წარმატებული მაგალითი, როდესაც ბლოკის სატრანსფორმატორო ფაზის დაზიანებისას ან გეგმიური რემონტის დროს ბლოკის სიმძლავრის ნაწილი შეიძლება იყოს გადაცემული ორი ფაზით, ნაცვლად მისი სრული გამორთვის. ამ შემთხვევაში გენერატორის და მთლიანად ელექტროსადგურის მუშაობის რეჟიმი ხასიათდება გენერატორის ფაზებს შორის დენების საერთო არასიმეტრიით, რომელიც იწვევს უკუ და ნულოვანი მიმდევრობების ელექტრომაგნიტური ველების გაჩენას. აღნიშნული დენების არასიმეტრიულობა (ფაზებს შორის უთანაბრობა) შეზღუდულია და განისაზღვრება „ტექნიკური ექსპლუატაციის წესების“ თანახმად. შესაბამისად, ზემომოყვანილი ანორმალური რეჟიმის გამოყენება ხდება და გენერატორის არასიმეტრიის ნორმების დასაშვებ ფარგლებში.

შეიძლება მოყვანილ იქნას სხვა ამგვარი ანორმალური რეჟიმები, რომელთა გამოყენება შესაძლებელია განსაკუთრებულ სიტუაციაში ელექტრული ენერჯის გამომუშავების ამალგების მიზნით. ერთ-ერთი მათგანი, შესაბამისი შესწავლის და გამოკვლევის შემდეგ, არის წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილი ჰიდროგენერატორის მუშაობის რეჟიმი სტატორის გრაგნილის ხელოვნური არასიმეტრიით. იგულისხმება გენერატორის მუშაობა სტატორის გრაგნილის ფაზის პარალელურ შტოებში დაზიანებული ხვიის სქემიდან გამორთვით გამოწვეული ფაზის გრაგნილის არასიმეტრიულობა.

ჰიდროგენერატორების ექსპლუატაციის დროს არც ისე იშვიათია სტატორის გრაგნილის ღეროების დაზიანების შემთხვევები, რაც საკმაოდ მძიმე ავარიას წარმოადგენს. სტატორის გრაგნილის ხანგრძლივი და სრულყოფილი (როტორის ამოღებით) რემონტის დროის არარსებობის გამო (სადგურის ან მთელი ენერგოსისტემის მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე), - შეიძლება დაყენდეს დროებითი შესაკრავები, რომლებიც თიშავენ მუშაობიდან დაზიანებულ ღეროებს. ამის შედეგად სტატორის გრაგნილის ერთი ან რამოდენიმე ხვია გამოიყვანება გრაგნილის სქემიდან, რითაც იქმნებოდა ხელოვნური არასიმეტრია სტატორის გრაგნილის ფაზაში, კერძოდ მის პარალელურ შტოებში. ეს ხანმოკლე რემონტი სრულდება სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილების მიდამოში ჰიდროგენერატორის როტორის ამოღების აუცილებლობის გარეშე. ამასთანავე გენერატორი მინიმალური დროის შემდეგ, რომელიც აუცილებელია აღნიშნული ოპერაციის შესასრულებლად, შეიძლება ჩაირთოს მუშაობაში.

გენერატორის ამგვარი ანორმალური რეჟიმის გამოყენება განსაკუთრებულ შემთხვევებში ძალზე ხელსაყრელია ჩვენი ენერგოსისტემის პირობებში. საქართველოს ჰიდროელექტრო-სადგურებისთვის, არსებული ბუნების პირობებიდან გამომდინარე, დამახასიათებელია დამონტაჟებული ჰიდროაგრეგატების შედარებით მცირე რაოდენობა. ხშირ შემთხვევაში ეს ორ ან სამ აგრეგატიანი სადგურებია, ხოლო უკანასკნელ წლებში გაჩნდა ერთ აგრეგატიანი ელექტროსადგურების დაპროექტების ტენდენცია. ასეთ შემთხვევებში რომელიმე ჰიდროგენერატორის დაზიანება და ხანგრძლივ რემონტზე გაჩერება, განსაკუთრებით წყალმომარდნის პერიოდში, გამოიწვევს ელექტროსადგურის გამომუშავების საგრძნობ დაქვეითებას და ხშირ შემთხვევაში წყლის იძულებით დაღვრას.

ამგვარად, საჭირო გახდა გამოკვლეული იქნას ჰიდროგენერატორის მუშაობის რეჟიმი სტატორის გრაგნილის ხელოვნური არასიმეტრიით და ამგვარი რეჟიმის გამოყენების ტექნიკური შესაძლებლობა განსაკუთრებულ შემთხვევებში ელექტროსადგურის მიერ ელექტრული ენერჯის გამომუშავების საიმედოობისა და ეფექტურობის ასამაღლებლად. კერძოდ, გამოკვლეული უნდა იქნას გენერატორის რელეური დაცვის საიმედო მუშაობა ამ ანორმალურ რეჟიმში, მისი დასაშვები ფარგლების დასადგენად.

ამ მიზნის მისაღწევად საჭირო გახდა რიგი ამოცანების და საკითხების გამოკვლევა, რაც დაკავშირებულია გენერატორში მიმდინარე ელექტრომაგნიტურ პროცესებთან, რომელიც გამოწვეულია სტატორის გრაგნილის ფაზაში გაჩენილი არასიმეტრიით. ამ საკითხებს შორის პირველ რიგში განსაზღვრულ იქნა:

ფაზის ერთ-ერთი დაზიანებული შტოს მქონე გრაგნილის ელექტრომამოძრავებელი და მაგნიტომამოძრავებელი ძალები;

არატოლფასოვანი პარალელური შტოების მქონე გრაგნილის ფაზაში გაჩენილი მათანაბრებელი დენები და გენერატორის საერთო არასიმეტრია;

წარმოშობილ არასიმეტრიასთან დაკავშირებული დამატებითი დანაკარგები, მათი გავლენა გენერატორის გახურებაზე;

რელეური დაცვის მუშაობა, დანაყენების მგრძობიარობის დაქვეითების აუცილებლობის განსაზღვრა, მისი მუშაობის საიმედოობის შეფასება და სხვა.

გამოკვლევიდან ჩანს, რომ ჰიდროგენერატორის მუშაობის რეჟიმის გამოყენება (სტატორის გრაგნილში ხელოვნური არასიმეტრიით) განსაკუთრებულ შემთხვევებში შესაძლებელია. მაგრამ ეს განხორციელებადია ყველა მოქმედი ფაქტორების დეტალური გამოკვლევის შემდეგ, რომლებიც თან ახლავს გენერატორის ამგვარ ანორმალურ რეჟიმს. შედეგად შეთავაზებულია ამ რეჟიმზე გადასვლასთან დაკავშირებული მკაფიო პირობები და მის პრაქტიკულ განხორციელებასას შესაძლო შეზღუდვები კონკრეტული ელექტროსადგურის გენერატორისათვის. გარდა ამისა, თითოეულ კონკრეტულ შემთხვევაში შეფასებულ უნდა იქნეს ეკონომიკური ეფექტურობა და ჰიდროგენერატორის ამგვარი რეჟიმის გამოყენების მიზანშეწონილობა. ნაშრომში მოყვანილია ამ რეჟიმზე გადასვლასთან დაკავშირებული ანგარიშები და ღონისძიებები ერთ-ერთ სადგურის ჰიდროგენერატორის მაგალითზე.

Resume

In the previous labour, there is researched ability of hydrogeneratos abnormal regimes using in special cases for improving electical energy generation liability and efficiency.

It`s known, that substations working liability in normal and extreme terms is mainly ensured by the corresponding production technology, the quality of electric equipment, automation and regulation systems exact and adequate working and etc, everything is considered during detail planning. But it possible and must used additionally liability optimizing and maintenance flexibility in extreme and failure terms. First of all, it must be used the additional measures, which does not demands additional financing and gives us economical effect with energetically resources economy and rational consumption, but also witch the growth of electrical energy generation liability.

As a rule, these are electrical equipments special regimes of working, which assists electrical energy generation liability and efficiency in failure situations and also main electrical equipments repairing moments.

In practice of hydro power station maintenance, it is known abnormal regime using. The main purpose is to make increase energy economical efficiency. The best example of this is Saiano-Shushenskaia hydropower station block working in non symmetrical regime, While damaging of phase of block transformer or during repairing processes, the part block's power can be transmitted by other two phase, without turning off of aggregates. In this case, generators and power stations working regimes are characterized with total asymmetry of currents between generators` phases, which produces negative and zero electromagnetic fields. This kind of currents asymmetry (asymmetry between phases) is restricted and defined with "technical maintenance rules".

The other, but resembling abnormal regimes, which we can use in special cases for improving and increasing electrical energy generation quantity. After studying and researching, one of this is hydro generator working regime with stator winding artificial asymmetry, which is researched in previous labour. There is consider generator working after turning off the stator winding parallel branch with damaged coil, which causing asymmetry of phase winding.

During the maintenance of hydro generator, it is not quite rare damage of stator winding stalk, which is quite hard failure to improve. Without so much time for fully repairing stator winding (taking out rotor), the main reason of this is that energetic system has his own working terms. In this case, it's possible to install temporal buckle, which turns off damaged stack. After this, the one of the stator winding coil must turn off from winding scheme, which was producing the artificial asymmetry in stator winding phase. This temporal repairing process is done without

necessity of taking out rotors of hydro generator. Herewith, hydro generator can be turn on, after the time which is necessity for the repairing process.

For our system it's very profitable to use generators abnormal regimes, in special cases. For Georgian hydropower stations is typical little quantity of installed hydro aggregates compared to other countries. The main reason is the peculiarity of nature. In often cases those are hydro stations with two or three aggregates, but in the nearest future there is tendency of planning hydro stations with one aggregate. In this case, after damage one of generators or turning off for repairing process during the flood period, it can provoke decrement of hydropower station generation and in often cases pouring of water.

In that way, it was necessary to research working regime of hydro generator with artificial asymmetry of stator winding and using the possibility of similar cases for increasing the liability and efficiency in special cases. Generator relay protection liable working in this abnormal regime ought to be researched. For achieving this object, it was necessary to research basic issues and problems, which is attached on undergoing processes in generator stator, that is the reason of asymmetry in stator phase winding. Between those problems the first one which was defined is

The electromotive force and the magneto motive force of phase winding branch; Generators common asymmetry and equalizing currents induced in unequal parallel branches of phase winding; Additional loses which are connected to produced asymmetry, and their influence at generators heating; Working of protection relays, estimation of working liability and definition of relay sensitivity decrement necessity.

After research it seems, that in special cases it's possible to use hydro generators working regimes with artificial asymmetry in stator windings. But it is possible after research of acting factors, which are occurring in generator during abnormal regime. There is offered straight terms of transition and the limits of practical implementing for each hydropower station generators. For each case there must be estimated economical efficiency and expediency of using this regime. In the labour there is shown calculations and arrangements for one of the hydro generator.

შინაარსი

რეზიუმე.....	4
შესავალი.....	14
1. საკითხის მდგომარეობა.....	15
1.1. დაზიანებები სტატორის გრაგნილებში და ფაზის პარალელურ განშტოებაში ხელოვნური არასიმეტრიის შექმნა.....	18
1.2. ჰიდროგენერატორების არასიმეტრიული რეჟიმების გამოკვლევების ისტორიიდან.....	28
1.3. ჰიდროგენერატორების გამოყენება ხანგრძლივ არასიმეტრიულ რეჟიმში.....	30
2. სტატორის გრაგნილის რემონტის მოცულობისა და დროის ხანგრძლიობის შედარება მისი დაზიანების შემთხვევაში.....	33
2.1. რემონტი ზღუდარის დადებით, როგორც დროებითი ღონისძიება.....	33
2.2. გენერატორის სტატორის დაზიანებული გრაგნილის რემონტის მოცულობა (როტორის ამოღებით).....	36
3. რელეური დაცვის მუშაობა ჰიდროგენერატორის სტატორის გრაგნილში ხელოვნური არასიმეტრიის რეჟიმში.....	38
3.1. გენერატორის რელეური დაცვის ზოგადი საკითხები.....	38
3.2. ზოგადი მოთხოვნები გენერატორების დაცვების მიმართ.....	43
3.3. გენერატორის დაცვები.....	45
3.3.1. სტატორის გრაგნილში ფაზათაშორის მოკლედ შერთვისაგან დაცვა.....	45
3.3.2. სტატორის გრაგნილის კორპუსთან დამიწებისაგან დაცვა.....	49
3.3.3. გენერატორის გარე ქსელში მოკლედ შერთვის დენისაგან და გადატვირთვისაგან დაცვა დანიშნულება და დაცვის სახეობები.....	50
3.3.4. სიმეტრიული გადატვირთვებისაგან დენური დაცვა.....	51
3.3.5. უკუმიმდევრობის დენისაგან დაცვა.....	52
3.3.6. ჰიდროგენერატორების ძაბვის აწევისაგან დაცვა.....	53
3.4. გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა.....	55
3.5. თანამედროვე ციფრული SEL-300G გენერატორის რელე.....	63
3.5.1. SEL-300G გენერატორის რელეს ძირითადი სპეციფიკაციები.....	70
4. გამათანაბრებელი დენების გაანგარიშება.....	71
4.1. ჰიდროგენერატორის ელექტრომაგნიტური პროცესის განხილვა.....	79
4.2. საანგარიშო სქემის პარამეტრები.....	84
5. ხელოვნური არასიმეტრიის ანალიზი ხრამჰეს-II-ის გენერატორის სტატორის გრაგნილის მაგალითზე.....	87
5.1. ხრამჰეს-II-ის გენერატორის სტატორის გრაგნილის განშტოების პარამეტრების ანგარიში.....	87

5.2. დაზიანებულ ფაზაში გამათანაბრებელი დენის განსაზღვრა.....	91
5.3. ხრამ ჰეს -II გენერატორის სტატორის დენი დატვირთვის რეჟიმში.....	96
დასკვნა	96
გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა.....	101

სურათების ნუსხა

სურ. 1. ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის საერთო ხედი.	17
სურ. 2. ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის სტატორის აქტიური ნაწილისა და სტატორის გრაგნილის ღეროების ხედი.	19
სურ. 3. ნაჩვენებია დაზიანებული სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილი.	20
სურ. 4. ნაჩვენებია სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოებები.	24
სურ. 5. ნაჩვენებია ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის სტატორის გრაგნილის შუბლურ ნაწილი.	35
სურ. 6. ნაჩვენებია როტორის ამოღება—ჩადების პროცესი.	36
სურ. 7. ნაჩვენებია გენერატორის ველის ავტომატური ქრობის სქემა.	44
სურ. 8. ნაჩვენებია გენერატორის გრძივი დიფერენციალური დაცვის სქემა და მოქმედების პრინციპი. ა) დენების განაწილება გარე მოკლედ შერთვის დროს. ბ) დენების განაწილება ზონაში მოკლედ შერთვის დროს.	46
სურ. 9. ნაჩვენებია გრძივი დიფერენციალური დაცვის მუშაობა ორი ფაზის მიწასთან დამოკლების შემთხვევაში.	48
სურ. 10. ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის ძაბვის აწევისაგან დაცვა.	54
სურ. 11. ნაჩვენებია გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა ერთსისტემიანი დაცვის სქემა.	57
სურ. 12. ნაჩვენებია SEL-300G გენერატორის რელე.	63
სურ. 13. ნაჩვენებია SEL-300G შეერთების სქემა.	65
სურ. 14. ნაჩვენებია SEL-300G დაცვის სქემა რომელიც განუწყვეტლივ ზომავს ფაზა-მიწა წინააღობას SEL-2664 - ის მეშვეობით.	66
სურ. 15. ნაჩვენებია ფაზის დაკარგვისგან დაცვა რომელიც წინასწარ აღმოფხვრავს როტორის გადახურებას და სისტემის არასტაბილურ მუშაობას, გამოწვევებული ძალიან დაბალი ალზნებით.	67
სურ. 16. ნაჩვენებია არანორმალური(აბნორმალური) ოპერაციისას დაცვა რომელიც ზომავს და იწერს ნომინალური სიხშირისგან განსხვავებულ სიხშირის სიდიდეს.	69
სურ. 17. ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის სტატორის ფაზის გრაგნილის ე.მ.კ-ები.	73
სურ. 18. ნაჩვენებია ღრმულეებში სხვადასხვა ფაზისღეროების განაწილება. .	75
სურ. 19. ნაჩვენებია ჰიდროგენერატორის ტალღურიგრაგნილი.	76
სურ. 20. ნაჩვენებია სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოებები.	97

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1-ში მოყვანილია ექსპლუატაციაში მყოფი სხვადასხვა ტიპის ჰიდროგენერატორების სტატორის გრაგნელების ზოგიერთი ელექტრული და კონსტრუქციული პარამეტრი. ასევე ნაჩვენებია გრაგნილის ფაზის პარალელური შტოების რაოდენობა. 23

მადლიერება

მადლობას ვუხდით ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფესორ იაკირ ბიჯამოვს, დისერტაციაზე მუშაობის პერიოდში გაწეული სამეცნიერო და პედაგოგიური შრომისათვის.

შესავალი

ელექტროსადგურების მუშაობის საიმედოობა ნორმალურ და ექსტრემალურ პირობებში უზრუნველყოფილია ძირითადად ელექტროენერჯის წარმოების შესაბამისი ტექნოლოგიით, ნაგებობებისა და ელექტრომოწყობილობების ხარისხით, მართვისა და რეგულირების სისტემების გამართული მუშაობით და სხვა პირობებით, რის გათვალისწინებაც ხდება პროექტირების ეტაპზე [1-4]. მაგრამ შესაძლებელია და უნდა გამოიყენებოდეს საიმედოობის ზრდის და საექსპლუატაციო მოქნილობის დამატებითი ზომები, განსაკუთრებულად ის დამატებითი ზომები, რომლებიც არ მოითხოვენ დამატებით დაფინანსებას.

როგორც წესი, ეს არის მოწყობილობის მუშაობის სპეციალური რეჟიმები [5,6], რომლებიც ხელს უწყობენ ელექტროენერჯის წარმოების საიმედოობასა და ეფექტურობას ავარიული სიტუაციების დადგომის დროს, ასევე ძირითადი ელექტრომოწყობილობის რემონტის და მასთან დაკავშირებული ელექტროსადგურის სიმძლავრის შემცირების პერიოდში.

ჰიდროელექტროსადგურების ექსპლუატაციის პრაქტიკაში ცნობილია ანორმალური რეჟიმების გამოყენება სადგურის მუშაობის ენერგოეკონომიკური ეფექტურობის ამაღლების მიზნით. შეიძლება მოვიყვანოთ საიანო-შუმენსკაიას ჰიდროელექტროსადგურის ბლოკის არასიმეტრიულ რეჟიმში მუშაობის წარმატებული მაგალითი [7,8], როდესაც ბლოკის სატრანსფორმატორო ფაზის დაზიანებისას ან გეგმიური რემონტის დროს ბლოკის სიმძლავრის ნაწილი შეიძლება იყოს გადაცემული ორი ფაზით.

შეიძლება მოიძებნოს სხვა ამგვარი ანორმალური რეჟიმები, რომელთა გამოყენება შეიძლება განსაკუთრებულ სიტუაციაში ელექტროენერჯის გამომუშავების ამაღლების მიზნით. ერთ-ერთი მათგანი, შესაბამისი შესწავლის და გამოკვლევის შემდეგ, შეიძლება იყოს ჰიდროგენერატორის მუშაობის

რეჟიმი სტატორის გრაგნილის ხელოვნური არასიმეტრიით. იგულისხმება გენერატორის მუშაობა გრაგნილის ფაზის პარალელურ შტოებში დაზიანებული ხვიის სქემიდან გამორთვით გამოწვეული არასიმეტრია.

ვინაიდან საუბარი ეხება უჩვეულო რეჟიმებს, ყურადღება უნდა გამახვილებულ იქნეს ელექტროსადგურზე ხანგრძლივი არასიმეტრიული რეჟიმების გამოყენების შესაძლო ვარიანტებზე, მათ მიზანშეწონილობაზე და განხორციელების შესაძლებლობის ტექნიკურ და მეცნიერულ დასაბუთებაზე.

1. საკითხის მდგომარეობა

საქართველოს ენერგოსისტემაში გასულ წლებში არსებული ექსპლუატაციის პირობები ხასიათდებოდა სადგურების ძირითადი ელექტრომოწყობილობის მუშაობის მძიმე რეჟიმებით, რომლებიც ხშირ შემთხვევაში ცდებოდა ყველა დასაშვებ ზღვარს. განსაკუთრებით აღსანიშნავია გასული ასწლეულის ოთხმოცდაათიანი წლები, რომლებიც გამოირჩევა იმ პერიოდში ქვეყანაში არსებული ენერგეტიკული კრიზისით. მოწყობილობების ამგვარი ანორმალური რეჟიმები გვაყენებდნენ ისეთი ამოცანების წინაშე, რომლებზეც მზა პასუხები ყოველთვის არ მოიძებნებოდა, რაც მოითხოვდა ამოცანების სწრაფ, ღრმა და მრავალმხრივ მეცნიერულ გამოკვლევას, მუშაობის, უპირველეს ყოვლისა, ელექტროსადგურების გენერატორებისა და მთლიანად ენერგოსისტემის, სანდოობასა და შენარჩუნებაზე მათი შესაძლო ნეგატიური გავლენის განსაზღვრის მიზნით.

ექსპლუატაციისთვის მზა გადაწყვეტილებების არარსებობა ამ შემთხვევებში აიხსნება იმით, რომ ელექტრომოწყობილობების მუშაობის ამგვარ რეჟიმებს არ უნდა ჰქონოდათ ადგილი, ვინაიდან ისინი არ არიან

გათვალისწინებულნი ან აკრძალულნი ექსპლუატაციის არსებული ნორმებით [9]. მაგრამ, როგორც ცნობილია, გასულ წლებში ობიექტური და სუბიექტური მიზეზების გამო ასეთი რეჟიმები ატარებდნენ სისტემატიურ ხასიათს, ხოლო ნეგატიურმა შედეგებმა დატოვეს მძიმე კვალი მრავალი წლის განმავლობაში და შესაძლოა იჩინონ თავი ჩვენ დროშიც.

უპირველეს ყოვლისა, ამგვარ რეჟიმებს მიეკუთვნება ენერგოსისტემის ელექტრომოწყობილობის დენის დაუშვებლად დაბალ სიხშირეზე ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მუშაობა. იყო შემთხვევები, როდესაც დენის სიხშირე იკლებდა 45 ჰერცზე დაბლა. არსებობდა მცდარი აზრი, რომ ეს ნეგატიურად აისახებოდა მხოლოდ ელექტროენერჯის მომხმარებლებზე. ხელმძღვანელობის მხრიდან ადგილი ჰქონდა ელექტროენერგოსისტემის 45 ჰერციან სიხშირეზე მუშაობის ოფიციალურად დაშვების მცდელობას.

საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის (სეჰნსკი, ГрызНИИЭГС) მიერ ჩატარებულმა გამოკვლევამ გვიჩვენა, რომ ზემოთ მითითებულ რეჟიმებში მუშაობისას განსაკუთრებულად მძიმე პირობებში იმყოფებიან სისტემის გენერატორები, რომლებიც ღებულობენ აქტიური მასალების მნიშვნელოვან ელექტრომაგნიტურ და სითბურ გადატვირთვებს [10,11]. თეორიულად დამუშავებული მასალების შედეგები დადასტურებულ იქნა ექსპერიმენტალური გამოკვლევებით ხრამ ჰესი-1-ის გენერატორებზე, სადაც დამაჯერებლად იყო ნაჩვენები ელექტროსადგურების ძირითად ელექტრომოწყობილობებზე ასეთი ანორმალური რეჟიმების დამანგრეველი ზემოქმედება, ასევე დასაბუთებულ იქნა დაუყონებლივი ტექნიკური და ადმინისტრაციული ზომების მიღების აუცილებლობა ქსელში დენის სიხშირის დასაშვებ ფარგლებში შენარჩუნებასთან დაკავშირებით. ეს დადებითად აისახა ისეთი ძვირადღირებული და რთულად აღსადგენი

ელექტრომოწყობილობის შენარჩუნებაზე, როგორცაა ელექტრო-სადგურების ჰიდროგენერატორები.

ამასთან ერთად უნდა ავლნიშნოთ, რომ მათი ძირითადი ნაწილი ხანგრძლივი დროის განმავლობაში იმყოფებოდა ექსპლუატაციის მძიმე პირობებში და უმეტეს შემთხვევაში მუშაობის ვადა ამოეწურათ.



სურ. 1. ჰიდროგენერატორის საერთო ხედი.

სურათ 1-ზე მოცემულია ჰიდროგენერატორის საერთო ხედი, სადაც ნაჩვენებია მისი კონსტრუქციული და აქტიური ნაწილები (მათ შორის სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილები)

ელექტროსადგურების ძირითადი ელექტრომოწყობილობების ანორმალური რეჟიმების მუშაობის კიდევ ერთ მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ სტატორის გრაგნილში გათიშული დაზიანებული ხვიის მქონე გენერატორის მუშაობა.

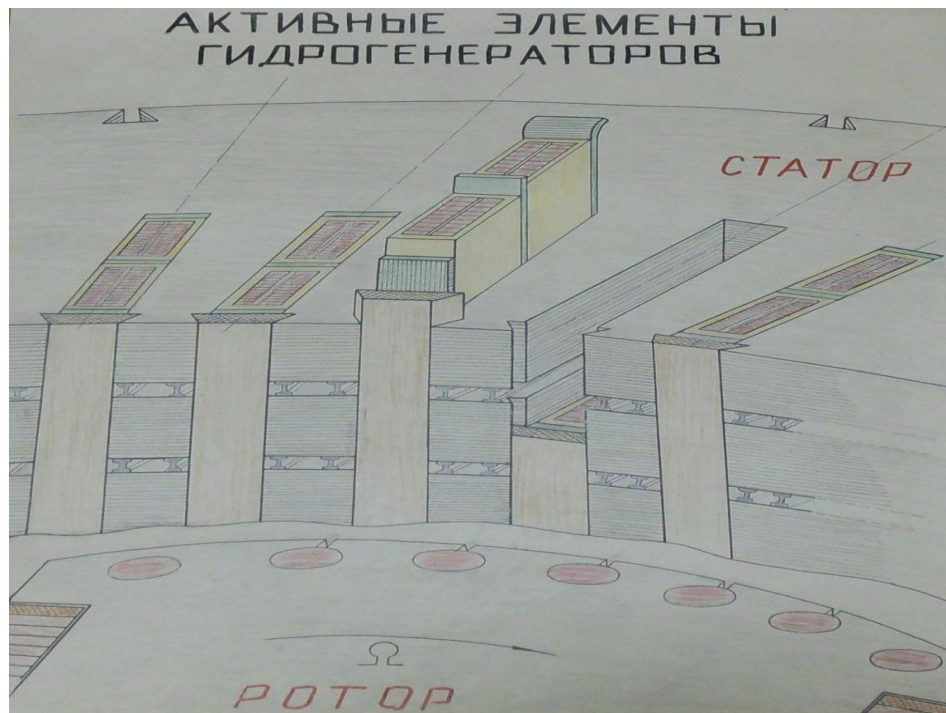
ექსპლუატაციაში ასეთი პრაქტიკის არსებობამ გამოიწვია გენერატორის სტატორის გრაგნილის ფაზის პარალელულ შტოში დაზიანებული ხვიის გათიშვის მისი მუშაობის რეჟიმზე გავლენის გამოკვლევის ჩატარება. როგორც ცნობილია, ჰიდროგენერატორების ექსპლუატაციის დროს არც ისე იშვიათია სტატორის გრაგნილის ღეროს დაზიანების შემთხვევები. გრაგნილის ხანგრძლივი და სრულყოფილი რემონტის დროის არარსებობის გამო (სადგურის ან მთელი ენერგოსისტემის მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე), - ყენდებოდა დროებითი შესაკრავები(ზღუდარე), რომლებიც თიშავდნენ მუშაობიდან დაზიანებულ ღეროებს. ამის შედეგად სტატორის გრაგნილის ერთი ან რამოდენიმე ხვია გამოიყვანებოდა გრაგნილის სქემიდან, რითაც იქმნებოდა ხელოვნური ასიმეტრია სტატორის გრაგნილის ფაზებში, მათ შორის მის პარალელულ შტოებში.

1.1. დაზიანებები სტატორის გრაგნილებში და ფაზის პარალელურ განშტოებაში ხელოვნური არასიმეტრიი სშექმნა

ტექნიკური ექსპლუატაციის წესებით [9] არ არის გათვალისწინებული იმ გენერატორის ხანგრძლივი მუშაობა, რომელსაც გაუჩნდა სტატორის გრაგნილის ასიმეტრია, ამიტომ ასეთი გამოკვლევების შედეგები არ მოიპოვება არც ტექნიკურ ლიტერატურაში. მაგრამ არსებული სირთულეების გამო, რომლებიც დაკავშირებულია ენერგოსისტემის ენერგეტიკულ კრიზისთან, ყოველთვის არ ხერხდებოდა გაუმართავი (გათიშული) ხვიის დროული შეცვლა და ზოგიერთი ჰიდროგენერატორები ხანგრძლივი დროის

განმავლობაში მუშაობდნენ ანორმალურ რეჟიმში სტატორის გრაგნილის ფაზის პარალელულ შტოებში ასიმეტრიის თანხლებით.

სურათ 2-ზე მოცემულია სტატორის აქტიური ნაწილის პირობითი სურათი (სურათი აღებულია იაკირ ბიჯამოვის პლაკატებიდან). ნახაზზე ნაჩვენებია სტატორის ღრმულების ხედი, ამ ღრმულებში ნაჩვენებია სტატორის გრაგნილის ღეროები, ეს ღეროები შეიძლება თითოეულ ღრმულში იყოს ან სხვადასხვა ფაზების ან ერთიდაიგივე ფაზის ღეროები. ამ ერთიდაიგივე ფაზის ღეროებში შეიძლება იყოს ერთიდაიგივე შტოს ღეროები, ზემო აღნიშნული დაზიანებები შეიძლება იყოს როგორც ზედა ღერში ასევე ქვედა ღეროში(იგულისხმება ღრმულის ფსკერი), ორივე ღერო დამაგრებულია სოლებით. ნებისმიერი ღეროს, მითუმეტეს ქვედა ღეროების გამოცვლისათვის საჭიროა როტორის ამოღება. ამგვარად როტორის ამოღების გარეშე, როგორც იყო აღნიშნული ამ ხვიის სქემიდან ამოღება „ზღუდარის დადებით“ როტორის ამოღება არ დაგვჭირდება.



სურ. 2. ჰიდროგენერატორის სტატორის აქტიური ნაწილისა და სტატორის გრაგნილის ღეროების ხედი.

ამ მდგომარეობამ ისეთი ფართო გავრცელება მიიღო, რომ ზოგიერთი გენერატორი დიდი დროის განმავლობაში მუშაობდა სტატორის ორი ან ორზე მეტი გათიშული ხვით. ამასთანავე გახშირდა ავარიები და სხვა დაზიანებები, მაგალითად, სასაკისრე დენები, რომელთა გაჩენის მიზეზის დადგენა არ იყო ყოველთვის ერთმნიშვნელოვანი, რასაც ხელს უწყობდა ის გარემოება, რომ არ არსებობდა საკმარისი ინფორმაცია გენერატორის ტექნიკურ მდგომარეობასა და მუშაობის სანდოობაზე ასეთი რეჟიმის მავნე ზემოქმედების შესახებ.

ხშირ შემთხვევაში, ბოლოს მოხსენიებული ფაქტი მწვავდებოდა ხანგრძლივი და მძიმე ექსპლუატაციის პროცესის შედეგად მწყობრიდან გამოსული სტატორის აქტიური ნაწილების გამართული თერმოკონტროლის არარსებობით.

სურათ 3-ზე ნაჩვენებია დაზიანებული სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილი.



სურ. 3. დაზიანებული სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილი.

ამასთან დაკავშირებით აუცილებელი გახდა მუშაობის აღნიშნული რეჟიმის დეტალური გამოკვლევა, რათა მოხდეს გენერატორისა და მთლიანად სადგურის ენერგეტიკულ და სანდომიან მუშაობაზე მისი ნეგატიური ზეგავლენის რეალური შეფასება.

ყოველივე ზემოთ ნათქვამმა ხელი შეუწყო დროული ზომების მიღებას, რომლებმაც შეამცირეს ამგვარი ანორმალური რეჟიმების პირობებში ჰიდროგენერატორების ექსპლუატაციის იძულებული შემთხვევებით გამოწვეული შესაძლო ზარალის მიყენების ფაქტები.

გამოკვლევის პროცესში განხილულ უნდა იქნეს რამოდენიმე საკითხი, რომელიც დაკავშირებულია ჰიდროგენერატორის აქტიურ ნაწილებში არსებულ ელექტრომაგნიტურ პროცესებზე სტატორის გრაგნილის ფაზის პარალელური განშტოების ასიმეტრიის გავლენასთან. მაგალითად, ფაზების ორი პარალელური განშტოების მქონე გრაგნილებისთვის უნდა განსაზღვრულ იქნეს შემდეგი:

- ფაზის ერთ-ერთი დაზიანებული განშტოების მქონე გრაგნილის ელექტრომაგნიტური და მაგნიტომომდრავებელი ძალები;
- არატოლფასოვანი პარალელური განშტოებების მქონე გრაგნილის ფაზაში არსებული მათანაბრებელი დენები;
- გენერატორის საერთო ასიმეტრია;
- გათიშული და შემოკლებული ხვიის მქონე სტატორის უბანში არსებული არაკომპენსირებული მაგნიტური ნაკადი;
- აღნიშნული ნაკადის ზეგავლენა დანაკარგებზე სტატორის ფოლადსა და პოლუსის ბუნიკში;

- პულსირებადი ელექტრომაგნიტური მომენტი;
- როტორის ლილვის ძაბვა და სასაკისრე დენების წარმოქმნის საშუალება;
- წარმოშობილ არასიმეტრიასთან დაკავშირებული დამატებითი დანაკარგები, მათი გავლენა გახურებაზე და გენერატორის მქკ-ზე;
- სარელეო დაცვის მუშაობა, დანაყენების მგრძობიარობის დაქვეითების აუცილებლობის განსაზღვრა, მისი მუშაობის საიმედოობის შეფასება და სხვა.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნული მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია კონკრეტულ პირობებზე: გრაგნილის დაზიანებული ღეროების რიცხვსა და განლაგების ადგილზე, ხვიების რიცხვსა და სტატორის გრაგნილის ტიპზე, ფაზის პარალელური განშტოებების რაოდენობაზე, ჰიდროგენერატორების კონსტრუქციულ და რიგ სხვა პარამეტრებზე.

ყველა აღნიშნული პარამეტრი შეიძლება იცვლებოდეს ფართო დიაპაზონში. ასე მაგალითად, სტატორის გრაგნილის ფაზის პარალელური შტოების რაოდენობა რეალურ ჰიდროგენერატორებში შეიძლება აღწევდეს ექვსს.

ცხრილი 1-ში მოყვანილია ექსპლუატაციაში მყოფი სხვადასხვა ტიპის ჰიდროგენერატორების სტატორის გრაგნილების ზოგიერთი ელექტრული და კონსტრუქციული პარამეტრი.

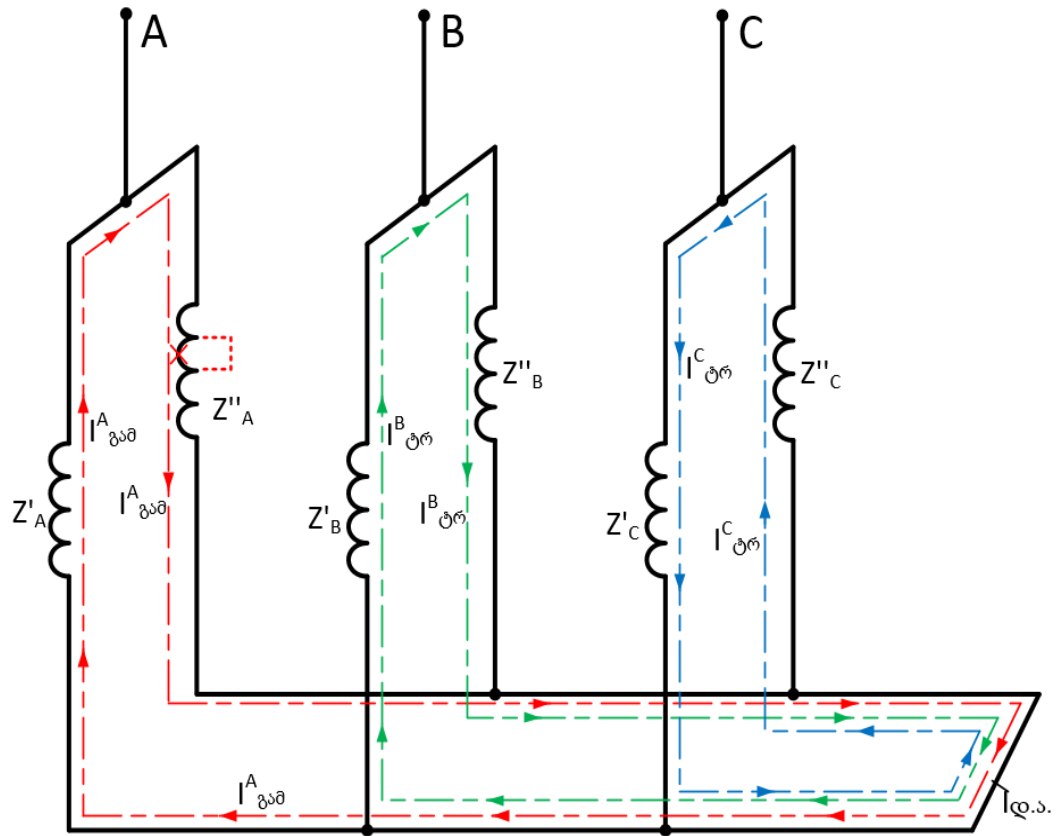
მათ შორის ერთ-ერთ სვეტში ნაჩვენებია გრაგნილის ფაზის პარალელური შტოების რაოდენობა.

№ n/n	ჰიდრო- გენერატორის ტიპი	S_n MVA	P_n MW	U_n kV	I_n A	დრმუ- ლების რაოდ..	პარა- ლელური შტოები	ხაზური დატვირ, A/sm
1	CBΦ1500 /130-88	160	128	13,8	6 585	726	1	1 085
2	CB 430 /210-14	68,75	55	10,5	3 790	180	2	620
3	ВГСΦ940 /235-30	353	300	15,75	12 956	540	3	880
4	ВГДС1025 /245-40	236	200	15,75	8 650	540	4	795
5	ВГСΦ 930 /233-30	294	250	15,75	10 800	540	5	883
6	CB 1250 /170-96	68,75	55	13,8	2 870	702	6	545

**ცხრილი 1. ჰიდროგენერატორების სტატორის გრაგნელების
ზოგიერთი ელექტრული და კონსტრუქციული პარამეტრები**

როგორც ცხრილიდან ჩანს, პარალელური შტოების რაოდენობა ექსპლუატაციაში მყოფ ჰიდროგენერატორებში შეიძლება იყოს სხვადასხვა, - ერთიდან ექვსის ჩათვლით. ცხრილში მაგალითისთვის მოყვანილია აღნიშნული ტიპის ჰიდროგენერატორების თითო ექვემპლარი. რეალურად სტატორის გრაგნელები ფაზის ორი პარალელური შტოთი ბევრად მეტია სხვა ტიპის გრაგნილებთან შედარებით. აღსანიშნავია რომ მეორე სტრიქონში მოყვანილია ხრამჰეს-2-ის ჰიდროგენერატორის მონაცემები.

სურათ 4-ზე მოცემულია სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოებების პირობითი სქემა.



სურ. 4. სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოებები.

როგორც გამოკვლევამ გვიჩვენა, ერთ-ერთ ყველაზე არსებულ და მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს სტატორის გრაგნილის ფაზაში ერთი პარალელური განშტოების გადატვირთვის ხელისშემწყობი მათანაბრებელი დენების წარმოქმნა. (მათანაბრებელი დენების წარმოქმნა ემორჩილება ელექტროტექნიკის თეორიული საფუძვლების კანონებს [13]). ეს უკანასკნელი არ შეიძლება არ აისახოს ჰიდროგენერატორის აქტიური ნაწილების გახურებაზე, რელეური დაცვის მუშაობის საიმედოობასა და სხვა ზემოთ მოყვანილ ფაქტორებზე.

საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის მიერ ჩატარებულმა წინასწარმა გამოკვლევებმა ცხადყო [10], რომ განხილვად რეჟიმში სტატორის გრაგნილში ხელოვნური ასიმეტრიის მქონე გენერატორის მუშაობა იწვევს დაზიანებული ფაზის ერთ-ერთი პარალელური განშტოების დაუშვებელ ელექტრულ და სითბურ გადატვირთვებს. გამოკვლევის შედეგები დადასტურდა ხრამ ჰესი-2-ის Γ-2 ტიპის გენერატორზე ჩატარებული ექსპერიმენტებით, რობლებმაც დაგვიდასტურა, რომ ერთი გათიშული ხვიის პირობებშიც კი მოცემული ტიპის გენერატორის სტატორის გრაგნილის ფაზის ერთ-ერთ პარალელურ განშტოებაში გამავალმა დენმა შეიძლება 20%-ით გადააჭარბოს ნომინალურს, რაც იწვევს დანაკარგების ზრდასა და, შესაბამისად, გრაგნილის 40%-ზე ზემოდ გახურებას. ზუსტად ეს გახლდათ ხშირი და მძიმე ავარიების მიზეზი, განვითარებული გენერატორის აქტიური ნაწილების თერმოკონტროლის არარსებობის ფონზე, რომლებიც დაკავშირებული იყო სტატორის გრაგნილის ღეროების დაზიანებასთან. აღსანიშნავია, რომ შემდგომში აუცილებელი გახდა ხრამ ჰესი-2-ის გ-2 ტიპის გენერატორის სტატორის მთლიანი შეცვლა.

ჩატარებული გამოკვლევების შედეგებმა გვიჩვენა, რომ სტატორის გრაგნილში ხელოვნური ასიმეტრიის მქონე გენერატორის მუშაობის აღნიშნული რეჟიმით დაუსაბუთებელმა და უკონტროლო გამოყენებამ შესაძლოა უარყოფითი გავლენა იქონიოს როგორც გენერატორისა და ელექტროსადგურის ტექნიკურ მდგომარეობასა და მუშაობის საიმედოობაზე, ასევე ენერგოსისტემაზე მთლიანობაში.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულმა მოგვცა საშუალება ყოფილი (საქენერგო-ს, Грузглавэнерго) ხელმძღვანელობის მხარდაჭერითა და ხელისშეწყობით შეგვეწყვიტა იმ ეტაპისთვის ამგვარი პრაქტიკა და რეკომენდებული იყო პირველივე საშუალებისას შესრულებულიყო

გათიშული დაზიანებული ხვიებით მომუშავე სტატორების გრაგნილების სრულყოფილი რემონტების განხორციელება. აქვე არ შეიძლება არ აღინიშნოს მთავარი ინჟინრის, გ. მაყაშვილის, და მთავარი სპეციალისტის, რ. წაწკრიალაშვილის, დამსახურება, რომლებმაც სწორად შეაფასეს სიტუაცია საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის მიერ ჩატარებული გამოკვლევების შედეგებთან გაცნობის შემდეგ.

საფუძვლიანი რემონტის ჩატარების შესაძლებლობის დადგომამდე ჰიდროგენერატორის მუშაობის ამგვარი რეჟიმით იძულებითი გამოყენებისას ნეგატიური შედეგების შემცირების მიზნით შეთავაზებულ იქნა ჰიდროგენერატორის მიერ გამოყოფილ სიმძლავრეზე გარკვეული შეზღუდვების დაწესება [9].

შემდგომში საჭირო გახდა სტატორის გრაგნილში ასიმეტრიის მქონე გენერატორებში წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური პროცესების უფრო დეტალური და მრავალმხრივი შესწავლა, როდესაც უნდა გაგვეთვალისწინებინა ყველა შესაძლო ფაქტორი, რომელიც თან ახლავს ამგვარი ტიპის ანორმალურ რეჟიმებს; ასევე უნდა დაგვედგინა და შეგვეფასებინა როგორც ნეგატიური, ასევე პოზიტიური მხარეები. როგორც აღმოჩნდა, გასულ წლებში არსებული კრიზისის პერიოდში საკითხის შეუსწავლელობის გამო მთლიანად იგნორირებულ იქნა შესაძლო ნეგატიური მხარეები. უპირატესობა მთლიანად მიენიჭა იმ მომენტისთვის დადებითად შეფასებულ გადაწყვეტილებას - სიტუაციიდან თავის დაღწევის ფაქტორს.

რთულ ფინანსურ და ტექნიკურ-ეკონომიკურ პირობებში, როდესაც არ არსებობს ფართომასშტაბიანი ხანგრძლივი და ძვირადღირებული რემონტის ჩატარების საშუალება, რომელიც დაკავშირებულია სტატორის გრაგნილის რემონტთან და როტორის ამოღებასთან, შექმნილი სიტუაციიდან ამგვარი გამოსავლის პოვნა საკმაოდ მიმზიდველად გამოიყურება. მითუმეტეს, თუ არ

არსებობს საკმარისი და ზუსტი მონაცემები მის ნეგატიურ მხარეებზე, ხოლო სახეზეა აშკარა დაინტერესება მოკლევადიან რემონტში, რომელიც დაკავშირებულია გრაგნილების სქემიდან დაზიანებული ხვიის გათიშვასთან, რაც სრულდება სტატორის გრაგნილების შუბლური ნაწილების მიდამოში ჰიდროგენერატორის როტორის ამოღების აუცილებლობის გარეშე. ამასთანავე გენერატორი მინიმალური დროის შემდეგ, რომელიც აუცილებელია აღნიშნული ოპერაციის შესასრულებლად, შეიძლება ჩაირთოს მუშაობაში. ეს, რა თქმა უნდა, დადებითად აისახება ელექტროენერჯის გამომუშავების საიმედოობაზე. გარდა ამისა რემონტის ვადების მნიშვნელოვანი შემცირება იწვევს წყლის არამწარმოებლურ ჩადვრას. ეს ყოველივე იძლევა თვალსაჩინო ეკონომიკურ ეფექტს.

აუცილებელია იმ გარემოების გათვალისწინება, რომ ჰიდრო-ელექტროსადგურიდან ელექტროენერჯის ბოლომდე არდაშვება ხშირ შემთხვევაში შევსებულ უნდა იქნეს თბოელექტროსადგურის მიერ, რასაც ასევე ემატება ფინანსური და ეკოლოგიური ეფექტურობა. ამასთან ერთად შეგახსენებთ, რომ ყოველივე აღნიშნულს აქვს ადგილი იმ შემთხვევაში, თუ შესწავლილია, გათვალისწინებულია და თავიდან აცილებულია ნეგატიური ფაქტორები, რომლებიც თან ახლავს სტატორის გრაგნილში ასიმეტრიის მქონე გენერატორის მუშაობის ზემოთ აღნიშნულ ანორმალურ რეჟიმს.

აღსანიშნავია, რომ ელექტროენერჯის გამომუშავების საიმედოობის გაზრდის მიზნით ექსპლუატაციის პრაქტიკაში ანორმალური არასიმეტრიული რეჟიმების გამოყენების ფაქტი არ წარმოადგენს სიახლეს.

ამ მიმართულებით მუშაობა დაწყებულია დიდი ხნის წინ და დაკავშირებულია მეცნიერთა წრის ისეთ თვალსაჩინო წარმომადგენლებთან, როგორცაა ი. ა. სირომიატნიკოვი, გ. ნ. ტერ-გაზარიანი, ი. ბ. დანილევჩი და სხვა [7,8,9]. მათი ნამუშევრები ეხება რთული საკითხების გამოკვლევას, რომლებიც გამომდინარეობენ ჰიდროგენერატორების მუშაობის

თავისებურებებიდან სტატორის დენების ასიმეტრიულობისა და არასინუსოიდალობისას. ამასთანავე განიხილება ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც განსაზღვრავენ ამგვარ რეჟიმებში დიდი სიმძლავრის ჰიდროგენერატორების მუშაობას. მათ, უპირველეს ყოვლისა მიეკუთვნებათ როტორის პოლუსებში დამატებითი დანაკარგები, მათი გახურება, ასევე გენერატორზე არასინქრონული მაგნიტური ველების მექანიკური ზემოქმედება.

ექსპლუატაციის პრაქტიკაში ანორმალური რეჟიმების რეალიზაციის შესაძლებლობის განსაზღვრის შემთხვევაში განიხილება სადგურისა და კვანძის ელექტრომომწყობილობის სარელო დაცვის მუშაობა, ასევე ამ რეჟიმის გავლენა საკვანძო ხაზებზე [14,15,16].

1.2. ჰიდროგენერატორების არასიმეტრიული რეჟიმების გამოკვლევების განვითარების ისტორიიდან

1957 წლიდან საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის მიერ დაწყებულ იქნა ენერგოსისტემებში რთული ასიმეტრიების გამოკვლევები, რის შედეგადაც განვითარებულ და დასაბუთებელ იქნა რთული ასიმეტრიული რეჟიმების თეორიები. ზედდების პრინციპის სხვადასხვა ხერხების გამოყენებისა და ახალი წარმოდგენების ჩართვის საფუძველზე, ასევე თანმიმდევრული განზოგადოებების გზით მიღებულ იქნა რთული ასიმეტრიების ნებისმიერი კომბინაციების გამოკვლევის ერთიანი მიდგომები. ამ ყოველივემ მოიპოვა პრაქტიკული გამოყენება და განვითარება ელექტრულ ქსელებში დაზიანების

ადგილის განსაზღვრის [17–18 და სხვა] და ელექტროსადგურებზე ძირითადი ელექტრომოწყობილობების მუშაობაზე ასიმეტრიული რეჟიმების ზეგავლენის გამოკვლევის მეთოდულ კაში [10–11 და სხვა].

ინსტიტუტში შეიქმნა ექსპერიმენტალური დანადგარი, საზომი აპარატურა და გამომუშავდა გამოკვლევის მეთოდულ კა, რომელიც ხელს უწყობს გენერატორის მუშაობის ასიმეტრიული რეჟიმების თანმხლები მოვლენების ობიექტურ დაფიქსირებას. საბჭოთა კავშირის დაშლამდე განყოფილების მიერ ჩატარებული მუშაობის საფუძველზე ინსტიტუტი წარმოადგენდა წამყვან მეცნიერულ ორგანიზაციას ასიმეტრიულ რეჟიმებში მსხვილი ჰესების გენერატორების გამოკვლევის სფეროში. გამოქვეყნებული ჩატარებულ იქნა ჰიდროგენერატორების თითოეულ სათავო ნიმუშზე.

გამოკვლევულ ნიმუშებთან რიცხვში შედის ვოლგის, ბრატსკის, კრასნოიარსკის, ჩირკეის, უსტ-ილიმსკის, საიანო-შუმენსკისა და ინგურის ჰესების ჰიდროგენერატორები. ნატურულ ექსპერიმენტებში გამოკვლევულ იქნა უკუმიმდევრობის დენების ველით გამოწვეული პოლუსების თბური ველი, ასევე სიმეტრიული და ასიმეტრიული დატვირთვებისას კონსტრუქციის ელემენტების ვიბრაციები და სხვა მოვლენები, რომლებიც თან ახლავს უკუმიმდევრობის დენების ველის წარმოქმნას.

მოდელზე ჩატარებულმა მრავალწლიანმა გამოკვლევებმა და ნატურული ექსპერიმენტების მონაცემებთან შედეგების მრავალჯერადმა შეჯერებამ მოგვცა სტატორის სივრცითი და დროითი ჰარმონიკული მაგნიტომამოძრავებელი ძალების მიერ მაგნიტური პოლუსების და პოლუსების ბუნიკების გადაკვეთისას წარმოქმნილი მაგნიტური ველების ნამდვილი სურათის აღდგენის საშუალება. დადგენილ იქნა დანაკარგების გამოყოფის პროცესებისა და კბილანა ზონის გეომეტრიის, მუდმივი ნიშნის მაგნიტური ნაკადის, ასევე დეროების დენებისა და სხვა პარამეტრებთან რაოდენობრივი ურთიერთკავშირები. ამის შედეგად შეიქმნა დამატებითი

დანაკარგების გაანგარიშების მეთოდოლოგია, რომელიც ითვალისწინებს ყველა ძირითად გავლენის განმახორციელებელ ფაქტორს [19 და სხვა. შეტანილ იქნა აუცილებელი კორექტივები დემპფერულ გრაგნილში აღძრული დენების, ასევე გენერატორის პარამეტრებსა და მისი ელექტრომაგნიტური მომენტების გაანგარიშებაში.

1.3. ჰიდროგენერატორების გამოყენება ხანგრძლივ არასიმეტრიულ რეჟიმში

მიღებულმა შედეგებმა გახადა შესაძლებელი შეცვლილიყო სახელმწიფო სტანდარტის მოთხოვნები დასაშვები ხანგრძლივი არასიმეტრიის ნაწილში. ფაზური დენების მნიშვნელოვანი ასიმეტრიის მქონე ჰიდროგენერატორების მუშაობის საშუალებამ მოახდინა ახალი ასიმეტრიული საექსპლუატაციო რეჟიმების დამუშავების სტიმულირება, რომლებმაც მოგვცა სიმძლავრის გაცემის საშუალება მოცემული ბლოკის ერთ-ერთი ტრანსფორმატორის ფაზის ან ჰესისა და სისტემის დამაკავშირებელი ხაზის ერთ-ერთი ფაზის გათიშვის შემთხვევაში .

ფაზების მიხედვით ტრანსფორმატორის რემონტის ჩატარების დროს საიანო-შუმენსკაიას ჰესის გენერატორებისთვის მუშაობის ამგვარი რეჟიმების ინსტიტუტის მიერ დამუშავება და დანერგვა გვამღევს საშუალებას მივიღოთ 400 მგვტ დამატებითი სიმძლავრე, ბლოკის ორი ფაზით გადაცემით, მისი მთლიანი გათიშვის მაგივრად [18 და სხვა]. მხოლოდ გეგმიური სარემონტო სამუშაოების ჩატარებისას ეს შეგვიწყობს ხელს ერთი წლის განმავლობაში დამატებით იყოს მიღებული ელექტროენერჯის 100 მლნ.კვტ.სთ.

არაგეგმიური ავარიული რემონტების დროს ბლოკის მუშაობის ამგვარი რეჟიმის გამოყენება იძლევა უფრო მეტ ეკონომიკურ ეფექტს.

მრავალრიცხოვანი ანალიტიკური და ექსპერიმენტალური გამოქვეყნებების შედეგად დამუშავებულ იქნა ინსტრუქცია მრავალაგრეგატიანი ჰესების ძალური ბლოკების ელემენტების ფაზების მიხედვით რემონტი, მაქსიმალური სიმძლავრის ორი ფაზით გადაცემით.

ამგვარად, გენერატორის ხანგრძლივი არასრულფაზიანი დატვირთვის რეჟიმი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს შემდეგ შემთხვევებში:

1) ჰეს-ის და სისტემის დამაკავშირებელი ორჯაჭვიანი ხაზის ექვსი ფაზიდან ერთი ფაზის მდგრადი დაზიანება. ამ შემთხვევაში სტანდარტულ გადაწყვეტილებად მიიჩნევა ჯაჭვის გათიშვა, რომელზეც დაზიანებულია ერთ-ერთი ფაზა. ეს იწვევს ენერჯის გადაცემის საიმედოობის და გადასაცემი სიმძლავრის სტატიკური და დინამიკური ზღვრების შემცირებას. ელექტროგადაცემის მუშაობის საიმედოობა მცირდება შედარებით უმნიშვნელოდ იმ შემთხვევაში, თუ სამი ფაზის გათიშვის ნაცვლად გაითიშება ერთი დაზიანებული ფაზა და ჰეს-ის ენერჯია გადაიცეს საჰაერო ხაზის ხუთი ფაზის მეშვეობით.

ხუთი ფაზის მეშვეობით მუშაობაზე გადასვლა შედარებით იოლად განხორციელდება. იგი, როგორც წესი, არ არის დაკავშირებული გენერატორებზე არსებულ დიდ ასიმეტრიასთან. ჰეს-ის სიმძლავრის 70% გადაიცემა ხუთი ფაზის მეშვეობით, როგორც წესია, იწვევს ჰეს-ის თითოეულ გენერატორზე ასიმეტრიის წარმოქმნას, რომელიც არ აღემატება

$$I_2/I_{\text{HOM}}=0.1,$$

რაც სავსებით დასაშვებია ჰიდროგენერატორებისთვის.

2) ჰეს-ი სისტემასთან დაკავშირებულია ერთჯაჭვიანი საჰაერო ხაზით. ერთ-ერთი ფაზის დაზიანების შემთხვევაში, როგორც წესი, ითიშება ყველა სამი ფაზა და წყდება ჰეს-ის მიერ ენერჯის გაცემა.

მხოლოდ დაზიანებული სადენის გათიშვა და საჰაერო ხაზის ორი ფაზის მეშვეობით მუშაობაზე გადასვლა ხელს უწყობს ჰეს-ის 0.2-0.3 სრული სიმძლავრის გადაცემას. [11]-ში განხილულია ამგვარი გადაცემის დეტალები. მის რეალიზაციას ჰქონდა ადგილი მთელ რიგ შემთხვევებში. მაგრამ ერთჯაჭვიანი კავშირები ხორციელდება მცირე სიმძლავრის ჰეს-ზე და მუშაობაში მისი პატარა ნაწილის შენარჩუნება ხშირ შემთხვევაში არ გამოიწვევს მნიშვნელოვან ეფექტს, ამიტომ გამოიყენება მხოლოდ ცალკეულ შემთხვევებში.

3) ჰეს-ის ერთ-ერთი ბლოკის ხანგრძლივი ასიმეტრიული რეჟიმი, რომელზეც დაყენებულია მნიშვნელოვანი ერთეული სიმძლავრის გენერატორები. ხანგრძლივი არასიმეტრიული რეჟიმის ეს შემთხვევა განსაკუთრებულად ეფექტურია და, როგორც წინასწარმა გამოკვლევამ გვიჩვენა, განხორციელებადია პრაქტიკაზე [7].

ზემოთ მოხსენებულის თვალსაჩინო მაგალითს წარმოადგენს არასიმეტრიული რეჟიმის ეფექტური გამოყენება ვ. ი. ლენინის სახელობის ვოლგის ჰეს-ზე ტრანსფორმატორული ფაზების გადახვევისას შემდეგი ძაბვით: 15,75/400 კვ 15,75/500 კვ-ზე. ამ შემთხვევაში 100 მგვტ-ანი სამი გენერატორის გათიშვის მაგივრად, რომლებიც მუშაობენ ერთ ბლოკზე, შესაძლებელი გახდა 130 მგვტ-ის გაცემა საჰაერო ხაზით სატრანსფორმატორო ფაზების 400 კვ-დან 500 კვ-მდე გადაყვანის მთლიანი პერიოდის განმავლობაში, რომელიც გრძელდებოდა რამოდენიმე თვის განმავლობაში [11].

2. სტატორის გრაგნილის რემონტის მოცულობისა და დროის ხანგრძლივობის შედარება მისი დაზიანების შემთხვევაში

მოკლევადიანი რემონტი ითვალისწინებს დაზიანებული ხვიების სქემიდან გამოთიშვას შუბლურ ნაწილში, რითაც ხდება გენერატორის სტატორის გრაგნილის ხელოვნური არასიმეტრიის შექმნა.

მოყვანილია ამ რემონტებისათვის საჭირო ოპერაციების მოცულობები და ღირებულებები. ნაჩვენებია, რომ ამ არასიმეტრიული რეჟიმის გამოყენება იძლევა ეკონომიკურ ეფექტურობას არამართო ელექტროენერჯის გამომუშავების საიმედოობის გაზრდით, არამედ ამ მოკლევადიანი რემონტის ჩატარების სიმარტივესა და სიიარაღეში, რომელიც შეიძლება თითქმის ათჯერ განსხვავდებოდეს სრულყოფილი რემონტისაგან გენერატორის როტორის ამოღებით.

2.1 რემონტი ზღუდარის დადებით, როგორც დროებითი ღონისძიება

ზღუდარის დადებით, როგორც დროებითი ღონისძიება

1. სტატორის გადახურვის (რეფლიონკების) მოხსნა.
2. დაზიანებული ღეროს მოძებნა, შესაბამისი მეთოდით.
3. დაზიანებული სექციის სტატორთან შეერთების ადგილის იზოლაციისგან განთავისუფლება, შუბლურ ნაწილში.
4. დაზიანებული სექციის ჩახსნა განრჩილვით. ამ სექციის ბოლოების გაიზოლირება.

5. სტატორის დაზიანებული სექციის გამოთიშვა ზღუდარის დადებით, შუბლურ ნაწილში. მირჩილვა დაიზოლირება, დამაგრება.

6. სტატორის გრაგნილის გამოცდა ნომინალური ძაბვით 50 ჰც.

7. სტატორის გადახურვის აღდგენა და გენერატორის ექსპლუატაციაში შეყვანა.

სამუშაოების ჩატარების ვადა და დრო დამოკიდებულია გენერატორის სიმძლავრეზე, კონსტრუქციებზე და ა.შ. და სჭირდება დაახლოებით 3 დღე. ღირებულება დაახლოებით შეადგენს 4 ათას ლარს.

იმშემთხვევაში თუ დაზიანებული სექციის სხვა სექციებთან შეერთების ადგილი აღმოჩნდება ჯვართავას თათის ქვეშ და ადგილის გაბარიტის სიმცირის გამო შეუძლებელი გახდება იქ მუშაობა, საჭირო იქნება შემდეგი ღონისძიებების ჩატარება:

1. გენერატორის აღმგზნები მანქანის დემონტაჟი.

2. გენერატორის ქუსლის და ზედა საკისრის დემონტაჟი.

3. ჯვრთავას დემონტაჟი.

4. დაზიანებული ღეროს მოძებნა, შესაბამისი მეთოდით.

5. დაზიანებული სექციის სტატორთან შეერთების ადგილის იზოლაციისგან განთავისუფლება, შუბლურ ნაწილში. ნაჩვენებია სურათ 5-ზე

6. დაზიანებული სექციის ჩახსნა განრჩილვით. ამ სექციის ბოლოების გაიზოლირება.

7. სტატორის დაზიანებული სექციის გამოთიშვა ზღუდარის დადებით, შუბლურ ნაწილში. მირჩილვა, დაიზოლირება, დამაგრება.



**სურ. 5. ჰიდროგენერატორის სტატორის გრაგნილის
შუბლურ ნაწილი.**

8. სტატორის გრაგნილის გამოცდა ნომინალური ძაბვით 50ჰც.
9. გენერატორის აღმგზნები მანქანის მონტაჟი.
10. ქუსლის და გენერატორის ზედა საკისრის მონტაჟი.
11. ჯვრთავას მონტაჟი.
12. სტატორის გადახურვის აღდგენა და გენერატორის ექსპლუატაციაში შეყვანა.

სამუშაოების ჩატარების ვადა და დრო დამოკიდებულია გენერატორის სიმძლავრეზე, კონსტრუქციებზე და ა.შ. რისთვისაც სჭირდება დაახლოებით 6 დღე. ღირებულება დაახლოებით შეადგენს 8 ათას ლარს.

2.2 გენერატორის სტატორის დაზიანებული გრაგნილის რემონტის მოცულობა (როტორის ამოღებით)



სურ. 6. როტორის ამოღება-ჩადების პროცესი

1. აღმგზნები მანქანის დემონტაჟი.
2. გენერატორის ქუსლის და ზედა საკისრის დემონტაჟი.
3. ჯვართავას დემონტაჟი.
4. გენერატორის ქვედა საკისრის დემონტაჟი.
5. როტორის და ტურბინის ღერძების გადახსნა.
6. როტორის ამოღება და სარემონტო მოედანზე გადატანა (ნაჩვენებია სურ. 6-ზე).
7. სტატორზე სამუშაოდ ფიცარნაგის მოწყობა.
8. სტატორის გრაგნილის დაზიანებული ადგილის მოხსნა.

9. სტატორის რკინის გასუფთავება, საჰაერო არხების გარეცხვა-გასუფთავება. რკინის (აქტიური ფოლადის) გამოცდა.

10. დაზიანებული სექციის (ან სექციების) განრჩილვა და დემონტაჟი.

11. სტატორის დარჩენილი დაუზიანებელი ნაწილის გამოცდა სრული გამოსაცდელი ძაბვით.

12. დაზიანებული ღეროს იზოლაციის მოცილება, ახალი იზოლაციის დახვევა, დაპრესვა, გამოცხობა - პაზურ ნაწილში.

13. აღდგენილი ღეროების გამოცდა.

14. აღდგენილი ღეროების ჩაწყობა შესაბამის ღრმულებში, სტატორის სქემის აღდგენა მირჩილვით, შუბლური ნაწილების გაიზოლირებით და გამაგრებით.

15. სტატორის გრაგნილის გამოცდა ამაღლებული ძაბვით.

16. სტატორის შეღებვა საიდოლაციო ლაქით.

17. სარემონტო ფიცარნაგის დემონტაჟი.

18. როტორის ჩადება, გენერატორის და ტურბინის ღეროების გადაბმა.

19. ზედა ჯვართავას და ქუსლის მონტაჟი. ზედა საკისარის მონტაჟი.

20. ღერძების გადაბმის ტეხვის შემოწმება, ღერძის ცემის შემოწმება, როტორის მობრუნება 360°-ით.

21. ტურბინის საკისრის ამოღება ღერძის ცემის შემოწმების პერიოდში.

22. ტურბინის საკისრის, გენერატორის ქვედა საკისრის, აგრეთვე აღმგზნები მანქანის და სხვა დეტალების მონტაჟი.

23. გენერატორის დაბრუნება, ვიბრაციული გაზომვებს ჩატარება, საჭიროების შემთხვევაში ბალანსირება.

სამუშაოების ჩასატარებლად საჭიროა დაახლოებით 30 დღე. ღირებულება დაახლოებით შეადგენს 50 ათას ლარს.

3. რელეური დაცვის მუშაობა ჰიდროგენერატორის სტატორის გრაგნილში ხელოვნური არასიმეტრიის რეჟიმში

გენერატორებში ძირითადად დაზიანებები გამოწვეული არის სტატორის და როტორის გრაგნილებში იზოლაციის დარღვევით. იზოლაციის დარღვევა ჩვეულებრივად მიმდინარეობს მისი დაძველების შედეგად, დანესტიანებით, მასში დეფექტების არსებობით, ძაბვის აწევის შედეგად, გადაძაბვებით, მექანიკური დაზიანებით და ა.შ. აქედან გამომდინარე გენერატორებზე დადგმული არის რელეური დაცვის მოწყობილობები, რომლებიც იცავენ მას შიდა დაზიანებებისაგან და ისეთი საშიში ანორმალური რეჟიმებისაგან, რომლებმაც შეიძლება გამოიწვიოს გენერატორის დაზიანება.

3.1. გენერატორის რელეური დაცვის ზოგადი საკითხები

გენერატორის სტატორში შეიძლება წარმოიქმნას: სამფაზა და ორფაზა მოკლედ შერთვები; ერთი ფაზის დამოკლება კორპუსთან (მიწასთან); ერთი ფაზის გრაგნილის ხვიებს შორის დამოკლება.

ფაზათაშორის მოკლედ შერთვები ხასიათდებიან დაზიანების ადგილზე დიდი მნიშვნელობის დენების გავლით და ელექტრული რკალის წარმოქმნით, რომელიც იწვევს იზოლაციის დაწვას, აგრეთვე გრაგნილის დენგამტარი ნაწილების დაზიანებას, ხოლო ზოგჯერ სტატორის მაგნიტური გამტარის ფოლადის დაზიანებას.

სტატორის გრაგნილის დამოკლება კორპუსთან წარმოადგენს დამიწებას, რადგანაც სტატორის კორპუსი დამიწებულია. ამიტომ დაზიანების დენი მიწაში გადის სტატორის მაგნიტოგამტარის ფოლადის გავლით და იწვევს მის დაწვას. ფოლადის დაზიანება მოითხოვს ხანგრძლივი და რთული შეკეთების ჩატარებას.

დამოკლება ერთი ფაზის ხვიებს შორის წარმოიქმნება შედარებით იშვიათად. იგი გადადის ან კორპუსთან დამოკლებაში, ან ფაზათაშორის მოკლედ შერთვაში.

გენერატორის როტორის გრაგნილი იმყოფება 300—500 ვოლტი ძაბვის ქვეშ. ამიტომ მის იზოლაციას გააჩნია სიმტკიცის გაცილებით დიდი მარაგი, ვიდრე სტატორის გრაგნილის იზოლაციას. მაგრამ როტორის გრაგნილის მუშაობის მძიმე მექანიკური პირობებიდან გამომდინარე შედარებით ხშირად შეიმჩნევა იზოლაციის დაზიანების და როტორის გრაგნილის კორპუსთან ერთ წერტილში ან ორ წერტილში დამოკლების შემთხვევები.

როტორის გრაგნილის კორპუსთან ერთ წერტილში დამოკლება საშიში არ არის, რადგანაც დამოკლების წერტილში დენი პრაქტიკულად ნულის ტოლია და გენერატორის ნორმალური მუშაობის რეჟიმი არ ირღვევა.

როტორის გრაგნილის კორპუსთან ორ წერტილში დამოკლების შემთხვევაში როტორის გრაგნილის ხვიების ნაწილი აღმოჩნდება დაშუნტებული; ამ დროს როტორის გრაგნილის წინაღობა მცირდება, რის გამოც ადგილი აქვს როტორის დენის გადიდებას. ეს დენი იწვევს გრაგნილის გადახურებას და როტორის დაზიანებას. აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ორ წერტილში დამოკლება მეტად საშიში მოვლენაა გენერატორისათვის [14,15,16].

გენერატორისათვის ანორმალურ რეჟიმად ითვლება: სტატორის ან როტორის დენის დასაშვებ სიდიდეზე მეტად გაზრდა; სტატორის ფაზების არასიმეტრიული დატვირთვა; სტატორის მომჭერებზე ძაბვის დასაშვებზე მნიშვნელოვანი მომატება. განვიხილოთ ისინი ცალ-ცალკე.

გარე მოკლედ შერთვის დროს გენერატორში, რომელიც კვებავს დაზიანების ადგილს, აღიძვრება მოკლედ შერთვის დენი $I_{ა.შ} > I_{გ.ნ}$; ნორმალურად ასეთი მოკლედ შერთვების ლიკვიდაცია ხდება დაზიანებული ელემენტის რელეური დაცვით და იგი არ არის საშიში გენერატორისათვის. მაგრამ დაზიანებული ელემენტის დაცვის უარის შემთხვევაში გენერატორში ხანგრძლივად გაივლის მოკლედ შერთვის დენი და გადაახურებს გრაგნილს, რაც შეიძლება დამთავრდეს გენერატორის დაზიანებით. აღნიშნული შეიძლება თავიდან იქნას აცილებული გენერატორის დროულად გამორთვით. ამ მიზნით გენერატორები უნდა იყოს აღჭურვილი დაცვებით, რომლებიც რეაგირებენ გარე მოკლედ შერთვებზე და ახორციელებენ შორეულ რეზერვირებას.

გენერატორის გადატვირთვა ჩვეულებრივად აღიძვრება: როცა ენერგოსისტემაში გამოირთვება პარალელურად მომუშავე გენერატორების ნაწილი; მომხმარებლების საწარმოო პროცესების ტექნოლოგიებით გამოწვეული დატვირთვის ხანმოკლე ბიძგებით; ძრავების თვითგაშვებით; გენერატორის ფორსირებით; სინქრონიზმის დარღვევით; გენერატორის აღზნების დაკარგვით და ა.შ.

გადატვირთვა, ანუ გენერატორის გრაგნილში დატვირთვის დენის გაზრდა ნომინალური მნიშვნელობის ზევით $I_{გ} > I_{ნომ}$, ახდენს გრაგნილის გადახურებას და შეიძლება გამოიწვიოს იზოლაციის დარღვევა. მძლავრი გენერატორების გადატვირთვის დასაშვები დროის ხანგრძლივობა დამოკიდებული არის გენერატორის გაციების სისტემის ტიპზე. სტატორის გრაგნილებისათვის შესაბამისი მონაცემები მოცემული არის სათანადო ცნობარებში.

როგორც აღნიშნული ცხრილებიდან გამომდინარეობს სტატორის გადატვირთვა 30%-მდე გენერატორებზე უშუალო გაციებით და 50%-მდე გენერატორებზე ირიბი გაციებით დასაშვებია 2წთ. და მეტი დროის განმავლობაში. ამიტომ ასეთ შემთხვევაში არ არის საჭირო გენერატორის მყისურად ავტომატური გამორთვა [9].

უმეტეს შემთხვევაში გადატვირთვები გამოწვეული აღზნების ფორსირებით, რყევებით, მომხმარებლების დატვირთვის ხანმოკლე ბიძგებით და ა.შ. თავისთავად ქრებიან $t_{დას}$. ზღვრული დროის ამოწურვამდე. ენერგოსისტემაში ავარიების შემთხვევაში, რომელიც ხასიათდება საგენერატორო სიმძლავრეების დეფიციტით, გათვალისწინებული არის ავტომატური განტვირთვა სიხშირის დაცემისას ნაწილი მომხმარებლების გამორთვით; აგრეთვე სარეზერვო აქტიური და რეაქტიური სიმძლავრეების ავტომატური და ხელით გაშვება (ჩართვა სისტემაში). მსგავსი საშუალებებით თავიდან არის აცილებული გენერატორების ხანგრძლივი გადატვირთვა.

გენერატორების ფაზებში დენების არასიმეტრია აღიძვრება გარე ქსელში ორფაზა და ერთფაზა მოკლედ შერთვების დროს; გენერატორის დატვირთვასთან დამაკავშირებელი ქსელის ერთი ან ორი ფაზის გაწყვეტის დროს; ქსელის არასრულფაზა რეჟიმში მუშაობის შემთხვევაში. დენების არასიმეტრია იწვევს როტორის დამატებით გადახურებას და მანქანის მექანიკურ ვიბრაციებს.

არასიმეტრია ხასიათდება სტატორის გრაგნილში უკუმიმდევრობის დენის გაჩენით I_2 ; ამ დენს აქვს ფაზების შებრუნებული თანმიმდევრობა და წარმოქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც ბრუნავს როტორის ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით. შედეგად I_2 დენით შექმნილი მაგნიტური ნაკადი გადაკვეთს როტორის კორპუსს ორმაგი სიჩქარით. ის აინდუქცირებს როტორის მეტალურ ნაწილში მნიშვნელოვანი სიდიდის გრიგალურ დენებს, რომელსაც აქვს ორმაგი სიხშირე, და წარმოქმნის დამატებით ორმაგი

სიხშირით პულსირებულ ელექტრომაგნიტურ მომენტს. გრიგალური დენები იწვევენ როტორის დამატებით გადახურებას, ხოლო პულსირებული მომენტი მანქანის მბრუნავი ნაწილის ვიბრაციას.

დენი $I_2 > I_2$ მაქს. ხანგ. დას. იწვევს როტორის საშიშ დამატებით გადახურებას და შეიძლება დაშვებულ იქნას მხოლოდ შეზღუდული $t_{დას}$. დროის განმავლობაში.

დასაშვები დროის სიდიდე $t_{დას}$. განისაზღვრება ზღვრული ტემპერატურით $t_{ზღვრ.}$, რომელიც დასაშვებია როტორის გრაგნილის იზოლაციისათვის.

მძლავრი გენერატორებისათვის, ირიბი გაციებით, როცა $I_2 > 0,3 I_{ნომ.გ.}$, დრო $t_{დას}$. შედარებით მცირეა (2 წთ-ზე ნაკლები) და ამიტომ მსგავსი გადატვირთვების შემთხვევაში საჭირო არის ავტომატური მოწყობილობა, რომელიც დაიცავს გენერატორს არასიმეტრიულ რეჟიმში.

მცირე სიმძლავრის გენერატორებში, (30-60 მგვტ), ირიბი გაციებით და როტორის გადახურების დიდი მარაგით, დასაშვები დრო გაცილებით დიდია და მათი ავტომატური გამორთვა საჭირო არის, როცა დენი $I_2 > 0,5 I_{ნომ.გ.}$.

გენერატორებზე ძაბვის აწევა მოხდება დატვირთვის უეცარი მოხსნის შემთხვევაში, რადგანაც ამ დროს ქრება სტატორის რეაქციის მაგნიტური ნაკადი და იზრდება განტვირთული მანქანის ბრუნვის სიჩქარე.

ტურბოგენერატორზე ძაბვის აწევა არ აღწევს საშიშ სიდიდემდე და აღმოიფხვრება სიჩქარის და ადგენების ავტომატური რეგულატორების მოქმედებით.

ჰიდროგენერატორებზე სიჩქარის რეგულატორები მოქმედებენ შედარებით ნელა, ვიდრე ტურბოგენერატორებზე, ამიტომ დატვირთვის უეცარი მოხსნის შემთხვევაში აგრეგატის ბრუნვის სიჩქარე მნიშვნელოვნად იზრდება და შეიძლება გადააჭარბოს ნომინალური სიჩქარეს 40_60%-ით,

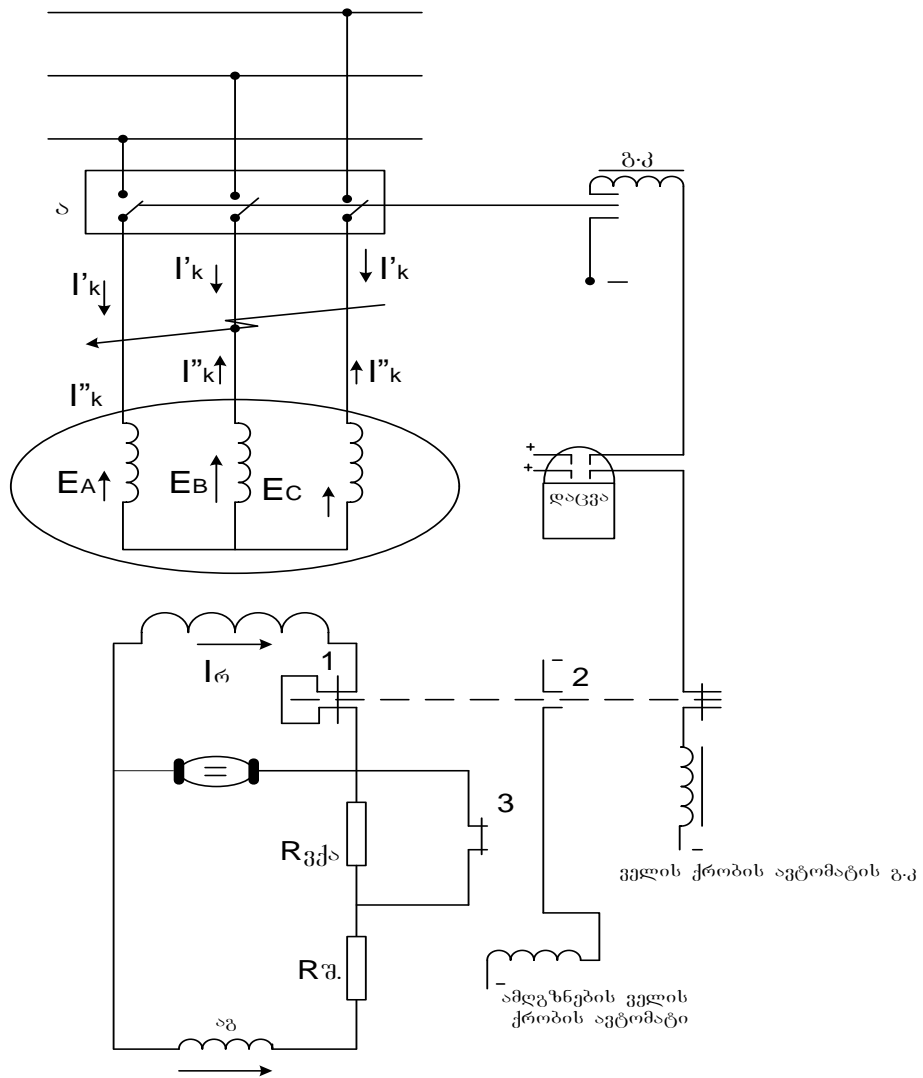
ხოლო ძაბვამ ასეთ დროს მიაღწიოს ნომინალურის 150%-ს. ამიტომ ჰიდროგენერატორები ალგუნების მოხსნის ავტომატური მოწყობილობების გარდა აღჭურვილი არიან ძაბვის აწევსაგან დაცვით, რომელიც მოქმედებს ალგუნების მოხსნაზე და გენერატორის გამორთვაზე [9].

3.2. ზოგადი მოთხოვნები გენერატორების დაცვების მიმართ.

გენერატორებზე დადგმული არის რელეური დაცვის მოწყობილობები, რომლებიც იცავენ მას შიდა დაზიანებებისაგან და ისეთი საშიში ანორმალური რეჟიმებისაგან, რომლებმაც შეიძლება გამოიწვიოს გენერატორის დაზიანება.

გენერატორის მუშაობის ისეთი ანორმალური რეჟიმების დროს, როცა არ არის საჭირო გენერატორის დაუყოვნებლივი გამორთვა, დაცვა მოქმედებს სიგნალზე, რომლის დროსაც მორიგე პერსონალი ვალდებული არის გაატაროს ღონისძიებები ანორმალური რეჟიმის აღმოსაფხვრელად გენერატორის გამორთვის გარეშე.

გენერატორის ავტომატური გამორთვა ნებადართული არის მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა აღძრული ანორმალური რეჟიმის აღმოფხვრა შეუძლებელია და შემდგომში მან შეიძლება გამოიწვიოს გენერატორის დაზიანება.



სურ. 7. გენერატორის ველის ავტომატური ქრობის სქემა

გენერატორში აღძრული დაზიანების გავრცელების ლიკვიდაციისათვის, შიდა დაზიანებისაგან დაცვებმა უნდა გამოყონ გენერატორი ქსელისაგან ძირითადი ამომრთველის გამორთვით და შეწყვიტონ დენი როტორის გრაგნილში ველის ქრობის ავტომატის გამორთვით.

ძირითადი ამომრთველის გამორთვით შეწყდება დაზიანების დენი, რომელიც გადის დაზიანებულ გენერატორში ქსელიდან (სურ. 7); მაგრამ

დაზიანების ადგილზე კვლავ გადის დენი I_k , რომელიც განპირობებული არის გენერატორის E ე.მ.ძ.-ით.

ველის ქრობის 1 ავტომატის გამორთვით გაწყდება როტორის I_0 დენის წრედი. ამის გამო გაქრება როტორის ნაკადი და მასთან ერთად გაქრება გენერატორის ფაზებში მის მიერ შექმნილი ე.მ.ძ; ერთდროულად ველის ქრობის ავტომატის 2 ბლოკ-კონტაქტი ზემოქმედებს აღმგზნების ველის ქრობის ავტომატის გამორთვაზე, რომლის 3 კონტაქტით ჩაირთვება $R_{3.ქ.ა}$. წინაღობა აღმგზნების აღგზნების წრედში.

გარე ქსელში მოკლედ შერთვისაგან დაცვებმა უნდა გამორთონ საგენერატორო ამომრთველი და ველის ქრობის ავტომატი, ერთის მხრივ გენერატორის მიერ ქსელში გაგზავნილი მოკლედ შერთვის დენის შეწყვეტის მიზნით, ხოლო მეორეს მხრივ დატვირთვის უეცრად მოხსნის დროს გენერატორის მომჭერებზე ძაბვის აწევის თავიდან აცილებისათვის [9].

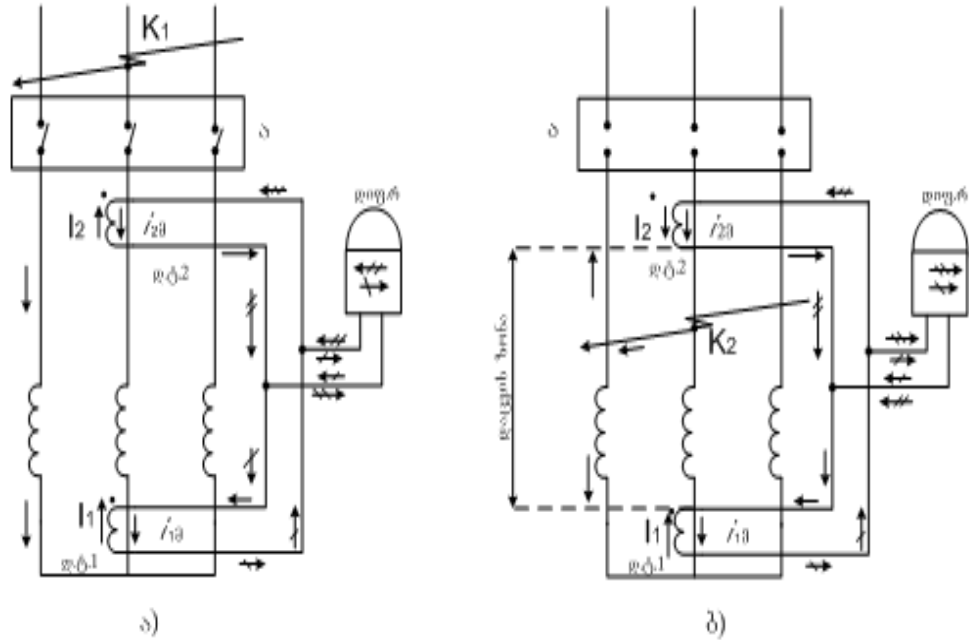
3.3. გენერატორის დაცვები.

3.3.1. სტატორის გრაგნილში ფაზათაშორის

მოკლედ შერთვისაგან დაცვა.

გენერატორში ფაზათაშორის მოკლედ შერთვისაგან დასაცავად გამოიყენება სწრაფმოქმედი გრძივი დიფერენციალური დაცვა.

დაცვის მოქმედების პრინციპი (სურ. 8. ა) დაფუძნებული არის დენების სიდიდის და ფაზის შედარების პრინციპზე სტატორის გრაგნილის ფაზის დასაწყისში და ბოლოში (I_1 და I_2).



სურ. 8. გენერატორის გრძივი დიფერენციალური დაცვის სქემა და მოქმედების პრინციპი. ა) დენების განაწილება გარე მოკლედ შერთვის დროს. ბ) დენების განაწილება ზონაში მოკლედ შერთვის დროს.

ამ მიზნით სტატორის გრაგნილის ორივე მხარეს დადგმული არის დენის ტრანსფორმატორები დ.ტ.1 და დ.ტ.2 ერთნაირი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტებზე $N_{დ.ტ.1}=N_{დ.ტ.2}$. დენის ტრანსფორმატორების მეორადი გრაგნილები შეერთებული არიან მიმდევრობით, როგორც ეს ნაჩვენებია არის ნახაზზე, სხვადასხვა პოლარობებით. დიფერენციალური რელე დიფ. რ. ჩართული არის ორთავე დენის ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილების პარალელურად.

ზონის გარეთ მოკლედ შერთვის დროს (წერტილი $K1$ სურ. 8. ა) პირველადი დენები $I1$ და $I2$ ტოლი არიან სიდიდით და ორიენტირებული არიან ერთი მიმართულებით მოკლედ შერთვის $K1$ წერტილისაკენ. მეორადი დენების განაწილება ნაჩვენებია არის სურ. 8. ა-ზე; დენი რელეში $I_{\Sigma}=I1_{ა}-I2_{ა}$; დენის ტრანსფორმატორების მუშაობის იდეალური რეჟიმის შემთხვევაში

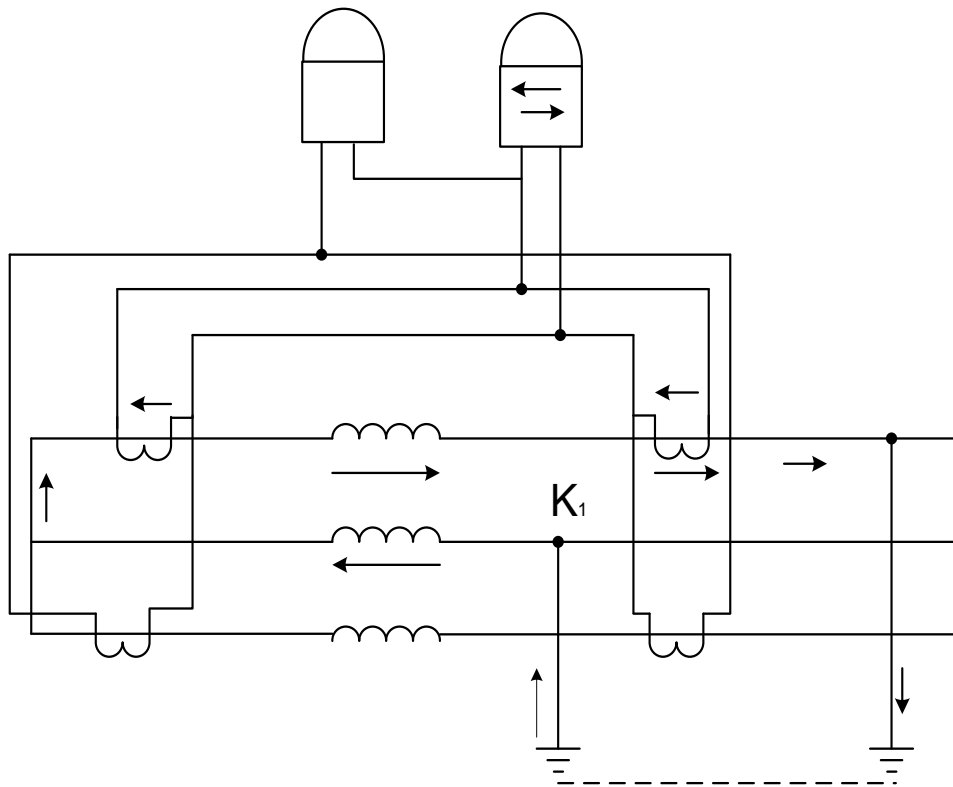
$I_{1a}=I_{2a}$ და დენი $I_r=0$ ე.ი. დაცვა არ მოქმედებს. სინამდვილეში დენის ტრანსფორმატორების ცდომილების გამო დენები $I_{1a}\neq I_{2a}$ და რელეში გადის უბალანსობის დენი $I_r=I_{1a}-I_{2a}$. დაცვის არასწორი მოქმედების თავიდან აცილების მიზნით საჭირო არის უზრუნველყოფილი იქნას პირობა $I_{d.a.}>I_{r.მაქს.}$

დატვირთვის რეჟიმში პირველადი და მეორადი დენების განაწილება არის იგივე როგორც გარე მოკლედ შერთვის დროს, ე.ი. დენი $I_r=0$ და დაცვა არ მუშაობს. ზონაში მოკლედ შერთვის (წერტილი K_2 სურ.8.ბ) დროს დენების პირველადი მნიშვნელობები მიმართული არიან შემხვედრად (მოკლედ შერთვის K წერტილისაკენ). შედეგად რელეში მეორადი დენები იკრიბება $I_r=I_{1a}+I_{2a}$ და რელე მოდის მოქმედებაში; თუ $I_r>I_{d.a.}$; მოკლედ შერთვის დენის შეწყვეტისათვის საჭირო არის დაცვამ გამორთოს გენერატორი და ველის ქრობის ავტომატი.

იმის გამო, რომ საგენერატორო ძაბვის ქსელი ძირითადად მუშაობს იზოლირებული ნულოვანი წერტილით, გენერატორის ფაზათაშორის მოკლედ შერთვისაგან დაცვა შეიძლება განხორციელდეს ორფაზა შესრულებით. მაგრამ ორფაზა შესრულებით დაცვა ვერ უზრუნველყოფს გენერატორის გამორთვას მიწასთან დამოკლების დროს, როცა ერთი ფაზის დამოკლება ხდება ქსელში, ხოლო მეორე ფაზის – გენერატორში, (სურ. 9.) რომელსაც არ გააჩნია დაცვა. მეორეს მხრივ ორ წერტილში მიწასთან დამოკლება გენერატორისათვის არის საშიში სახის დაზიანება და ამ დროს საჭირო არის გენერატორის დაუყოვნებლივი გამორთვა. ამიტომ ასეთი სახის დაზიანებების დროულად ლიკვიდაციისათვის საჭირო არის გენერატორის გრძივი დიფერენციალური დაცვა განხორციელდეს სამფაზა შესრულებით.

დიფერენციალური დაცვის მოქმედების ზონა შემოსაზღვრება მონაკვეთით, რომელიც მოთავსებული არის დენის ტრანსფორმატორებს შორის (სურ.8ბ).

დიფერენციალური დაცვის დენის ტრანსფორმატორების მეორადი გრაგნილები დამიწებული არის მხოლოდ ტრანსფორმატორების ერთ ჯგუფთან დტ1 ან დტ2; დენის ტრანსფორმატორების მეორე ჯგუფი ელექტრულად არის დაკავშირებული პირველ ჯგუფთან და ამიტომ მეორე წერტილში დამიწება საჭირო არ არის.



სურ. 9. გრძივი დიფერენციალური დაცვის მუშაობა ორი ფაზის მიწასთან დამოკლების შემთხვევაში.

გარე ქსელში მოკლედ შერთვის დროს დაცვის დიფერენციალურ (დიფ.რ.) რელეში (სურ.8.ა) გადის უბალანსობის დენი, რომელიც განპირობებული არის დტ1 და დტ2 დენის ტრანსფორმატორებით.

$$I_{უბ.} = I_{2დამზგ.} - I_{1დამზგ.} \quad (3.1).$$

უბალანსობის დენმა შეიძლება გამოიწვიოს დიფერენციალური დაცვის არასწორი მოქმედება, ამიტომ საჭირო არის გატარდეს ღონისძიებები მისი სიდიდის შემცირებისათვის.

3.3.2. სტატორის გრაგნილის კორპუსთან დამიწებისაგან დაცვა

როგორც ცნობილია საქართველოს ენერგოსისტემაში საგენერატორო ძაბვის ქსელი მუშაობს იზოლირებული ნეიტრალით, ხოლო ქსელში ტევადური დენები გაკომპენსირებული არის რკალმქრობი კოჭებით. სტატორის გრაგნილის კორპუსთან (მიწასთან) დამოკლების შემთხვევაში დაზიანების დენი $I_{მიწა}$ იკვრება სტატორის მაგნიტური გამტარის გზით და იწვევს ფოლადის დაზიანებას. დაზიანების ზომა დამოკიდებული არის დენის სიდიდეზე და ხანგრძლივობაზე.

ექსპერიმენტების შედეგების და ექსპლოატაციის გამოცდილების საფუძველზე სტატორის გრაგნილის კორპუსთან დამიწებისაგან დაცვისადმი წაყენებული არის შემდეგი მოთხოვნები:

1. დაცვამ უნდა იმოქმედოს სიგნალზე, როცა დამიწების დენის სიდიდე $I_{მიწა} < 5$ -ზე, რადგანაც აღნიშნული სიდიდის დენის დროს არ არის შემჩნეული სტატორის დაზიანების შემთხვევები.

2. დაცვა მოქმედებს გენერატორის გამორთვაზე, როცა დამიწების დენის სიდიდე $I_{მიწა}$ მეტი ან ტოლია 5ა-ზე, ვინაიდან ამ დროს არსებობს სტატორის ფოლადის დაზიანების საშიშროება.

ა) დაცვის შესრულების პრინციპი. გენერატორის სტატორის დამოკლებისაგან დაცვის განხორციელებისათვის გამოიყენება სპეციალური მაღალი მგრძნობიარობის დაცვა, რომელიც რეაგირებს ნულოვანი მიმდევრობის დენის სიდიდეზე [14].

3.3.3. გენერატორის გარე ქსელში მოკლედ შერთვის დენისაგან და გადატვირთვისაგან დაცვა დანიშნულება და დაცვის სახეობები

გარე მოკლედ შერთვისაგან გენერატორის დაცვის დანიშნულებაა შემკრებ სალტეებზე ან მისგან გამავალ მინაერთებზე მოკლედ შერთვის დროს გამორთოს გენერატორი.

ნორმალურად აღნიშნული მოკლედ შერთვა უნდა გამორთოს დაზიანებული ელემენტის დაცვამ (ანუ სალტეების ან ხაზის, ან ტრანსფორმატორის) ამიტომ გენერატორებზე გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვა ითვლება სარეზერვოდ და მოქმედებს მხოლოდ აღნიშნული ელემენტების დაცვის უარის შემთხვევაში.

თუ გენერატორის ძაბვის სალტეებს არ გააჩნიათ სპეციალური დაცვა, მაშინ სალტეზე მოკლედ შერთვის დროს გენერატორის გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვა წარმოადგენს ძირითად დაცვას, ხოლო სალტიდან გამავალი მინაერთებისათვის იგი წარმოადგენს სარეზერვო დაცვას.

გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვა დამატებით წარმოადგენს გენერატორის დიფერენციალური დაცვის რეზერვს, გენერატორში აღძრული ფაზათაშორის მოკლედ შერთვების დროს. ამრიგად გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვის მოქმედების ზონაში შედის: გენერატორი, შემკრები სალტები და მისგან გამავალი ელემენტები.

ვინაიდან გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვა წარმოადგენს გენერატორის სარეზერვო დაცვას, ამიტომ მან უნდა გამორთოს გენერატორი და ველის ქრობის ავტომატი.

გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვის მიმართ წაყენებული არის ძალზედ მნიშვნელოვანი მოთხოვნა – მან არ უნდა იმოქმედოს გადატვირთვების და რყევების დროს.

აღნიშნული მოთხოვნის შესაბამისად გენერატორებზე გარე მოკლედ შერთვისაგან დაცვისათვის გამოიყენება მაქსიმალური დენური დაცვა ძაბვით ბლოკირებით და ფილტრული დაცვა (უკუმდმდეგობის დენზე), რომელსაც გააჩნია სამფაზა მოკლედ შერთვისაგან დაცვის დამატებითი კომპლექტი.

ჩვეულებრივი მაქსიმალური დენური დაცვა (ძაბვით ბლოკირების გარეშე) რეაგირებს ხანმოკლე და არა საშიშ გადატვირთვებზე და ამიტომ არ შეიძლება მათი გამოყენება გენერატორის გარე მოკლედ შერთვისაგან დასაცავად, რომლის გამორთვაც გადატვირთვებისა და რყევების დროს დაუშვებელია.

3.3.4. სიმეტრიული გადატვირთვებისაგან დენური დაცვა

ელ.სადგურებში, სადაც არის მუდმივი ოპერატიული პერსონალი, გადატვირთვისაგან დაცვა უნდა მოქმედებდეს სიგნალზე. გადატვირთვა,

როგორც წესი, წარმოადგენს სიმეტრიულ რეჟიმს ამიტომ გადატვირთვისაგან დაცვა შესრულებული არის ერთი დენის რელეს გამოყენებით, რომელიც ჩართული არის გენერატორის ერთ-ერთ ფაზაში. გადატვირთვის შემთხვევაში იმოქმედებს აღნიშნული დენის რელე, მიაწვდის ოპერატიულ “+”-ს დროის რელეს, რომელიც მოქმედებს სიგნალზე. რადგანაც გადატვირთვა შეიძლება გაგრძელდეს ხანგრძლივად, ამიტომ დროის რელე უნდა იყოს თერმიულად მდგრადი. დენის რელეს ამუშავების დენის სიდიდე გამოითვლება ფორმულით $I_{დ.ა.} = K_{მარ} * I_{ნომ.გენ.}$

სადაც: $K_{მარ}$ – არის მარაგის კოეფიციენტი და ტოლი არის 1.05-ს

დროის რელეს დანაყენი აიღება უფრო მეტი ვიდრე გარე მოკლედ შერთვებისაგან დაცვის დროის დანაყენი, იმ პირობით რომ დაცვამ არ გასცეს სიგნალები გარე ქსელში მოკლედ შერთვის დროს.

ელსადგურებში, სადაც არ არის მუდმივი ოპერატიული პერსონალი, გადატვირთვისაგან მაქსიმალური დენური დაცვა უნდა შესრულდეს ორი დროის დაყოვნებით და იმოქმედოს: მცირე დროის დაყოვნებით – სიგნალზე და აღგზნების დენის შემცირებაზე; ხოლო დიდი დროის დაყოვნებით – ამომრთველის და ველის ქრობის ავტომატის გამორთვაზე.

3.3.5. უკუმდევერობის დენისაგან დაცვა.

როგორც ცნობილია სტატორის გრაგნილში დენების არასიმეტრია წარმოადგენს გენერატორისათვის საშიშ რეჟიმს, განსაკუთრებით გენერატორებისათვის ფორსირებული გაციებით. მსგავსი არასიმეტრიები გენერატორში წარმოიქმნება გარე ქსელში ერთფაზა და ორფაზა მოკლედ შერთვების დროს, აგრეთვე დატვირთვის რეჟიმში ერთი ან ორი ფაზის გაწყვეტის შემთხვევაში. გარე მოკლედ შერთვის შედეგად წარმოქმნილი

გაზრდილი დენები იწვევენ გენერატორის სტატორის გადახურებას, ხოლო გარე არასიმეტრიული მოკლედ შერთვის და დატვირთვის რეჟიმში წარმოქმნილი უკუმიმდევერობის დენები როტორში აინდუქტირებენ გრიგალურ დენებს, რომლებიც იწვევენ მისი გრაგნილების და მეტალური ნაწილის საშიშ გადახურებას.

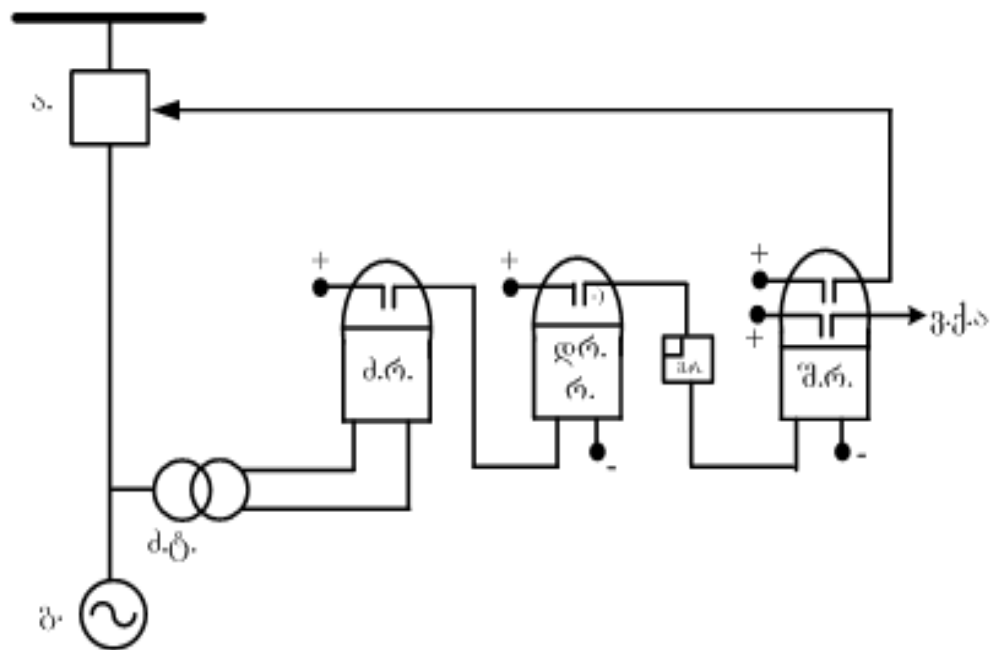
აღნიშნული არასასურველი პროცესების თავიდან აცილების მიზნით დამუშავებული არის და პრაქტიკულად გამოიყენება უკუმიმდევერობის დენებისაგან დაცვა, რომელიც რეაგირებს უკუმიმდევერობის დენის I_2 წარმოქმნაზე. აღნიშნული დაცვა ასრულებს ორი დაცვის ფუნქციას: 1) არასიმეტრიული მოკლედ შერთვების და რეჟიმების დროს როტორის დაუშვებელ სიდიდემდე გადახურებისაგან დაცვა და 2) სტატორის სარეზერვო დაცვა გარე ქსელში არასიმეტრიული მოკლედ შერთვების და აგრეთვე გენერატორში მოკლედ შერთვების დროს.

3.3.6. ჰიდროგენერატორების ძაბვის

აწვევისაგან დაცვა

როგორც ცნობილია ჰიდროგენერატორებზე დატვირთვის მყისურად მოხსნის შემთხვევაში მის მომჭერებზე ძაბვა მნიშვნელოვნად იზრდება და აღწევს 150%-ს ნომინალური სიდიდისაგან. ძაბვის ასეთი მნიშვნელობა საშიშია სტატორის იზოლაციისათვის და საჭირო არის აღმოფხვრილი იქნას რამოდენიმე წამის განმავლობაში. თუ გენერატორები აღჭურვილი არიან აღზნების სწრაფად მოხსნის სპეციალური მოწყობილობებით და აღზნების რეგულირების პარამეტრები სწორად არის შერჩეული, მაშინ ძაბვის მკვეთრად აწვევის დროს შესაძლებელია იგი ავტომატურად დაწეული იქნას ნომინალურ სიდიდემდე დასაშვები დროის ფარგლებში. მაგრამ თუ აღნიშნული

მოწყობილობები არ იმყოფებიან გამართულ მდგომარეობაში, მაშინ გაზრდილი ძაბვის მნიშვნელობა რჩება როგორც გენერატორის სალტეებზე ისე გარე ქსელში, რაც საშიშროებას წარმოადგენს გენერატორის დაზიანებისათვის. ამიტომ ჰიდროგენერატორებზე განხორციელებული არის ძაბვის აწვევისაგან დაცვა (სურ.10). რომელიც მოქმედებს გენერატორის ამომრთველის და ველის ქრობის ავტომატის გამორთვაზე. დაცვა შედგება ერთი ძაბვის (ძ.რ.) რელესაგან და ერთი დროის (დრ.რ.) რელესაგან.



სურ. 10. ჰიდროგენერატორის ძაბვის აწვევისაგან დაცვა

დაცვის ამუშავების ძაბვა შეირჩევა ტოლი $U_{დ.ა.}=(1.5-1.7) U_{ნომ.}$ ვინაიდან ასეთი სიდიდის ძაბვა ხანმოკლე დროის განმავლობაშიც კი მიჩნეული არის საშიშად გენერატორისათვის. დროის (დრ.რ.) რელეზე განხორციელებული არის დანაყენი $t=0.5-1$ წმ.

როგორც ექსპლუატაციის გამოცდილება გვიჩვენებს, აღნიშნულ დროში აღზნების რეგულირება ასწრებს დასწიოს გაზრდილი ძაბვის სიდიდე, ძაბვის

(მ.რ.) რელეს დაბრუნების უდაბ. ძაბვის მნიშვნელობაზე ქვემოთ, რაც გამორიცხავს დაცვის მოქმედებას.

3.4. გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა.

როგორც ავღნიშნეთ, სტატორის გრაგნილის ხელოვნური ასიმეტრიით მუშაობისას ადგილი აქვს სხვადასხვა სახის ელექტრომაგნიტურ პროცესებს, რომლებსაც თან ახლავს მათანაბრებელი დენების წარმოქმნა. გამათანაბრებელი დენები იწვევს ამა თუ იმ რელეური დაცვის ამუშავებას. ამიტომ საჭირო იყო გაგვეკეთებინა ჰიდროგენერატორზე არსებული ყველა რელეური დაცვის მუშაობის ანალიზი. რათა დაგვედგინა თუ რომელ დაცვაზე იმოქმედებდა აღნიშნული რეჟიმი. ამ ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ჰიდროგენერატორის მუშაობა სტატორის გრაგნილის ხელოვნური ასიმეტრიით მოქმედებს მხოლოდ განივ დიფერენციალურ დაცვაზე. რადგან ამ დაცვის შემგრძნობი ორგანო დაყენებულია გრაგნილის პარალელური შტოების ნეიტრალის შეერთებაზე. ნებისმიერი უბალანსობის დენმა და მათ შორის ამ რეჟიმით წარმოქმნილმა გამათანაბრებელმა დენმა, რომელიც შეიკვრება გრაგნილის პარალელური განშტოების ნულოვან შეერთებაში შეიძლება გადააჭარბოს რელეური დაცვის დანაყენს, რაც გამოიწვევს დაცვის ყალბ ამუშავებას. ამიტომ საჭიროა ვიცოდეთ გამათანაბრებელი დენის სიდიდე რათა შევძლოთ ამ დაცვის იმედიანი მუშაობის განსაძღვრა. და ვნახოთ მოუწევს თუ არა ცვლილება რელეური დაცვის დანაყენს გენერატორის ხელოვნური ასიმეტრიით მუშაობის დროს. ნულოვან სალტეში $I_{დ.ა}$ დენების წარმოშობა

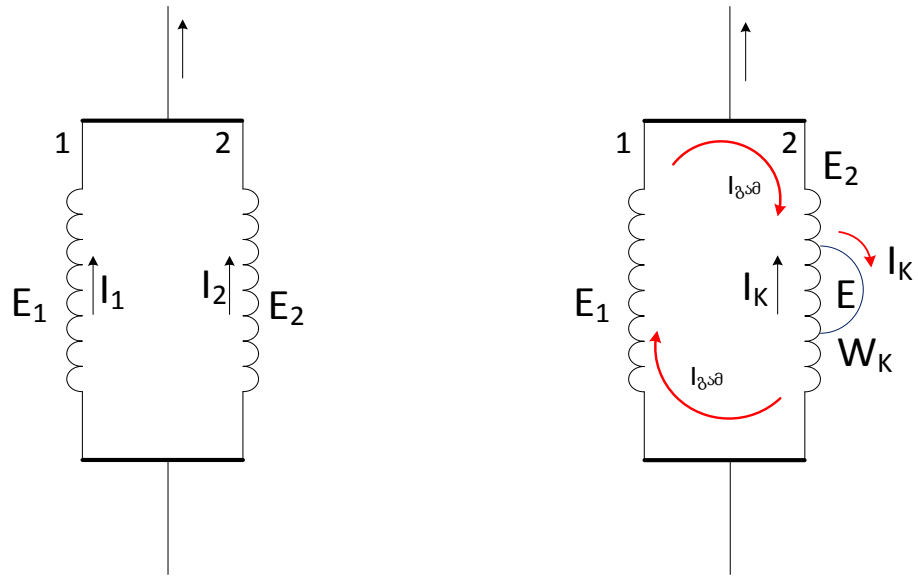
განივი დენური დაცვის დანაყენის მნიშვნელოვან გაუხეშებას იწვევს ცრუ მოქმედების თავიდან აცილების მიზნით, რაც საკვირველია ამცირებს დაცვის ფუნქციონირების საიმედოობას. ეს აიხსნება იმით, რომ შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ისეთ გაუმართაობას, რაც გამოიწვევს დაცვის დამატებით დენს, რომელიც გამათანაბრებელი დენის საწინააღმდეგოდ იქნება მიმართული. ამ შემთხვევაში დენები გამოაკლდება ერთმანეთს და შემდეგ დაცვამ შეიძლება არ იმუშაოს. მთავარია რელეური დაცვის ძირითადი დანიშნულება და მისი ფუნქცია არ იყოს დაქვეითებული.

ხვებზე შორის დამოკლებისას დაცვის განხორციელებას აქვს შეზღუდული გამოყენება, რადგანაც მისი განხორციელებისათვის მარტივი ხერხები არ არსებობს.

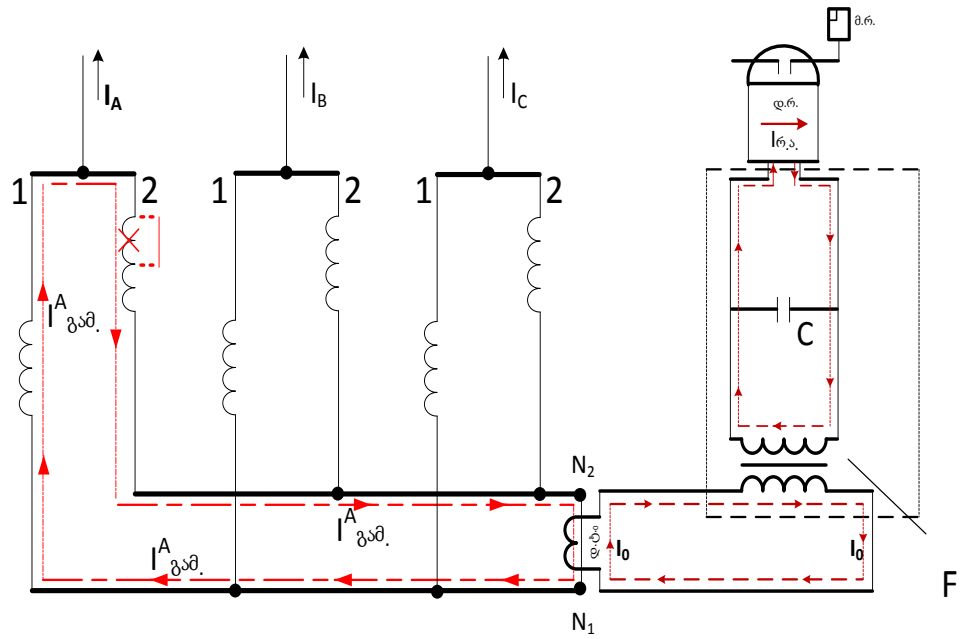
მხოლოდ მძლავრი გენერატორებისათვის, სადაც ცალკეული ფაზები შესრულებული არის გარეთ გამოტანილი ორი ან სამი პარალელური შტოს საშუალებით, დამუშავებული არის დაცვის შედარებით მარტივი და საიმედო სქემები.

გენერატორის ცალკეული ფაზის პარალელურ 1 და 2 შტოებში ნორმალურ რეჟიმში და გარე მოკლედ შერთვის დროს დაინდუქცირდება სიდიდით და ფაზით ერთნაირი ე.მ.ძ.-ბი E_1 და E_2 (სურ. 11). პარალელური შტოების წინააღმდეგობა არის ერთნაირი და ამიტომ შტოებში დენები I_1 და I_2 , ნორმალურ რეჟიმში და გარე მოკლედ შერთვის დროს, აგრეთვე არის ტოლი ერთმანეთის სიდიდით და ფაზით.

(სურ.11. გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა წარმოდგენილია).



ფაზის პარალელურ შტოებს შორის დენების განაწილება.



სურ. 11.

გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა
ერთსისტემიანი დაცვის სქემა.

ერთი ფაზის ხვიების ნაწილის დამოკლების შემთხვევაში W_K დამოკლებულ ხვიებში E_K ე.მ.დ.-ის ზემოქმედებით აღიძვრება მოკლედ შერთვის დიდი დენი I_K , რომელიც ცირკულირებს დამოკლებულ წრედში. [14].

დაზიანებული შტოს წინალობა და ე.მ.დ. მცირდება დამოკლებული W_K ხვიების გამო. შედეგად ირღვევა E_1 და E_2 ე.მ.დ.-ებს შორის არსებული ბალანსი და ამის გამო წარმოიქმნება ე.მ.დ. $\Delta E = E_1 - E_2$, რომლის ზემოქმედებით დაზიანებული ფაზის კონტურში აღიძვრება გამათანაბრებელი დენი.

$$I_{\text{გამათ.}} = \frac{E_1 - E_2}{X_1 + X_2} \quad (3.2).$$

სადაც: X_1 და X_2 არიან 1 და 2 შტოს ინდუქციური წინააღობები; აქტიური წინააღობები მათი სიმცირის გამო მხედველობაში არ მიიღება; ხოლო E_1 და E_2 არიან დაუზიანებელი და დაზიანებული შტოების ე.მ.დ.-ები.

რაც უფრო მცირეა დამოკლებულ ხვიათა რაოდენობა, მით უფრო მცირეა განსხვავება E_1 და E_2 ე.მ.დ.-ებს შორის და შესაბამისად მცირდება გამათანაბრებელი დენის სიდიდე $I_{\text{გამათ.}}$ (2 გამოსახულების თანახმად).

გენერატორის სტატორის პარალელურ შტოებში დენების ტოლობის დარღვევა, რომელსაც ადგილი აქვს ხვიების დამოკლების დროს და გამათანაბრებელი დენის $I_{\text{გამათ.}}$ წარმოქმნა გამოყენებული არის აღნიშნული სახის დაზიანებისას დაცვის განხორციელებისათვის.

გენერატორის ფაზის ხვიებს შორის დამოკლებისაგან დასაცავად გამოყენებული არის განივი დიფერენციალური დაცვა, რომელიც დაფუძნებული არის ორი პარალელური შტოს დენების შედარებაზე. ასეთი შედარება შეიძლება განხორციელდეს დაცვის სამსისტემიანი და ერთსისტემიანი სქემების გამოყენებით.

სამსისტემიან სქემაში გათვალისწინებული არის შტოების დენების შედარება ცალკეულ ფაზებში. ამ მიზნით სქემაში გამოყენებული არის სამი

დენის რელე. ცალკეული რელე ჩართული არის A , B და C ფაზების პარალელური შტოების დენების სხვაობაზე.

ერთსისტემიანი სქემა შესრულებული არის ერთი დიფერენციალური რელეს გამოყენებით, რომელშიც ხდება სამივე ფაზის პარალელური შტოების ჯამური დენების შედარება. 1 შტოს დენების ჯამი $I_{A1} + I_{B1} + I_{C1}$ დიფერენციალურ რელეში შედარებული არის 2 შტოს დენების ჯამთან

$$I_{A2} + I_{B2} + I_{C2}.$$

პრაქტიკაში გავრცელება ჰპოვა განივი დიფერენციალური დაცვის ერთსისტემიანმა სქემამ და ამიტომ იგი განხილული არის ქვემოთ.

ერთსისტემიანი დაცვის სქემა მოცემული არის ნახ. 1ბ-ზე. საგენერატორო ძაბვის მხარეს ფაზაში გრაგნილები შეერთებული არიან ერთმანეთთან და გამოდიან საერთო გამომყვანით; ნეიტრალის მხარეს A , B და C ფაზების სამი პარალელური 1 შტო და სამი პარალელური 2 შტო შეერთებული არიან ვარსკვლავად ცალცალკე ორი გამოყვანილი N_1 და N_2 ნეიტრალით. ეს ნეიტრალები ერთმანეთთან დაკავშირებული არიან ნულოვანი სადენით

$N_1 - N_2$ ნულოვანი სადენის წრედში ჩართული არის დენის ტრანსფორმატორი დ.ტ. მის მეორად გრაგნილთან F ფილტრის გავლით მიერთებული არის დენის (დ.რ.) რელე. ფილტრი ატარებს მხოლოდ 50ჰც სიხშირის დენს და ახშობს მაღალი სიხშირის ჰარმონიკებს, მათ შორის მესამე ჰარმონიკას.

სქემიდან ჩანს რომ $N_1 - N_2$ ნულოვან სადენში დენი I_0 რომელიც კვებავს დენის რელეს დ.რ. ტოლი არის 1 და 2 შტოების ნულოვანი მიმდევრობის დენების სხვაობის

$$I_{\text{ს.}} = (I_{A1} + I_{B1} + I_{C1}) - (I_{A2} + I_{B2} + I_{C2}) = 3I_{01} - 3I_{02} \quad (3.3).$$

სადაც I_{01} და I_{02} არიან 1 და 2 პარალელური შტოების ნულოვანი მიმ/დევრობის დენები.

ნორმალურ რეჟიმში თითოეული ვარსკვლავის ფაზების დენების გეომეტრიული ჯამი,

$$I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 0$$

და

$$I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = 0$$

ტოლი არის ნულის.

გარე ქსელში სამფაზა და ორფაზა მოკლედ შერთვების დროს თითოეულ ვარსკვლავში მოკლედ შერთვის დენების ჯამი აგრეთვე ტოლი არის ნულის.

ამრიგად ორთავე შემთხვევაში დენი $N_1 - N_2$ ნულოვან სადენში ტოლი არის $I_{\text{ს.}} = 0$ ნულის და რელე არ მუშაობს. სინამდვილეში გენერატორის ფაზების პარალელური შტოების ე.მ.დ.-ბის მრუდის ფორმის გარკვეულწილად დამახინჯების გამო წარმოიქმნება მესამე ჰარმონიკის დენები $3I_1^{(3)}$ და $3I_2^{(3)}$. ეს დენები ემთხვევიან ფაზით, იკრიბებიან ნულოვან სადენში $N_1 - N_2$ და წარმოქმნიან ჯამურ დენს

$$3I_1^{(3)} - 3I_2^{(3)} = 3I^{(3)}.$$

პარალელური შტოების ე.მ.დ.-ების

$$E_{A1} \text{ და } E_{A2}, E_{B1} \text{ და } E_{B2}, E_{C1},$$

და E_{C2} არაზუსტი ტოლობის გამო თითოეული ფაზის კონტურში ჩნდება ძირითადი სიხშირის გამათანაბრებელი დენი $I_{\text{გამ.}A}$, $I_{\text{გამ.}B}$, $I_{\text{გამ.}C}$; გამათანაბრებელი დენი და მესამე ჰერმონიკის დენი იკვრებიან თითოეული ფაზის პარალელური შტოების კონტურში და გადიან ნულოვან სადენში $N_1 - N_2$;

$$I_{\text{ს.}} = (3I_1^{(3)} - 3I_2^{(3)}) + (I_{\text{გამ.}A} + I_{\text{გამ.}B} + I_{\text{გამ.}C}) = 3I^{(3)} + I_{\text{გამ.}}$$

(3.4).

მესამე ჰარმონიკის დენები F ფილტრის გამოსასვლელზე არ არსებობენ. გამათანაბრებელი დენი არის 50ჰც სიხშირის და ამიტომ იგი დაბრკოლების გარეშე გადის რელეში და წარმოქმნის უბალანსობის დენს.

$$I_{\text{უბ.}} = I_{\text{გამ.}A} + I_{\text{გამ.}B} + I_{\text{გამ.}C} = I_{\text{გამ.}}$$

(3.5).

დაცვა იმოქმედებს როცა $I_{\text{გამ.}} > I_{\text{დ.ა.}}$ ამიტომ დაცვის არასწორი მოქმედების აღმოსაფხვრელად საჭიროა $I_{\text{დ.ა.}} > I_{\text{უბ.}}$; ერთ-ერთი ფაზის შტოში ხვიების დამოკლების შემთხვევაში, როგორც ნაჩვენები იყო, ირღვევა დაზიანებული ფაზის შტოებში დენების ტოლობა და ჩნდება გამათანაბრებელი დენი, რომელიც გამოითვლება (2) ფორმულით.

ეს დენი გადის ნულოვან სადენში $N_1 - N_2$; და იწვევს რელეში დენის გაჩენას

$$I_{\text{რ}} = \frac{I_{\text{გამ.}}}{n_{\text{ტ}}}$$

დაცვა იმოქმედებს როცა $I_{\text{გამ.}} > I_{\text{დ.ა.}}$

ვინაიდან გამათანაბრებელი დენის სიდიდე მცირდება, დამოკლებული ხვიათა რიცხვის რაოდენობის შემცირებით, დაცვას გააჩნია მკვდარი ზონა. იგი არ მოქმედებს

როცა:

$$I_{\text{გამ.}} > I_{\text{დ.ა.}}$$

დაცვა მოქმედებს არა მარტო ხვიების დამოკლების დროს, არამედ დაცვამ შეიძლება იმოქმედოს აგრეთვე სტატორში ფაზათაშორის მოკლედ შერთვების და ერთი ფაზის შტოებს შორის დამოკლების დროს, რადგანაც ასეთ დროს ირღვევა ე.მ.დ.-ბის და დაზიანებული ფაზის პარალელური შტოების

დენების ტოლობის პირობები. ნულოვან სადენის დენის ტრანსფორმატორი დ.ტ., რომელიც კვებავს დაცვის დენურ წრედს, შეირჩევა დატვირთვის დენის გათვალისწინების გარეშე, რადგანაც მასში დენი ჩნდება ხანმოკლე დროით, მხოლოდ დაზიანების წარმოქმნის დროს. მისი ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი შეირჩევა შემდეგი გამოსახულებით

$$n_{ტ} = \frac{0,25 \cdot I_{ნომ.გ.}}{5} \quad (3.6).$$

დაცვის ამუშავების დენის სიდიდე უნდა იყოს მეტი ვიდრე უბალანსობის დენი, რომელიც ჩნდება რელეში გარე მოკლედ შერთვის დროს

$$I_{დ.ა.} = K_{იმ} \cdot I_{უბ.მაქ.}$$

ექსპლოატაციის გამოცდილებიდან გამომდინარე დებულობენ

$$I_{დ.ა.} = (20 \div 30) I_{ნომ.გ.}$$

დაცვის განხორციელებისათვის გამოყენებული არის PT – 40 ტიპის რელე, რომლის სქემაც ნაჩვენებია არის ნახ.1ბ.-ზე. რელეს გრაგნილის წინაღობა და C კონდენსატორის ტევადობა შერჩეული არის ისე, რომ მესამე ჰარმონიკის დენები, რომლებიც ცირკულირებენ N_1 და N_2 ნეიტრალების შემაერთებელ სადენში ძირითადად იკვრებიან C კონდენსატორში. ამის გამო რელეს ამუშავების $I_{დ.ა.}$ დენი 150ჰც სიხშირის დენის დროს არის 10-ჯერ უფრო დიდი ვიდრე 50ჰც. სიხშირის დენის დროს. რელეს ამუშავების დენის სიდიდე რეგულირდება დ.რ.-ს ტრანსფორმატორის გამომყვანებით და რელეს ზამბარით (1.75÷8.8) ა-ს ზღვრებში.

დაცვის ძირითად დადებით თვისებას წარმოადგენს ის რომ იგი არის მარტივი და სწრაფმოქმედი. ხოლო მის უარყოფით მხარედ ითვლება მკვდარი ზონის არსებობა [14,15,16].

3.5. თანამედროვე ციფრული SEL-300G გენერატორის რელე.



სურ. 12. SEL-300G გენერატორის რელე.

გენერატორის დაცვა, მონიტორინგი და კონტროლი.

- **მახასიათებლები და უპირატესობები**

მოწყობილობა უზრუნველყოფს ფაზათა და ნეიტრალის დაცვებს ერთიანად და 100 %-იანი დამიწებისგან დაზიანების აღმოჩენას. შექმნილს შესაძლებელია მივუთითოთ დიფერენციალური და თერმული მონიტორინგის სისტემები მნიშვნელოვანი მანქანა-დანადგარებისთვის. ასინქრონული სვლის, აღზნების დაკარგვის, გადააღზნების, სიხშირის მონიტორინგი გვაძლევს აბნორმალური რეჟიმების აღმოჩენის საშუალებას.

მოწყობილობას შეუძლია ზუსტად აღმოაჩინოს გენერატორის დამიწება. კონფიგურირება და მონაცემების შეცვლა შესაძლებელია AcSELeRator QuickSet Sel-5030 პროგრამული უზრუნველყოფის მეშვეობით.

- გენერატორის ინფორმაციებთან გაზრდილი ხელმისაწვდომობა

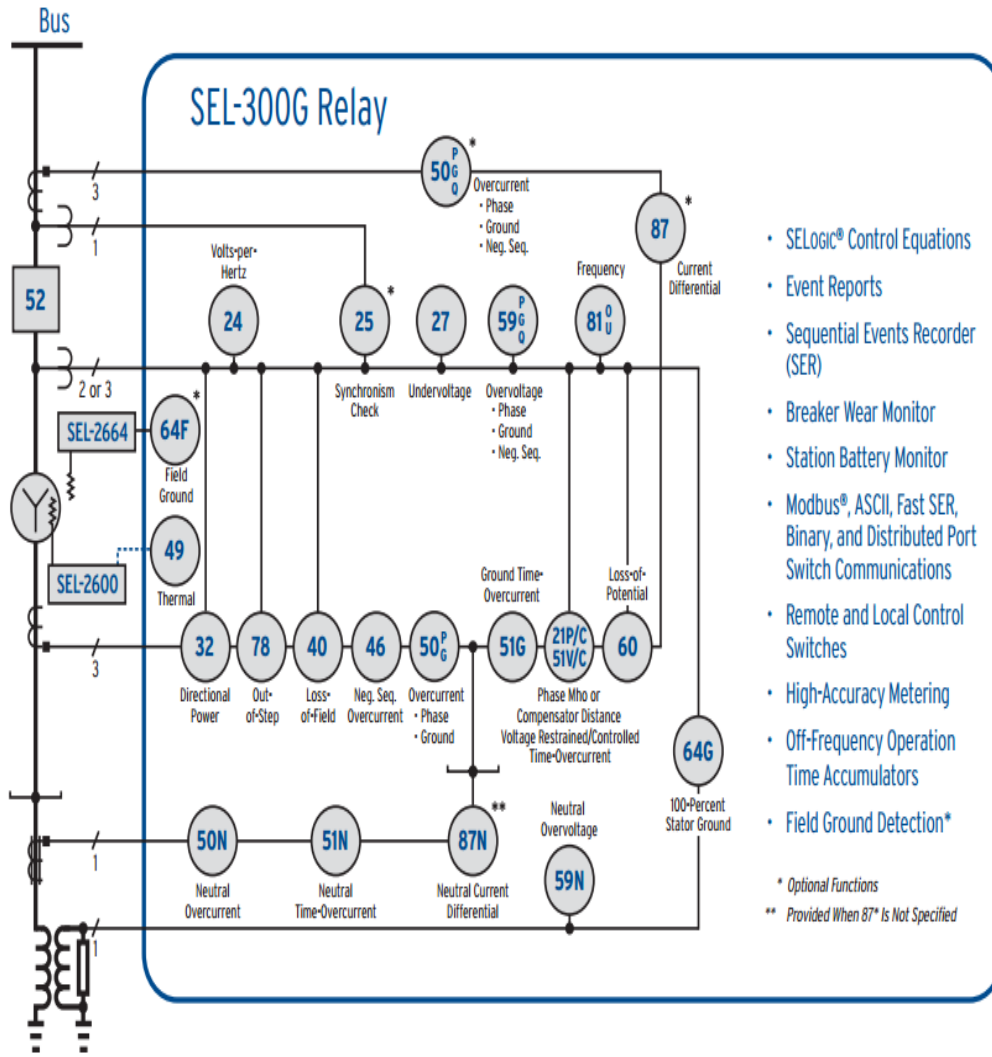
მარტივი დაზიანებების და სისტემის მიწოდების/გადაცემის ანალიზის შესაძლებლობა ოსცილოგრამიან მოვლენათა დასკვნებში და მოვლენათა გრაფიკული ჩამწერი (SER) მოწყობილობაში არის შესაძლებელი.

შესაძლებელია რეალურ დროში დავაკვირდეთ სიხშირეს, გენერატორის ჩართვის საათების რაოდენობას(რამდენი საათია რაც ჩართულია) მაქსიმალური დატვირთვის პერიოდს(საათებში) და ასევე მნიშვნელოვანი ინფორმაცია და მონაცემები.

ასევე აქვს შესაძლებლობა გაზომოს ძაბვა, დენი, სიმძლავრე, სიმძლავრის ფაქტორი. მოწყობილობას შეუძლია უზრუნველყოს 12-მდე მოწყობილობის/დანადგარის ტემპერატურის მონიტორინგი SEL-2600 Series RTD მოდულის მეშვეობით.

- უზრუნველყოფს დაცულ დისტანციურ მართვასა და მონიტორინგს.

გამოვიყენოთ Modbus, ASCII კომუნიკაცია, და SEL SER შესაძლებლობებით რათა შევძლოთ კონტროლი, მონიტორინგი და განგაშების დაკვირვება.

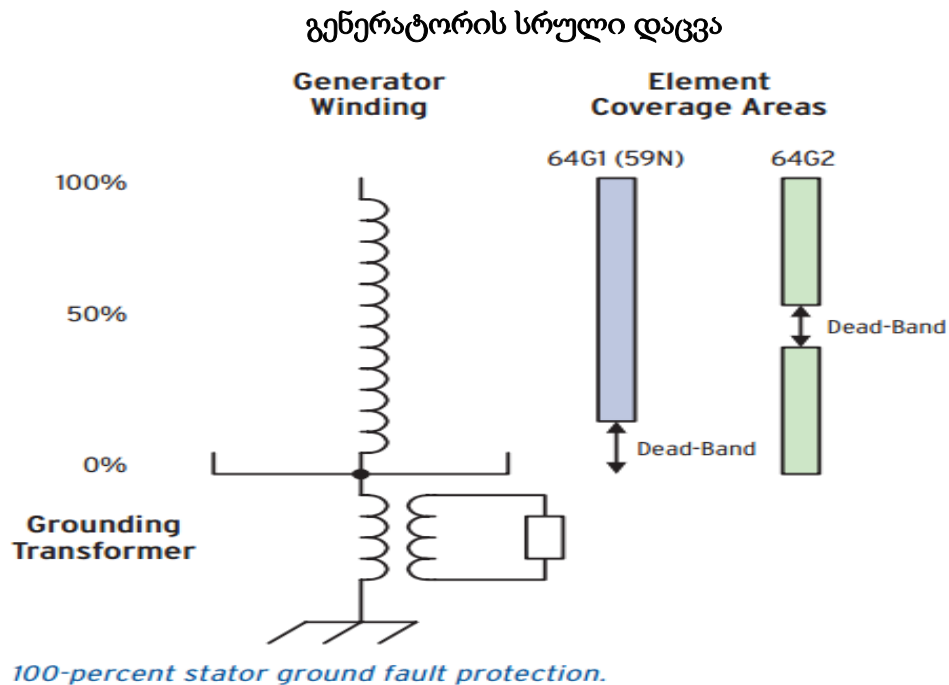


სურ. 13. ნაჩვენებია SEL-300G შეერთების სქემა

შევზღუდოთ აღჭურვილობის დაზიანების ალბათობა და დავაჩქაროთ შეკეთების სიჩქარე მაღალ სიჩქარიანი დაცვებით. შესაძლებელია დიფერენციალური დაცვის ოპციას. SEL-300G თავსდებათა ყველა სახის, ზომისა თუ კონფიგურაციის გენერატორებისთვის.

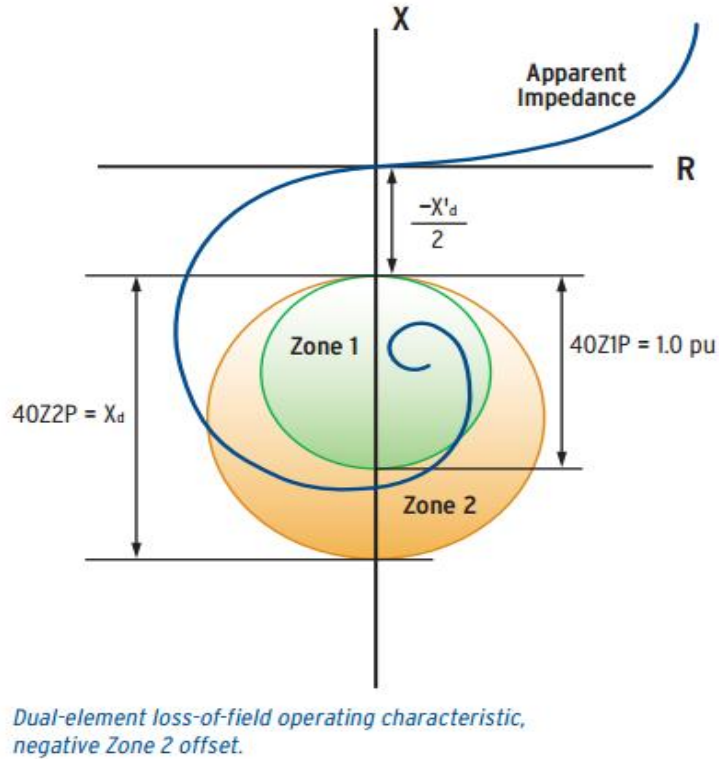
- დენისა და ძაბვის ელემენტები იცავენ დიდსა და პატარა დანადგარებს

- ნებაყოფლობითი ოპცია დიფერენციალური დაცვისა უზრუნველყოფს მგრძნობიარე და სწრაფ დაცვას გენერატორებისთვის და უჯრედის ტრანსფორმატორებისთვის. ჰარმონიკების მახლოკირებელი მოწყობილობა უზრუნველყოფს დაცვას ტრანსფორმატორისა და გენერატორის დიფერენციალურ ზონაში.
- 100%-იანი სტატორის დამიწებისაგან დაცვა იყენებს ფუნდამენტალურ და მე-3 რიგის ჰარმონიკის ძაბვის სიგნალებს.
- განუწყვეტლივ ზომავს ფაზა-მიწა წინაღობას SEL-2664 - ის მეშვეობით. შეუძლია ზუსტად აღმოაჩინოს დაზიანება იმის მიუხედავად გენერატორი ჩართულია თუ გამორთული.



სურ. 14. ნაჩვენებია SEL-300G დაცვის სქემა რომელიც განუწყვეტლივ ზომავს ფაზა-მიწა წინაღობას SEL-2664 - ის მეშვეობით.

- ფაზის დაკარგვისგან დაცვა წინასწარ აღმოფხვრავს როტორის გადახურებას და სისტემის არასტაბილურ მუშაობას, გამოწვევებული ძალიან დაბალი აღზნებით.



სურ. 15. ფაზის დაკარგვისგან დაცვა.

გამარტივებული დაყენება/რეგულირება და დიაგნოსტიკა

- შეგვიძლია გამოვიყენოთ ACSELERATOR QuickSet-ი რათა დავაკონფიგუროთ გენერატორის დაცვა. დანაყენის, კონფიგურაციის, და ლოგიკის ცვლილების განხორციელების შესაძლებლობა.
- acSelerator Quickset-ის მეშვეობით HMI-ზე უნდა გვექონდეს შესაძლებლობა ვნახოთ რეალურ დროში პოლარობა და კავშირები.

მოვლენათა ანალიზი, ჩაწერა და განგაში.

უმოკლესი შეკეთების დრო და დიაგნოსტიკა უზრუნველყოფს ფინანსური ზარალის შემცირებას და უმოკლეს ხანში მუშა რეჟიმში ჩაყენება. მოწყობილობამ უნდა უზრუნველყოს დაზიანების სწრაფი დაფიქსირება და მისი ავარიული გამორთვა და აუცილებლად უნდა უზრუნველყოს მოვლენის ჩაწერა. მოწყობილობის პროგრამულმა უზრუნველყოფამ უნდა უზრუნველყოს დენების, ძაბვების და კუთხის გაზომვები.

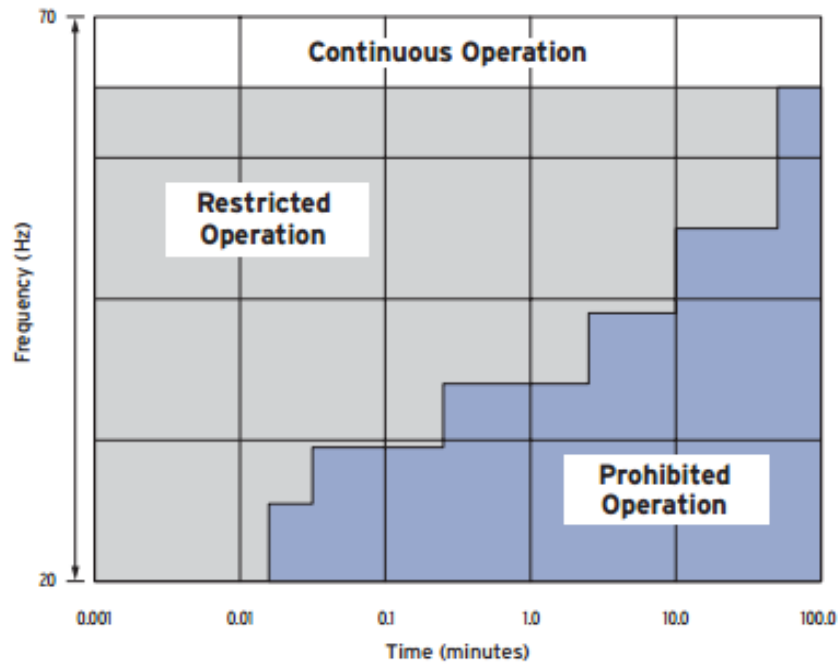
- გაუმჯობესებული ანალიზის საშუალება არანაკლებ 512 ოპერაციისა(მოვლენა), აქედან 96 შიდა და გარე მოვლენები.
- გამოვიყენოთ ჩაშენებული SER მოწყობილობა რომელიც უზრუნველყოფს გაშვება და გამორთვის ჩანაწერის გაკეთებას.
- მივიღოთ განგაშის სიგნალი
- გამოვიყენოთ AcSelerator QuickSet პროგრამული უზრუნველყოფა რათა მოხდეს მოვლენების ანალიზი. ან უფრო დეტალური განხილვისთვის გამოვიყენოთ AcSelerator Analytic Assistant SEL-5601 პროგრამა. მოვლენის ჩანაწერი შესაძლებელია 180 ციკლამდე.

სისტემის სარეზერვო დაცვა

- გამოვიყენოთ დაცვის წრიული მახასიათებელი კვების წყაროს დაცვისთვის რათა სტაბილურად შეძლოს სამკუთხა/ვარსკლავა შეერთების დროს სტაბილური მუშაობა.
- უზრუნველყოთ მაქსიმალური დენური დაცვა ძაბვის კონტროლის პირობით.

არანორმალური(აბნორმალური) ოპერაციისას დაცვა

- SEL-300G ზომავს და იწერს ნომინალური სიხშირისგან განსხვავებულ სიხშირის სიდიდეს რათა შემდგომში მოხდეს ამ ინფორმაციის გამოყენება სისტემის დასასტაბილურებლად და მდგრადი სისტემის შესანარჩუნებლად.
- გააჩნია დაცვა კვების წყაროს შემთხვევითი ჩართვისას. SEL-300G-ს გააჩნია ფუნქცია, ჩაწერილია ლოგიკაში და აქტიურდება მაშინ როცა გენერატორი გამორთულია.



Prevent vibration or damage with flexible alarms for off-nominal frequency.

სურ. 16. არანორმალური(აბნორმალური) ოპერაციისას დაცვა.

3.5.1. SEL-300G გენერატორის რელეს

ძირითადი სპეციფიკაციები.

ცვლადი ძაბვის ინფუთები:

80-208V, ნომინალურია 4 სადენიანი ვარსკლავა შეერთებისას;

80-140V, ნომინალურია 3 სადენიანი სამკუთხა შეერთებისას;

300V, სამფაზა ლიმიტი, 4 სადენიანი ვარსკლავა შეერთებისას;

300V, სამფაზა ლიმიტი, 3 სადენიანი სამკუთხა შეერთებისას;

365Vac 10 წამის განმავლობაში;

300V განუწყვეტლივ სინქრონიზმის ძაბვისთვის;

ტვირთები :

- 0.13VA- 67V -ზე;

- 0.45VA-120V-ზე;

- 0.80VA-300V-ზე;

კვების წყარო

- 125/250V 85-350Vdc ან 85-264Vdc;

- 48/125V 38-200Vdc ან 85-140Vdc;

- 24/48V 18-60Vdc

25W მაქსიმუმ ყველა კვების წყაროსთვის.

ცვლადი დენის ინფუთები

5ა - ნომინალური

15ა განუწყვეტლივ რეჟიმში, 500ა 1წმ-ის განმავლობაში. 1250ა 1 ციკლის განმავლობაში.

ტვირთები :

- 0.27 VA -5ა-ზე;

- 2.51 VA- 15ა-ზე;

1ა- ნომინალური

3ა-განუწყვეტილივ(ჩვეულებრივ მუშა რეჟიმში), 100ა 1 წმ-ის განმავლობაში, 250ა 1 ციკლის განმავლობაში.

ტვირთები:

- 0.13VA – 1 ა-ზე;
- 1.31VA- 3 ა-ზე;

მოწყობილობის ნომინალური მუშაობის ტემპერატურული ზღვრები

-40 -დან - +85 გრადუს ცელსიუსამდე (-40-დან +185 გრადუს ფარენჰეიტამდე);

4. გამათანაბრებელი დენების გაანგარიშება

იმისათვის რომ განვრავდროთ გენერატორის რელეური დაცვის დანაყენის კოეფიციენტის ცვლილების დიაპაზონი, საჭიროა ვიანგარიშოთ გამათანაბრებელი დენები.

ვანალიძებთ რა პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს გამორთული გაუმართავი ღეროთი მომუშავე გენერატორის ფაზაში, შეიძლება აღინიშნოს, რომ „გადამოკლების” დაყენების გზით გრაგნილში ხვის გამოთიშვა ფაქტიურად გამორთავს ფაზის ერთ-ერთი პარალელური განშტოების ორ ღეროს, ან ერთ კოჭას. აქედან გამომდინარე მთელ პარალელურ განშტოებაში, ისე როგორც სხვა ფაზების დანარჩენ ოთხ განშტოებაში აღიძვრება ე.მ.ძალა, რისი მოქმედი მნიშვნელობაც იქნება

$$E_g = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w \cdot k_w \cdot \varphi_m \quad (4.1).$$

სადაც:

k_w - ფაზის საგრაგნილე კოეფიციენტი, რომელიც შედგება გრაგნილის დამოკლებისა და განაწილების კოეფიციენტებისაგან; $k_w = k_y \cdot k_p$

φ_m - ნახევარპერიოდული მაგნიტური ნაკადის ამპლიტუდა;

w - ფაზის მიმდევრობით ხვიების რაოდენობა,

$$w = \frac{2 \cdot p \cdot w_k \cdot q}{a}$$

ერთ-ერთი მიმდევრობითი კოჭების ჯგუფის ფაზის „აღდგენილ“ განშტოებაში იქნება ერთი ხვით ან კოჭით ნაკლები, ვიდრე დანარჩენ ჯგუფებში. კოჭური ჯგუფის ე.მ.ძ-ის მნიშვნელობა $\frac{2 \cdot p}{a}$ - ჯერ ნაკლები იქნება, ვიდრე $E_{ფ}$.

$$E_{\mathcal{X}} = q \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_{\mathcal{J}} \cdot k_y \cdot k_p \cdot \varphi_m \quad (4.2)$$

გამომდინარე აქედან შემცირებული ჯგუფისათვის

$$E'_{\mathcal{X}} = (q-1) \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_{\mathcal{J}} \cdot k_y \cdot k'_p \cdot \varphi_m \quad (4.3)$$

ვნაოთ, შეიძლება თუ არა k'_p ჩვენი შემთხვევისათვის, როცა არ იცვლება კუთხეები კოჭებს შორის და იცვლება მხოლოდ კოჭების რაოდენობა ჯგუფში

$$\alpha z = \frac{tz}{\tau} \cdot \pi = \frac{2\pi}{z} \cdot P \quad (4.4)$$

ფაზის გრაგნილის მ.მ.ძ (მაგნიტომამოძრავებელი ძალა) -ის ანალოგიურად [21,22] შევასრულოთ შეჯამება ჯგუფში მყოფი კოჭების ე.მ.ძ-ების ძირითადი ჰარმონიკებისა (იხ.სურ.17).

4 კოჭისაგან შემდგარი კოჭური ჯგუფის განაწილების კოეფიციენტი ძირითადი ჰარმონიკულისათვის:

$$k_w = \frac{E_{\mathcal{X}m.}}{q \cdot E_{1m}} = \frac{\sin \frac{q \cdot \alpha z}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha z}{2}} \quad (4.6)$$

იგივე ნახაზის მიხედვით, მაგრამ $q' = 2$ შემთვევისათვის და იგივე αz კუთხეებისათვის, OA უცვლელი რჩება, ხოლო

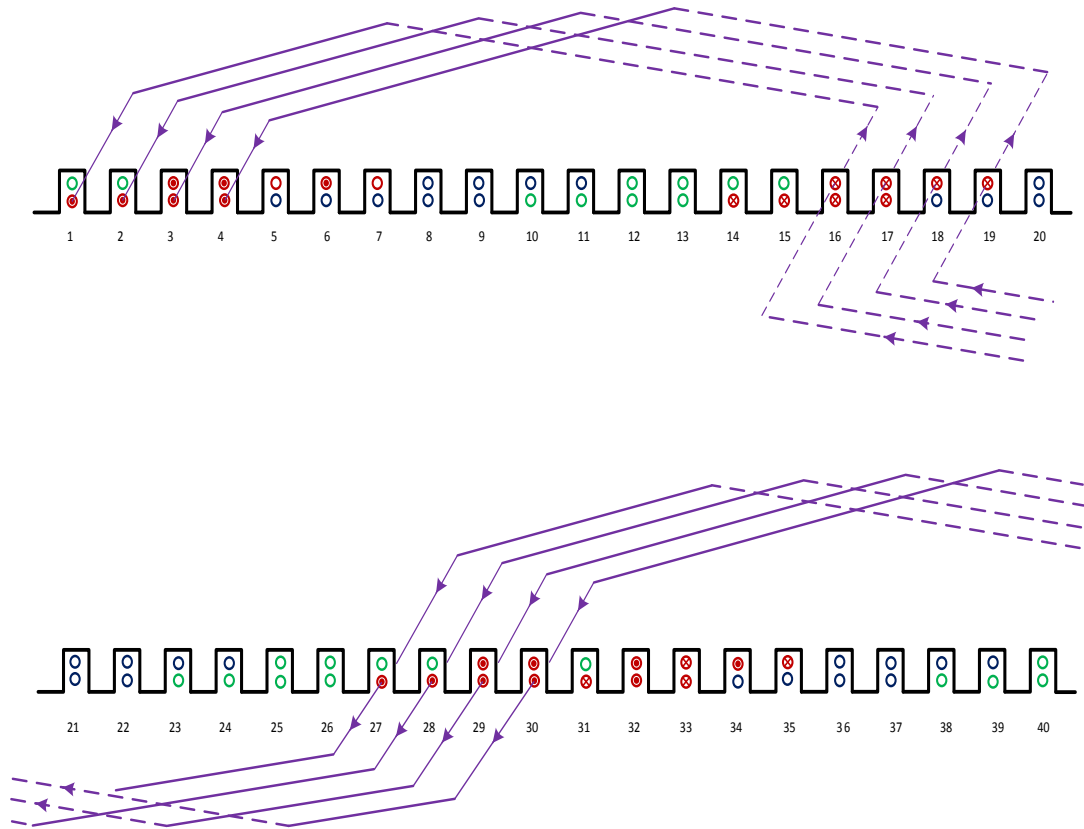
$$E'_{\mathcal{X}m.} = 2(OA) \cdot \sin \frac{q' \cdot \alpha z}{2} = E_{1m} \cdot \frac{\sin \frac{q' \cdot \alpha z}{2}}{q' \cdot \sin \frac{\alpha z}{2}}; \quad (4.7)$$

$$k'_{p1} = \frac{E'_{\mathcal{X}m.}}{q' \cdot E_{1m}} = \frac{\sin \frac{q' \cdot \alpha z}{2}}{q' \cdot \sin \frac{\alpha z}{2}} \quad (4.8)$$

ამგვარად კოჭური ჯგუფის ე.მ.ძ-ის განსაზღვრისას არ შეიძლება უბრალოდ ე.მ.ძ-ის შემცირება იმ კოჭების რიცხვის მიხედვით, რომლებიც აკლია, არამედ საჭიროა გათვალისწინებული იქნას განაწილების კოეფიციენტის k'_p -ს ახალი მნიშვნელობა. გამომდინარე აქედან „დაზიანებული“ კოჭური ჯგუფის ე.მ.ძ-ის მოქმედი მნიშვნელობა იქნება

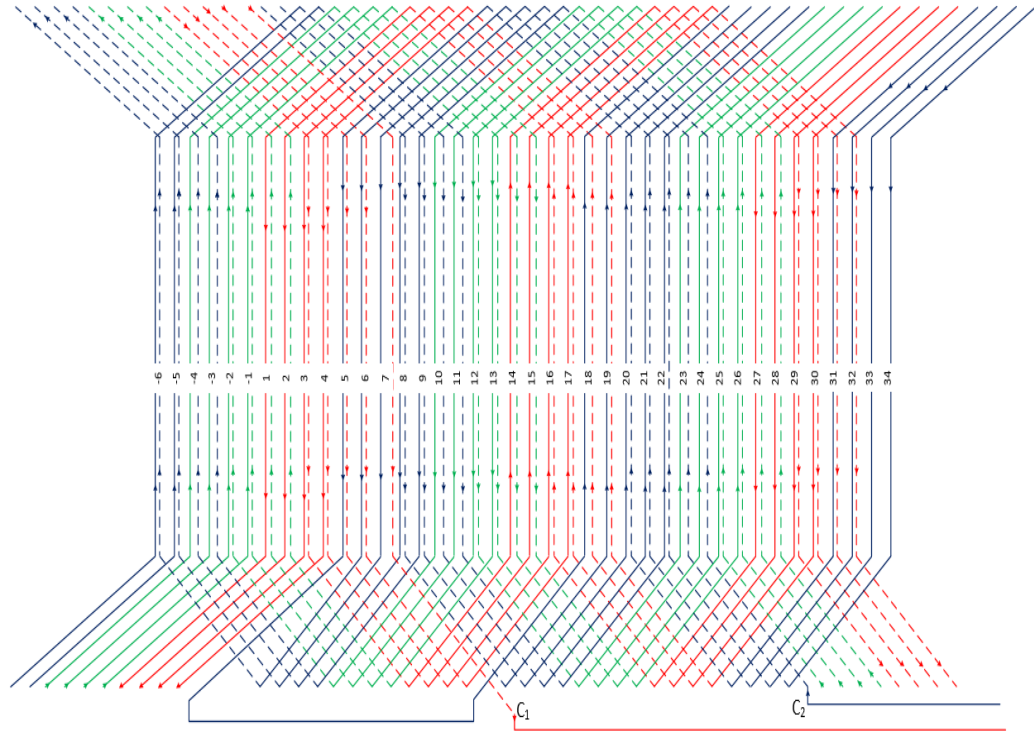
$$\frac{E'_{\mathcal{X}}}{E_{\mathcal{X}}} = \frac{(q-1)}{q} \cdot \frac{k'_p}{k_p} \quad (4.9)$$

ნაწილი სხვა, დაუზიანებელი კოჭური ჯგუფებისა ხრამჰეს-II-ის (წილადი რიცხვით q) გენერატორის გრაგნილს აქვს „დიდი“ (5_5 კოჭით) და „მცირე“ (4_4 კოჭით) კოჭური ჯგუფები. იხილე სურ.18.



სურ. 18. დრმულეებში სხვადასხვა ფაზის ღეროების განაწილება

განვიხილოთ ყველაზე რთული შემთხვევა, როცა არა გვაქვს ერთი კოჭი „მცირე“ ჯგუფში. ეს არის ყველაზე უფრო მოსალოდნელი შემთხვევა, რადგან „მცირე“ კოჭური ჯგუფების რაოდენობა გაცილებით მეტია, ვიდრე „დიდისა“. ამას გარდა ხრამჭეს-II-ის გ- II გენერატორზე სწორედ ამ ჯგუფიდან იყო დაზიანებული ღერო(იხ. სურ.19).



სურ. 19. ჰიდროგენერატორის ტალღური გრაფილი.

$$k_p = \frac{\sin \frac{4 \cdot \pi \cdot Z}{180}}{4 \cdot \sin \frac{\pi \cdot Z}{180}} = \frac{0,469}{4 \cdot 0,122} = 0,962 ;$$

$$k'_p = \frac{\sin \frac{3 \cdot \pi \cdot Z}{180}}{3 \cdot \sin \frac{\pi \cdot Z}{180}} = \frac{0,358}{3 \cdot 0,122} = 0,978$$

გამომდინარე აქედან

$$\frac{E'_{\mathcal{X}}}{E_{\mathcal{X}}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{0,978}{0,962} = 0,762$$

ანუ ცოტათი მეტი $\frac{3}{4}$ -ზე.

თუ კი ავიღებთ კოჭური ჯგუფების გასაშუალებულ მნიშვნელობას რომელიც შეესაბამება ღეროების რაოდენობას პოლუსზე და ფაზაზე $q = 4 \frac{2}{7}$ მაშინ k_p -ს განსაზღვრისას საჭიროა ჩავთვალოთ $q_3 = q \cdot d$ და ადგილი ექნება:

$$k_p = \frac{\sin \frac{q \cdot \vartheta \cdot \pi \cdot p}{z}}{q \vartheta \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{z}} = \frac{-0,5}{30 \cdot 0,122} = -0,138 ;$$

$$k'_p = \frac{\sin \frac{(q \vartheta - 1) \cdot \pi \cdot p}{z}}{(q \vartheta - 1) \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{z}} = \frac{-0,390}{29 \cdot 0,122} = -0,11 ;$$

$$\frac{E'_x}{E_x} = \frac{(q \vartheta - 1)}{q \vartheta} \cdot \frac{k'_p}{k_p} = \frac{29}{30} \cdot \frac{-0,11}{-0,138} = 0,77$$

როგორც ვხედავთ, ეს მნიშვნელობაც დიდად არ განსხვავდება 0,75-გან, ამიტომ ზოგიერთი დაშვებებით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ე.მ.ძ. წარმოქმნილი გრაგნილის ფაზების ჯანმრთელ და დაზიანებულ შტოებში, ჩვენს შემთხვევაში შეიძლება ჩაითვალოს, რომ პრაქტიკულად განსხვავდება მხოლოდ ხვიის ან კოჭის ე.მ.ძ.-ის ტოლი სიდიდით:

$$E_{\mathcal{J}} = \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot \psi_{\mathcal{J}m} = \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot w_{\mathcal{J}} \cdot k_y \cdot \varphi_m \quad (4.10)$$

ანდა კომპლექსური ფორმით:

$$\dot{E}_{\mathcal{J}} = -j \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot \dot{\psi}_{\mathcal{J}m} \quad (4.11)$$

სადაც: $\dot{\psi}_{\mathcal{J}m}$ - მაქსიმალური ნაკადშეჭიდულობა კოჭასთან.

ნაჩვენები ფაქტორული სიდიდეების პროექციები დროის კომპლექსური სიბრტყის მოქმედ ღერძზე, შეთავსებული დროის ღერძთან, ტოლია შესაბამისი მყისიერი მნიშვნელობისა:

$$\psi = R_e(\dot{\psi}_{\mathcal{J}m}) = R_e[\dot{\psi}_{\mathcal{J}m} \cdot e^{j(\omega t - \alpha_{\mathcal{J}})}] \quad (4.12)$$

$$e = R_e(\sqrt{2} \cdot \dot{E}_{\mathcal{J}}) = R_e[\sqrt{2} \cdot E_{\mathcal{J}} \cdot e^{j(\omega t - \alpha_{\mathcal{J}} - \frac{\pi}{2})}] \quad (4.13)$$

ამრიგად, ნაჩვენები განსხვავება ე.მ.ძ-ებისა პარალელურად შეერთებულ ფაზების შტოებს შორის, მათში გამათანაბრებელ დენს $I_{გაბ}$ იწვევს. ამ დენს

იწვევს შტოებში საპირისპირო პოლარულობის ძაბვების ვარდნა, რასაც საბოლოო ჯამში მივყავართ პარალელურ შტოებში ძაბვების გაწონასწორებისაკენ $U'_{\Phi} = U''_{\Phi} = E_{fcp}^{g,d}$ რასაკვირველია დაზიანებული ფაზის ძაბვა ნაკლები იქნება „ჯანმრთელისაზე“, რომელიც გენერატორის უქმი სვლის დროს უტოლდება აღძრულ ე.მ.ძალას E_f და ერთმანეთისაგან ჩამორჩენილ სივრცულ და ელექტრულ კუთხეს 120° .

განვიხილოთ, რას წარმოადგენს „დაზიანებული“ ფაზის პარალელურ განშტოებათა კონტურში გამათანაბრებელი დენის გზის წინაღობა.

როგორც ცნობილია, სინქრონული მანქანის ღუზის გრაგნილის ფაზას აქვს აქტიური წინაღობა და განსაზღვრული ინდუქტიური წინაღობა, რომელიც დაკავშირებულია ურთიერთინდუქციების ველებთან და ღუზის გრაგნილის დენებისაგან გაფანტვასთან. აღზნებული გენერატორის უქმი სვლის განხილულ შემთხვევაში, გამათანაბრებელი დენი, რომელიც იკვრება დაზიანებული ფაზის პარალელურ განშტოებათა კონტურში, გარდა აქტიური წინაღობისა, დაკავშირებული იქნება გრაგნილის ფაზის გაფანტვის ინდუქტიურ წინაღობასთან. მიახლოებითი თანატოლობის დროს ფაზის შტოებში მთავარი ინდუქციური წინაღობის გრძივი და განივი ღერძების გასწვრივ და მათში საპირისპიროდ მიმართული გამათანაბრებელი დენების შემთხვევაში, ამ გრაგნილების ურთიერთინდუქციის მაგნიტური ველები იქნებიან დაკომპენსირებული და ფაზის განშტოებების კონტურში მარეზულტირებელი ნაკადი თითქმის ნულის ტოლი იქნება.

აქედან გამომდინარე, დაზიანებული ფაზის კონტურში გამათანაბრებელი დენი ძირითადად განისაზღვრება ფაზის განშტოებების აქტიური წინაღობით და მათი გაფანტვის ინდუქტიური წინაღობით. ეს გარკვეულად ჩანს სურ.20-ზე,

სადაც გენერატორ $CB \frac{430}{210} - 14$ -თვის ნაჩვენებია A ფაზის შტოებში გამათანაბრებელი დენი. აღმოჩნდა, გრაგნილის სქემა ისეთია, რომ ფაზის ნაჩვენებ განშტოებებში მიმდინარეობს ღრმულეებში ღეროების რიგრიგობითი ცვლა.

ამრიგად მაგნიტური ნაკადები, რომლებიც დაკავშირებულია ფაზაში გამათანაბრებელ დენტან, იკვრება ღეროების გაფანტვის ნაკადების გზაზე, რამდენადაც მათი პერიოდულობა კბილანური რიგის ჰარმონიკულებით განისაზღვრება.

4.1 ჰიდროგენერატორის ელექტრომაგნიტური პროცესის განხილვა

განვიხილოთ ელექტრომაგნიტური პროცესები „გამოკვეთილ-პოლუსებიან“ მანქანაში (გამარტივების მიზნით გაჯერებას მხედველობაში არ ვიღებთ).

ღუზის დენის ურთიერთინდუქციის მაგნიტური ველი წარმოდგენილია დამოუკიდებელი ველების ჯამის სახით, რომლებიც წარმოიქმნება სიგრძივ და განივ შემადგენლობაში.

ურთიერთინდუქციის შესაბამისი ე.მ.დ.

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} \quad (4.14)$$

მაშინ, ე.მ.დ. ღუზის გრაგნილში:

$$\dot{E}_f + \dot{E}_\sigma + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I} \cdot R \quad (4.15)$$

E_f ამ განტოლებაში განისაზღვრება უქმი სვლის გასწორებული დახასიათებით

$$E_f = f(F_\delta)$$

ღუზის გაფანტვის ე.მ.ძ.

$$\dot{E}_\sigma = -jX_\sigma \cdot \dot{I} = -j \frac{w \cdot \psi_{\sigma m}}{\sqrt{2}} \quad (4.16)$$

\dot{E}_{ad} და \dot{E}_{aq} შეიძლება განისაზღვროს ხვადსხვანაირად [21,22], მაგრამ უფრო მოსახერხებელია განისაზღვროს მთავარი ინდუქტიური წინაღობით X_{ad} და X_{aq}

$$\dot{E}_{ad} = -jX_{ad} \cdot \dot{I}_d ; \dot{E}_{aq} = -jX_{aq} \cdot \dot{I}_q \quad (4.17)$$

$$X_{ad} = 2\pi f \cdot L_{ad} = \frac{4 \cdot \mu_0}{\pi \cdot p} \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \lambda_{ad} \quad (4.18)$$

სადაც:

λ_{ad} - ღრეჩოს გამტარობის კოეფიციენტი გრძივი ღერძის გასწვრივ, რომელიც ტოლია: $\lambda_{ad} = k_d \cdot \tau \cdot l_\delta / (k_\delta \cdot \delta) = k_d \cdot \lambda_\delta$

k_d - ველის ფორმის კოეფიციენტი გრძივი ღერძის გასწვრივ;

λ_δ - თანაბარი ღრეჩოს გამტარობის კოეფიციენტი,

$\lambda_\delta = \frac{\tau \cdot l_\delta}{k_\delta \cdot \delta}$ - ერთ პოლუსზე.

$$X_{aq} = 2\pi f \cdot L_{ad} = \frac{4 \cdot \mu_0}{\pi \cdot p} \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \lambda_{aq} \quad (4.19)$$

სადაც: $\lambda_{aq} = k_d \cdot \tau \cdot l_\delta / (k_\delta \cdot \delta) = k_d \cdot \lambda_\delta$ - ღრეჩოს გამტარობის კოეფიციენტი განივი ღუზის გასწვრივ;

k_q - ველის ფორმის კოეფიციენტი განივი ღერძის გასწვრივ.

ძირითადი განტოლებები შეიძლება წარმოდგენილი იქნას წინააღობებისა და დენების გათვალისწინებით:

$$\dot{E}_f = \dot{U} + R \cdot \dot{I} + jX_\sigma \cdot \dot{I} + jX_{aq} \cdot \dot{I}_q + jX_{ad} \cdot \dot{I}_d \quad (4.20)$$

ანდა

$$\dot{E}_f = \dot{U} + R \cdot \dot{I} + jX_q \cdot \dot{I}_q + jX_d \cdot \dot{I}_d$$

სადაც:

$$\left. \begin{aligned} X_d &= X_\sigma + X_{ad} \\ X_q &= X_\sigma + X_{aq} \end{aligned} \right\} - \text{სრული ინდუქტიური წინააღობები გრძივი და განივი}$$

ღერძების გასწვრივ.

$$E_f = I \cdot \sqrt{(R_H + R_1)^2 + (X_H + X_1)^2}, \quad (4.21)$$

სადაც:

R_1 - ღუზის წინააღობის აქტიური შემადგენლობა;

X_1 - ღუზის გრაგნილის ინდუქტიური წინააღობა;

$$R_1 = R + R_a = R + \frac{X_d - X_q}{2} \cdot \sin 2\beta \quad (4.22)$$

$$X_1 = X_\sigma + X_a = \frac{X_d + X_q}{2} - \frac{X_d - X_q}{2} \cdot \cos 2\beta \quad (4.23)$$

სადაც R - გრაგნილის გამტარების აქტიური წინააღობა დენების გრძივი სისტემისთვის $\beta = \pm \frac{\pi}{2}$

$$R_1 = R ;$$

$$X_1 = X_d = X_\sigma + X_{ad} ;$$

დენების განივი სისტემისთვის $\beta = 0$ ან π

$$R_1 = R ;$$

$$X_1 = X_q = X_\sigma + X_{aq} ;$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{X_1 + X_H}{R_1 + R_H}$$

ურთიერთინდუქციის ველების წარმოქმნაში მონაწილეობას ღებულობენ მ.მ.მ ა.გ. ამპლიტუდით $F_{fm} = w_f \cdot I_f$ და ს.გ. სტატორის ძირითადი ჰარმონიკული ე.მ.დ. ამპლიტუდით:

$$F_{fm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot \frac{I \cdot w_1 \cdot k_{w1}}{p} \quad (4.24)$$

გენერატორის დატვირთვისას შემცვლელი სქემის გათვალისწინებით;

$$Z_H = R_H + jX_H ;$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_f}{(R_1 + R_H) + j(X_1 + X_H)} ;$$

$$I = \frac{E_f}{\sqrt{(R_1 + R_H)^2 + (X_1 + X_H)^2}} ;$$

ჩვენი შემთხვევისთვის განვიხილოთ ცალცალკე პარალელური განშტოების კონტურები:

შევადგინოთ ღუზის გრაგნილის ძაბვის განტოლებები:

$$\dot{E}_r = \dot{U} + R \cdot \dot{I} + jX_\sigma \cdot \dot{I} \quad (4.25)$$

სადაც: \dot{E}_r - ურთიერთინდუქციის მარეზულტირებელი ველით აღძრული ე.მ.ძალა რომელიც ტოლია: $\dot{E}_r = \dot{E}_{rd} + \dot{E}_{aq}$

\dot{E}_{rd} - ურთიერთინდუქციის მარეზულტირებელი გრძივი ველით აღძრული ე.მ.ძალა $\dot{\Phi}_{rdm}$ ნაკადით;

\dot{E}_{rd} ე.მ.მ შეესაბამება ალგუნების მ.მ.მ-ს \dot{F}_{1rd}

$\dot{E}_{aq} = -jX_{agH} \cdot \dot{I}_q$ - მარეზულტირებელი განივი დენით აღძრული ე.მ.მ.

X_{agH} - ლუზის მთავარი ინდუქტიური წინაღობა განივი ღერძის გასწვრივ გაჯერების გათვალისწინებით.

$\dot{F}_{1rd} = \dot{E}_{rdm} - \dot{F}_2$, რომელიც აღებულია უქმი სვლის მახასიათებელზე როტორის მაგნიტური ძაბვის გარეშე.

ამასთან ერთად მარეზულტირებელი ურთიერთინდუქციის ნაკადი Φ_{rm} და შეაბამისი ე.მ.მ. E_r განისაზღვრებიან დამაგნიტების ძირითადი მახასიათებლის საშუალებით; (რეჟიმი, უქმი სვლა ალგუნებით)

$$\Phi_m = f(F_{fm}) ;$$

$$F_f = f(F_{fm}) ;$$

იმის გათვალისწინებით, რომ

$$F_f = F_r , \quad \Phi_{rm} = \Phi_m , \quad \text{და} \quad E_r = E_f$$

ჩვენს შემთვევაში

$$\begin{cases} \dot{E}'_r = \dot{U} + R'_1 \cdot \dot{I}' + jX'_{\sigma 1} \cdot \dot{I}' \\ \dot{E}''_r = \dot{U} + R''_1 \cdot \dot{I}'' + jX''_{\sigma 1} \cdot \dot{I}'' \\ \dot{I} = \dot{I}' + \dot{I}'' \end{cases}$$

რამდენადაც ძაბვები ერთი და იგივეა, შეგვიძლია შევადგინოთ განტოლებები;

$$\dot{E}'_r - R'_1 \cdot \dot{I}' - jX'_{\sigma 1} \cdot \dot{I}' = \dot{E}''_r - R''_1 \cdot \dot{I}'' - jX''_{\sigma 1} \cdot \dot{I}'' \quad (4.26)$$

რადგან უქმი სვლის დროს $\dot{I} = 0$, მაშინ $\dot{I}' = -\dot{I}''$

$$\begin{aligned} \dot{E}'_r - \dot{E}''_r - R'_1 \cdot \dot{I}' - jX'_{\sigma 1} \cdot \dot{I}' - R''_1 \cdot \dot{I}' - jX''_{\sigma 1} \cdot \dot{I}' &= 0 \\ \dot{E}'_r - \dot{E}''_r &= \dot{I}' (R'_1 + R''_1) + j \cdot \dot{I}' (X'_{\sigma 1} + X''_{\sigma 1}) \\ \dot{I}' &= \frac{\dot{E}'_r - \dot{E}''_r}{(R'_1 + R''_1) + j(X'_{\sigma 1} + X''_{\sigma 1})} \end{aligned}$$

4.2. საანგარიშო სქემის პარამეტრები

როგორც ადრე განვსაზღვრავდით, განშტოებათა ე.მ.ძ-ებს შორის სხვაობა შეადგენს კოჭის ე.მ.ძ-ს, ანუ

$$\dot{E}'_r - \dot{E}''_r = \dot{E}_k \quad (4.27)$$

R'_1 - გრაგნილის ფაზის პარალელურ განშტოებათა აქტიური წინაღობა, ისაზღვრება აქტიური წინაღობის ზრდის კოეფიციენტით:

$$R'_1 = R'_{10} \cdot K_R \quad (4.28)$$

სადაც: $R'_{10} = \rho_t \cdot \frac{2 \cdot w \cdot l_{cp}}{S \cdot a}$ - გრაგნილის ომური წინაღობაა;

$2 \cdot w \cdot l_{cp}$ - გრაგნილის მიმდევრობით მიერთებული გამტარების სიგრძე;

l_{cp} - ეფექტური გამტარის განივკვეთის ფართი;

$S = a_{\ni} \cdot b_{\ni} \cdot c_a \cdot c_b$ - ელემენტარული გამტარის ზომები (სიგრძე და სიგანე);

a_{\ni}, b_{\ni} - ელემენტარული გამტარების რიცხვი, შესაბამისად ღრმულის სიღრმეზე და სიგანეზე;

c_a, c_b - გრაგნილის პარალელურ განშტოებათა რიცხვი (ჩვენს შემთხვევაში ერთი განშტოებისათვის $a = 1$);

$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$ - გამტარის კუთრი წინაღობა საანგარიშო t ტემპერატურის დროს.

$\alpha = 0.004^{\circ} \cdot c^{-1}$ სპილენძის ან ალუმინისათვის წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი;

$K_R = 1 + \frac{l_{\delta}}{l_{CP}}(K_{Ra} - 1)$ აქტიური წინაღობას ზრდის კოეფიციენტი;

$K_{Ra} = \varphi(\xi) + \frac{1}{3}\Psi(\xi) \cdot [K'_{\beta} \cdot m_{\Xi}^2 - 1]$

$\varphi(\xi)$; $\Psi(\xi)$ - ემდეს ფუნქციები, აღებული სტანდარტული მრუდებიდან;

$\xi = \frac{a_{\Xi}}{\Delta}$ - ელემენტარული გამტარის ექვივალენტური სიმაღლე;

$\Delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_t \cdot b_{\Pi}}{w \cdot \mu_0 \cdot b_1}}$ - გამტარში ელექტრომაგნიტური ტალღის შეღწევა;

b_{Π} - ორმულის სიგანე;

$b_1 = c_b b_{\Xi}$ - ორმულში გამტარების სიგანე;

$w = 2\pi \cdot f$ - დენის კუთხური სიშირე;

μ_0 - გამტარის მასალის გამჭოლუნარიანობა, მოცემულ შემთხვევაში სპილენძისათვის იგი მაგნიტური მუდმივას ტოლია $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, ჰენრი.

$K'_{\beta} = \frac{9\beta+7}{16}$ - კოეფიციენტი რომელიც ითვალისწინებს ბიჯის დამოკლებას ($\beta = \frac{y_k}{\tau} = 0.855$)

$m_{\Xi} = U_{\Pi} \cdot C_a$ - ელემენტარული გამტარების რიცვი ორმულის სიმაღლეზე;

U_{Π} - ეფექტური ტრანსპონირებული გამტარების რიცხვი ორმულის სიმაღლეზე (ჩვენს შემთხვევაში ჩვეულებრივ $U_{\Pi} = 2$).

გრაგნილის ფანტვის ინდუქტიური წინაღობა $X_{\sigma} = w \cdot L_{\sigma}$. [21,22] თანახმად ფანტვის ინდუქტიურობა

$$L_{\sigma 1} = 2 \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{P \cdot q_1} \cdot \lambda_{\sigma 1} \quad (4.29)$$

სადაც: $\lambda_{\sigma 1} = \lambda_{\Pi 1} + \lambda_{g 1} + \lambda_{\wedge 1} + \lambda_{d 1}$ - გამტარობის კოეფიციენტები გაფანტვის ნაკადშეჭიდულობისათვის.

სწორკუთხა ღრმულების შემთხვევაში

$$\lambda_{\Pi 1} = \left(\frac{h_{\text{III}}}{b_{\text{III}}} + \frac{h_0}{3 \cdot b_{\Pi}} \right) \cdot \frac{3 \cdot \beta + 1}{4} - \text{ღმულის გაფანტვის გამტარის კოეფიციენტი}$$

სადაც:

h_0 - ზონის სიმაღლე, დაკავშირებული გრაგნილის გამტარებით;

h_{III} - გრაგნილის გამტარებიდან ღრეჩომდე დაშორება;

$$\lambda_{r1} = \left[1,1 \cdot \left(\frac{\delta'}{b_{\text{III}}} \right) - 0,35 \left(\frac{\delta'}{b_{\text{III}}} \right)^2 - 0,26 \right] \cdot \left(\frac{3 \cdot \beta + 1}{4} \right) - \text{გრაგნილის გაფანტვის}$$

კოეფიციენტი კბილანების თვისების გასწვრივ;

სადაც:

$\delta' = k_{\delta} \cdot \delta$ - საანგარიშო ღრეჩო გულარებს შორის;

b_{III} - ღრმულის გახსნილობის სიგანე ღრეჩოს მხარეს;

k_{δ} - კარტერის კოეფიციენტი

$$k_{\delta} = \frac{t_z}{(t_z - c_{\Pi} \cdot \delta)}$$

ამასთან,

$$c_{\Pi} = \frac{\left(\frac{b_{\Pi}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{\Pi}}{\delta}};$$

(თუ საჭიროა სტატორისა და როტორის დაკბილულობის გათვალისწინება, მაშინ $k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$).

$$\lambda_{\wedge 1} = 0,34 \cdot \sqrt{\beta_{b1} + 0,1 \cdot \frac{\beta_1 \cdot \tau \cdot q_1}{l_{\delta}}} \approx 0,3 \frac{\beta_1 \cdot \tau \cdot q_1}{l_{\delta}} \quad (4.30)$$

სადაც:

$$\beta_{b1} = \frac{l_{\delta 1}}{y_{k1}} = \frac{l_{b1}}{\beta_1 \cdot \tau} - \text{უბლური ნაწილის შეფარდებითი (გამოვარდნა)}$$

შვერი;

$$\beta_1 = \frac{y_{k1}}{\tau} - \text{გრაგნილის ბიჯი შეფარდებითი დამოკლება.}$$

$\lambda_{d1}(0,7 \div 1,0) \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}}$ - დიფერენციალური გაფანტვის გამტარობის კოეფიციენტი.

მითითებულ პარამეტრებს ვანგარიშობთ ხრამჭეს-II-ის გენერატორის გრაგნილისთვის.

5. ხელოვნური არასიმეტრიის ანალიზი ხრამჭეს-II-ის გენერატორის სტატორის გრაგნილის მაგალითზე

5.1. ხრამჭეს-II-ის გენერატორის სტატორის გრაგნილის განშტოების პარამეტრების ანგარიში

$CB \frac{430}{210} - 14$ - გენერატორის სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოების ომური წინაღობა:

$$l_{cp} = \frac{l_w}{2} = \frac{7,24}{2} = 3,62 \text{ მ} \quad (5.1)$$

$$S = 2,63 \cdot 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 21 = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ მ}^2 \quad (5.2)$$

$$20^{\circ}C \text{ -თვის } \rho_{20} = 0,018 \frac{\text{მმ} \cdot \text{მმ}^2}{\text{მ}} = 0,18 \cdot 10^{-7} \text{ ომ} \cdot \text{მ}$$

$$75^{\circ}C \text{ -თვის } \rho_{75} = 0,18 \cdot 10^{-7} [1 + 0,004 \cdot 55] = 0,18 \cdot 10^{-7} \cdot 1,22 = 0,2196 \cdot 10^{-7} \text{ ომ} \cdot \text{მ}$$

$$20^{\circ}C \text{ -თვის } R'_{10} = R_{0\text{განშტ.}} = \frac{0,18 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 30 \cdot 7,24}{7,07 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 2} = 0,00553 \text{ ომი}$$

$$75^{\circ}C \text{ -თვის } R'_{10} = 0,2196 \cdot 3,072 \cdot 10^{-2} = 0,00675 \text{ ომი}$$

ცვლადი დენის წინაღობა:

$$75^{\circ}C \text{ -თვის } \Delta = \frac{2 \cdot 0,2196 \cdot 10^{-7} \cdot 24 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,2196 \cdot 24}{4 \cdot 2 \cdot 6,4 \cdot 400} = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ მ.}$$

$$\xi = \frac{2,63 \cdot 10^{-3}}{14,4 \cdot 10^{-3}} = 0,183$$

რადგან $\xi \leq 1$, ვსარგებლობთ გამარტივებული ფორმულით ემდეს ფუბქციის განსასაზღვრავად.

$$\varphi(\xi) = 1 + \frac{4}{45} \cdot \xi^4 = 1,0001; \quad \beta = 0,855;$$

$$\psi(\xi) = \frac{1}{3} \cdot \xi^4 = 0,37 \cdot 10^{-3}; \quad K'_\beta = \frac{9 \cdot 0,8 \cdot 55 \cdot 7}{16} = 0,918$$

$$K_{Ra} = 1,0001 + \frac{1}{3} \cdot 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot [0,918 \cdot (42)^2 - 1] =$$

$$1,0001 + 0,123 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6183 \cdot 10^{-3} = 1,2$$

$$k_R = 1 + \frac{l_\delta}{l_{cp}} (k_{Ra} - 1) = 1 + \frac{2,1 \cdot 2}{7,24} \cdot 0,1993 = 1,116$$

$$75^\circ C - \text{თვის} \quad R'_1 = R'_{10} \cdot k_R = 0,00675 \cdot 1,12 = 0,00756 \text{ ომი}$$

$$20^\circ C - \text{თვის} \quad R'_1 = 0,00553 \cdot 1,12 = 0,00619 \text{ ომი}$$

ამგვარად:

$$20^\circ C - \text{თვის} \quad R'_1 = 0,00756 \text{ ომი და}$$

$$75^\circ C - \text{თვის} \quad R''_1 = R'_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{30}\right) = 0,00731 \text{ ომი}$$

გაფანტვის ინდუქტიური წინაღობა

$$h_c = 169 - h_{III}; \quad h_{III} = h_k + \Delta_{HB} = (9 + 0,7) \text{ მმ} \approx 10 \text{ მმ};$$

$$\lambda_{\Pi 1} = \left(\frac{h_{III}}{b_{III}} + \frac{h_0}{3 \cdot b_{\Pi}}\right) \cdot \frac{3 \cdot \beta + 1}{4} = \left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 59 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 24 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot \frac{3 \cdot 0,855 + 1}{4} = 2,34$$

$$\lambda_{r1} = \left[1,1 \cdot \left(\frac{\delta^1}{b_{III}}\right) - 0,35 \cdot \left(\frac{\delta^1}{b_{III}}\right)^2 - 0,26\right] \cdot \left(\frac{3 \cdot \beta + 1}{4}\right) =$$

$$\left[1,1 \cdot \left(\frac{21,65 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 10^{-3}}\right) - 0,35 \cdot \left(\frac{21,65}{24}\right)^2 - 0,26\right] \cdot 0,891 = 0,35$$

სადაც:

$$\delta^1 = 1,082 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 21,65 \cdot 10^{-3} \text{ მ}$$

$$k_\delta = \frac{61,06}{61,06 - 0,232 \cdot 20} = 1,082 \text{ მ}$$

$$C_{\delta\Pi} = \frac{\left(\frac{20}{24}\right)^2}{5 + \frac{24}{20}} = \frac{1,44}{6,2} = 0,232$$

$$\lambda_{\wedge 1} = 0,3 \cdot \frac{\beta_1 \cdot \tau \cdot q_1}{l_{\delta}} = 0,3 \cdot \frac{0,855 \cdot 0,785 \cdot \frac{30}{7}}{2,1} = 0,41;$$

$$\lambda_{d1} = (0,7 + 1,0) \cdot \frac{61,06 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 1,082} = (0,7 + 1,0) \cdot 0,235 ;$$

$$\lambda_{dcp} = 0,85 \cdot 0,235 = 0,2 ;$$

$$\lambda_{\sigma 1} = 2,34 + 0,35 + 0,41 + 0,2 = 3,3 ;$$

($\lambda_{\sigma 1} = 3,1$ λ_{d1} - ის გარეშე)

$$L_{\sigma 1} = 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 30^2 \cdot \frac{2,1 \cdot 7 \cdot 3,3}{7 \cdot 30} = 5,225 \cdot 10^{-4} \text{ ჰენრი}$$

$$X_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,225 \cdot 10^{-4} = \pi \cdot 100 \cdot 5,225 \cdot 10^{-4} = 0,164 \text{ ომ.}$$

= $X'_{\sigma 1}$;

(λ_{d1} - ის გარეშე $X_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 4,91 \cdot 10^{-4} = 0,154$ ომი). 29

ხვიისთვის

$$X''_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L''_{\sigma 1} = 100 \cdot \pi \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} = 1,533 \cdot 10^{-3} = 0,00153 \text{ ომი}$$

$$(\lambda_{d1} \text{-თი } L''_{\sigma 1} = 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 29^2 \cdot \frac{2,1 \cdot 7 \cdot 3,3}{7 \cdot 30} = 4,88 \cdot 10^{-4} \text{ ჰენრი})$$

$$\lambda_{d1} \text{ - ის გარეშე } L''_{\sigma 1} = 4,58 \cdot 10^{-4} \text{ ჰენრი ; } X''_{\sigma 1} = 0,00144 \text{ ომი}$$

დაზიანებულ ფაზაში გამათანაბრებელი დენი:

$$\dot{I}_{\beta\alpha\delta} = \dot{I}'_1 = \frac{\dot{E}'_p - \dot{E}''_p}{(R'_1 + R''_1) + j(X'_{\sigma 1} + X''_{\sigma 1})} \quad (5.3)$$

ანდა

$$I_{\beta\alpha\delta} = \frac{E'_p - E''_p}{\sqrt{(R'_1 + R''_1)^2 + (X'_{\sigma 1} + X''_{\sigma 1})^2}} \quad (5.4)$$

ამასთან ერთად ერთი ღეროს ან ერთი ხვიის გამოთიშვისას გრაგნილში:

$$\dot{E}'_p - \dot{E}''_p = \dot{E}_k \quad (5.6)$$

ამიტომ:

$$I_{გაგ} = \frac{E_k}{\sqrt{(R'_1 + R''_1)^2 + (X'_{\sigma 1} + X''_{\sigma 1})^2}} \quad (5.7)$$

რაც შეეხება გენერატორის საერთო არასიმეტრიას, ის აგრეთვე დამოკიდებულია ზემოთ აღნიშნული პირობებთან და წინასწარი გაანგარიშებით, მაგალითად ერთი ხვიის გამორთვის დროს, ხშირად არის ტექნიკური ექსპლუატაციის დასაშვებ ნორმებში.

როგორც აღნიშნული იყო, გამათანაბრებელი დენი ფაზის საღ და დაზიანებული განშტოების ძაბვებს ათანაბრებს და აყენებს საშუალო დონეზე, რაც საღი ფაზის ძაბვაზე ნაკლებია. როგორც ანგარიშიდან ჩანს, ჩვენი შემთხვევისათვის (როდესაც ფაზის პარალელური განშტოების ერთი ხვია გამოთიშულია) ძაბვის შემცირება არ არის მნიშვნელოვანი და ჰაერის გაციებით მომუშავე ჰიდროგენატრების არასიმეტრიულობის დასაშვები ნორმების ფარგლებში ჯდება.

ხრამჭეს II-ის ჰიდროგენატორისათვის ამ ნორმით დაშვებულია ფაზებში დენებს შორის განსხვავება 20%-მდე იმ პირობით, რომ არც ერთი ფაზაში დენი არ უნდა აღემატებოდეს ნომინალურს. ამრიგად მოცემულ სამუშაოში არ არის აუცილებელი განისაზღვროს გენერატორის უკუმბიდევრობის ველი, რადგანაც ის დასაშვებ ნორმებს არ აღემატება.

5.2 დაზიანებულ ფაზაში გამათანაბრებელი დენის განსაზღვრა

კოჭის ან ერთი ხვიის ე.მ.დ.-ის მოქმედი მნიშვნელობა უნდა განისაზღვროს ზემოთ მოყვანილი ფორმულებით. მაგრამ ჩვენს შემთხვევაში უფრო მოსახერებელია გამოვიყენოთ ის გარემოება, რომ რეალურ მანქანაში უქმი სვლის ე.მ.დ. ცნობილია. ამის გამო E_k შეიძლება განისაზღვროს, როგორც სტატორის გრაგნილის ხვიისათვის საშუალო სიდიდე:

$$E_k = \frac{E_H}{\sqrt{3} \cdot q \cdot d} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 30} = 202,1 \text{ ვოლტი;}$$

$$I_{გაბ.} = \frac{202,1}{\sqrt{(0,00756+0,00731)^2+(0,164+0,154)^2}} = 635 \text{ ამპერი.}$$

ჩვენ მივიღეთ იმ გამათანაბრებელი დენის მნიშვნელობა, რომელსაც ექნებოდა ადგილი 1 ფაზის შემთხვევაში (მაგ. A) მითითებული არასიმეტრიით. მაგრამ სტატორის ზოგიერთ ღრმულებში A ფაზის გრაგნილის ღეროებთან ერთად განლაგებულია B და C ფაზების პარალელური განშტოების ღეროები. ამ საერთო ღრმულებში სვა ფაზების ღეროები აღმოჩნდება გაფანტვის მაგნიტური ნაკადით მოცული, რომელიც იკვრება A ფაზის ღეროებში გამავალ დენთან ანუ გამათანაბრებელ დენთან. ამასთან მათში აღიძვრება ტრანსფორმატორული ე.მ.დ. იმის გათვალისწინებით, რომ გრაგნილის ყველა ფაზის ღეროების შეერთების სქემა იდენტურია, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ღეროებში აღძრული ე.მ.დ. ისევე, როგორც A ფაზის პარალელურ განშტოებებში, ასევე B და C ფაზებში, იქნებიან მიმართული შეთანხმებულად. გარდა ამისა,

იმის გამო, რომ ეს პარალელური განშტოებები შეკრულებია თავის თავთან, მოსალოდნელია მათში წარმოიქმნას ტრანსფორმატორული დენები $I_{ტრ.}^B$ და $I_{ტრ.}^C$.

საერთო ღრმილებში ამ დენების მიმართულება, თუკი არ მივიღებთ მხედველობაში ღეროს აქტიური წინაღობის გავლენას გაფანტვის ინდუქციურ წინააღმდეგობასთან შედარებით, A ფაზის ღეროებში დენის მიმართულების პირდაპირსაწინააღმდეგო იქნება. შესაბამისად $I_{ტრ.}^B$ და $I_{ტრ.}^C$ დენებიდან გაფანტვის მაგიტურ ნაკადს საერთო ღრმილებში განმამაგნიტებელი ხასიათი ექნება.

ამგვარად B და C დაუზიანებელ ფაზებში აღძრული დენები დაკავებული იქნება A ფაზის $I_{გაგ.}$ დებით, რომელიც მოცემულ შემთხვევაში წარმოადგენს, ტრანსფორმატორის ანალოგიურად, დენს პირველად გრაგნილში.

$I_{ტრ.}^B$ და $I_{ტრ.}^C$ დენები განისაზღვრება ტრანსფორმატორის ე.მ.ძ-ის $E_{ტრ.}$ -ის სიდიდითმ აგრეთვე პარალელური განშტოებების აქტიური და ინდუქტიური წინააღმდეგობებით, რომლებიც გრაგნილის გადანაწილების სქემიდან გამომდინარე, შეიძლება ჩაითვალოს თანაბრად. ეს მოსაზრება გამომდინარეობს იქიდან, რომ A ფაზის გრაგნილში „გამოთიშულ“ ხვიას ექნება „გამოთიშული“ ღერო მხოლოდ ერთ „საერთო“ ღრმილში ან A ანდა C ფაზებთან. ამის გამო ამ გრაგნილებში აღძრული ე.მ.ძ-ები განსვავებული იქნებიან ერთი ღეროს ე.მ.ძ-სგან, რომელიც შეგვიძლია მხედველობაში არ მივიღოთ (პარალელურ განშტოებებში 120 ღეროს შემთხვევაში.)

აღვნიშნოთ კიდევ ერთი ფაქტორი: იმის გამო, რომ ღეროები, რომლებიც ეკუთვნის სტატორის (გარშემოწერილობის) გრაგნილის ფაზების პარალელურ განშტოებებს რიგრიგობით იცვლებიან გამათანაბრებელი და აღძრული დენები ფარებში შეთანხმებული მიმართულებისაა (იხ.სურ.20). ამასთან განსხვავება შეიძლება იყოს პარალელური განშტოებების გამომყვანების შეერთებაში ნულოვან აწყობაში. იმ შემთხვევაში, როცა ერთმანეთს ემთხვევა ფაზების ერთნაირი დასახელების პარალელური განშტოებების შეერთებები ნულოვან

სალტებზე, დაცვის დენი $I_{დ.ა}$ შემაერთებელ სალტეში, სადაც დაყენებულია განივი დაცვისათვის დენის ტრანსფორმატორი, წარმოადგენს სხვაობას გამათანაბრებელ და აღძრულ დენებს შორის. შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შემთხვევას, როცა B და C ფაზების განშტოებები ისეთია, რომ აღნიშნული დენები შემაერთებელ სალტეში ერთმანეთს ემატება. (იხ.სურ.20). ნაჩვენებია ვარიანტი, როდესაც B და C ფაზების გამოსავლების შეერთება განსხვავებულია. ასეთ შემთხვევაში დენები ურთიერთსაწინააღმდეგოდაა მიმართული და დაცვის დენი $I_{დ.ა}$ შედგება დენისაგან $I_{გაბ}$ და აღძრული დენების სხვაობისაგან.

შევაფასოთ $I_{გაბ}$ დენების სიდიდე. აღძრული ე.მ.ძ-ის სიდიდე დამოკიდებულია სალი გრაგნილის ღეროების მაქსიმალურ ნაკადშეწიდულობაზე „საერთო“ ღრმულებში გაფანტვის ნაკადთან. ეს ნაკადშეწიდულობა ღრმულის ზედა და ქვედა ღეროებისათვის სხვადასხვაა, რაც გამოწვეულია ღრმულის მაგნიტური გამტარობის შემდგენელის რამდენადმე განსხვავებულობით. გაფანტვის ნაკადის მაგნიტური გამტარობის დანარჩენი შემდგენები უცვლელი რცება. ამის გამო შემაფასებელი ანგარიშების საკმარისი სიზუსტისათვის შეიძლება დავუშვათ, რომ ღეროები გასაშუალებულ პირობებში იმყოფებიან. აქედან გამომდინარე ე.მ.ძ-ის აღძვრა ღეროს აქტიურ ნაწილში გაფანტვის ნაკადის ცვლილების ხარჯვაზე ხდება მხოლოდ, ანუ ღრმულის რაიონში და კბილანების თვისების გასწვრივ. ამასთან ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ერთის ტოლი იქნება. გრაგნილის განაწილების სქემის მიხედვით ნათელია, რომ A ფაზის ღეროებთან ერთად საერთო ღრმულში იმყოფება B ფაზის 30 „ქვედა“ ღერო და C ფაზის 30 „ზედა“ ღერო. როგორც ზემოდ იყოს აღნიშნული, აღძრული ე.მ.ძ B ფაზის ღეროებში, რომლებიც მდებარეობს ღრმულის ფსკერზე, იქნება მეტი სიდიდის, ვიდრე C ფაზის ზედა ღეროებში, ღრმულის სიმაღლის გასწვრივ ღრმულური გამტარობის კოეფიციენტის სვადასხვაობის ხარჯზე. ამასთან ერთად, როგორც

უკვე ავლიშნეთ, შემაფასებელ ანგარიშებში ამ განსვავებულობას უგულებელვყოფთ. თუ B და C ფაზებში აღძრული დენის წილი იქნება მნიშვნელოვანი სიდიდის, მაშინ ეს განსხვავება შემდგომში უნდა იყოს გათვალისწინებული.

საერთო ღრმულებში მაქსიმალური ნაკადშეჭიდულობა, რომელიც მეზობელ ფაზებში აღძრავს ტრანსფორმაციის ე.მ.ძ-ს, გნისაძღვრება $\lambda_{\Pi 1}$ კოეფიციენტის ნაწილით და λ_{r1} კოეფიციენტით მთლიანად, რომელიც დაახლოებით $(1,34 + 0,35) \approx 1,7 = \lambda_{ტრ.}$ - ის ტოლია. ეს იმას ნიშნავს, რომ მეზობელ ღეროებში აღძრული ე.მ.ძ. განისაზღვრება გაფანტვის ნაკადის წილით - $\frac{\lambda_{ტრ.}}{\lambda_{\sigma 1}}$ ვლბულობთ რა მხედველობაში გარემოებასაც, რომ დაუზუანებელ ფაზებში აქტიური ღეროების წილი შეადგენს $\frac{30}{120} = 0,25$ -ს (ყველა დანარჩენ ღეროსთან შედარებით) ხოლო ყველა ფაზის პარალელური განშტოებების აქტიური და ინდუქტიური წინაღობები თანაბარია, შეიძლება დავასკვნათ, რომ აღძრული დენები დენის $\frac{1,7}{3,1} \cdot 0,25 = 0,137$ წილს შეადგენენ, ანუ 87 ამპერი = $\lambda_{ტრ.}$.

როგორც ვხედავთ $I_{ტრ.}$ დენის წილი მნიშვნელოვანია, ამიტომ ღრმულის სიმაღლის გასწვრივ შეგვაქვს დაზუსტება. ზემოთ მოყვანილი ანგარიში დაახლოებით შეესაბამება ნაკადშეჭიდულობას ქვედა ღეროსთან. ზედაში გამავალი დენის დროს, ანუ შეესაბამება ფაზა B -ში ტრანსფორმაციის დენი ანგარიშს. C ფაზისთვის, რომლის ღეროებიც საერთო ღრმულებში მდებარეობს ზევით, ნაკადშეჭიდულობა განისაზღვრება მხოლოდ λ_{r1} კოეფიციენტით. ამგვარად, C ფაზაში დენი შეადგენ

$$I_{გაძ.} \text{ დენის } \frac{0,35}{3,1} \cdot 0,25 = 0,028 \text{ წილს}$$

ანუ

$$I_{ტრ.}^C = 18 \text{ ამპერი.}$$

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ეს დენები უნდა შენარჩუნდეს A ფაზის დენით, რომელიც შეადგენს მაქსიმუმ:

$$I_{გამ}^A = 635 + 87 + 18 = 740 \text{ ამპერი.}$$

გამომდინარე აქედან, (იხ.სურ.20). თანამად შემაერთებელ სალტეში $I_{და}$ დენს შეიძლება ჰქონდეს შემდეგი მნიშვნელობები:

$$I_{და} = I_{გამ}^A \pm I_{გამ}^B \pm I_{გამ}^C \quad (5.8)$$

ან

$$I_3 = 635 \div 845 \text{ ამპერი.}$$

უნდა აღინიშნოს, რომ მითითებული ანგარიში შესრულებულია დაშვებებით, რომლებიც გამათანაბრებელი დენის სიდიდეს მალა სწევენ, რაც გვამლევს საიმედო მარაგს ამ დენის მავნე გავლენების განსაზღვრისას. უფრო სწორი იქნებოდა, რომ ამ დენის განსაზღვრისას მხედველობაში ყოფილიყო მიღებული აგრათვე მაგნიტური ნაკადშემბულობის სხვაობა (ან დაუზიანებელი განშტოების ერთი ხვიის წინაღობით), რომელიც ისაზღვრება მთავარი ინდუქტიურობის ნაწილით, რაც შეამცირებდა დენის სიდიდეს.

ამასთან შემაფასებელმა ანგარიშმა აჩვენა, რომ ეს წინაღობა ერთი ხვიისათვის ძალიან მცირეა არივე განშტოების გაფანტვის ინდუქტიურ წინაღობასთან შედარებით, ამიტომ ანგარიშში იგი გათვალისწინებული არ არის.

5.3. ხრამ ჰეს -II გენერატორის სტატორის

დენი დატვირთვის რეჟიმში

როგორც ვხედავთ, დაზიანებულ ფაზაში გამათანაბრებელი დენი, როცა გენერატორი მუშაობს უქმი სვლი რეჟიმში აგზნებით, შეადგენს 740 ამპერი, ხოლო დენი „ნულოვანი“ აწყობის შემაერთებელ სალტეში, პარალელური განშტოებების შეერთებისგან დამოკიდებულებით, შეიძლება იყოს 635-845 ამპერი. მოსალოდნელია, რომ ასეთი თანაფარდობა (თუ მას სიმეტრიულად ჩავთვლით) დარჩება დატვირთვის რეჟიმშიც.

გენერატორის დაზიანებულ ფაზაში, ან ფაზაში გამოთიშული დაზიანებული ღეროებით, ამ ფაზის პარალელურ განშტოებებში გამათანაბრებელი დენი დაემატება დატვირთვის დენს. ეს დამატება დატვირთვის დენისა გამათანაბრებელ დენთან დამოკიდებულია ძირითადი ელექტრული β კუთხისაგან. E_f ე.მ.ძ-ის მოცემულ მიმართულებისაგან, ელექტრული კუთხიდან α'_b და დატვირთვის კუთხისაგან φ'_1 გამათანაბრებელი დენის შეკვრის კონტურის გასწვრივ. ნაჩვენები პარამეტრების ანალიზმა აჩვენა:

კუთხე $\varphi'_1 = \tan^{-1} \frac{X'_{\sigma 1}}{R_1}$ უალოვდება 90° -ს, რამდენადაც $I_{გაძ}$ დენი ძირითადად განისაზღვრება გაფანტვის ინდუქტიური წინააღობით.

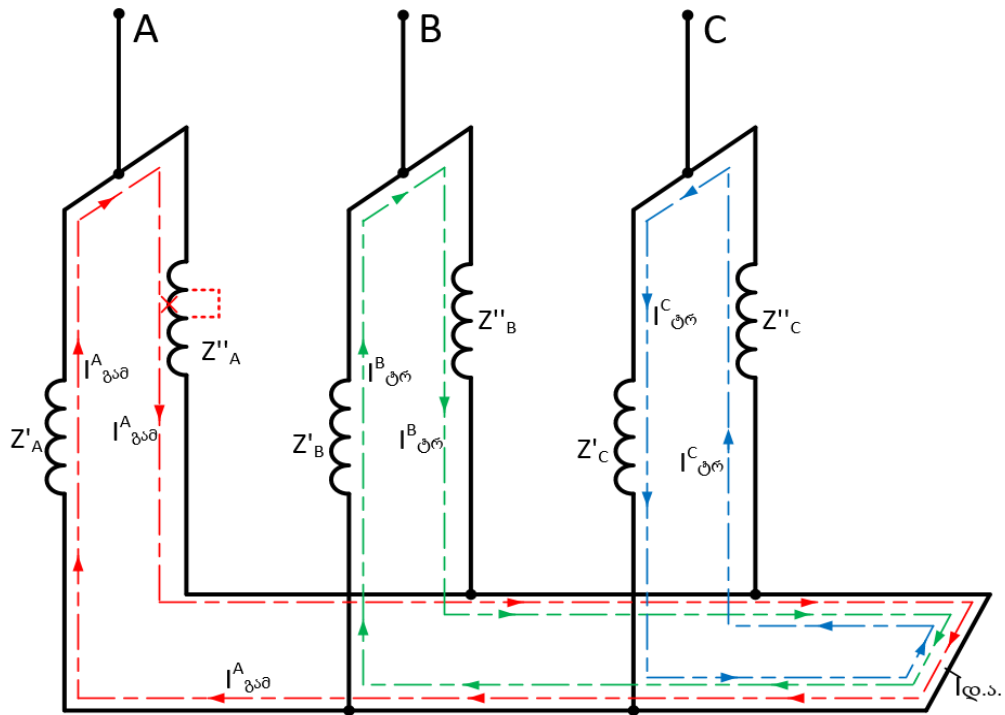
ხრამჰეს -II -ის გენერატორისთვის $\varphi'_1 = 87^\circ$. კუთხე α'_b დამოკიდებულია კოჭურ ჯგუში გამოთიშული ხვიების რიცხვზე, შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$\alpha'_b = \frac{\alpha_z}{2} (q - 1) \quad (5.9)$$

სადაც $K' = 1, 2, 3, \dots, q$ -

გამოთიშული ხვიების რიცხვი

$$\alpha_z = \frac{\alpha_z}{\tau} \cdot \pi = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z_1} \quad (5.10)$$



სურ. 20. სტატორის გრაგნილის პარალელური განშტოებები.

ჩვენს შემთხვევაში, როდესაც გამოთიშულია ერთი ხვია, $\alpha'_b = 21^0$ გამათანაბრებელი დენის ფაზისა და დატვირთვის დენების ურთიერთდამთხვევის პირობები განისაზღვება კუთხეების $(\frac{\pi}{2} - \beta) = \alpha'_b + \varphi_1$ განტოლებით, როდესაც დენები არითმეტიკულად ემატება ერთმანეთს. ამის გამო შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ დატვირთვის რეჟიმში სტატორის ნომინალური დენის დროს და ამ დატვირთვის ხასიათზე დამოკიდებულებით, გაუმართავი ფაზის მთელ პარალელურ განშტოებაში დენი შეიძლება იყოს $3785+740=4525$ ამპერი, რაც 1.21-ჯერ აღემატება ნომინალურს. მითითებულ განშტოებაში დანაკარგები გაიზრდება 44%-ით, რაც რატემაუნდა დაუშვებელია დამყარებულ რეჟიმში ხანგრძლივი ექსპლუატაციის პირობებში. შეგახსენებთ, რომ ტექნიკური ექსპლუატაციის წესების [9] -ის თნახმად გენერატორის დატვირთვის დასაშვები ჯერადობა სტატორის დენის 1.2-ის მიხედვით დაიშვება არა უმეტეს 6 წმ.

დასკვნა

1. ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზი, რომელიც თან სდევს ჰიდროგენერატორის მუშაობის რეჟიმს სტატორის გრაგნილის „ხელოვნური ასიმეტრიით“, გამოავლინა რიგი ფაქტორებისა, რომელიც მოქმედებს ჰიდროგენერატორის ტექნიკურ მდგომარეობაზე და მის იმედიან მუშაობაზე. მნიშვნელოვან ფაქტორებთან ერთად, როგორცაა ფაზის პარალელურ განშტოებებში გამათანაბრებელი დენების გაჩენა და მასთან დაკავშირებული არადაზიანებული განშტოებაში დენური გადატვირთვა და ტემპერატურის გაზრდა, – შეიძლება გამოვყოთ აგრეთვე რელეური დაცვის მუშაობის პირობები და ბლოკის და საერთოდ სადგურის რელეური დაცვის საიმედო ფუნქციონირება.

2. ჰიდროგენერატორის სტატორის გრაგნილის „ხელოვნური ასიმეტრიით“ მუშაობის რეჟიმის რელეური დაცვის მოქმედებაზე გავლენის განსასაზღვრავად განხილულია ჰიდროგენერატორებზე გამოყენებული ყველა სახის რელეური დაცვები, მათი მოქმედების პრინციპი და გავრცელების არეალი. გაანალიზებულია ელექტრომაგნიტური პროცესები, რომლებიც შეიძლება თან მოჰყვეს გენერატორის ამგვარ ანორმალურ რეჟიმს და შესაძლო მათი გავლენა რელეური დაცვის ნორმალურ მუშაობაზე.

3. შესრულებულმა ანალიზიმა გვიჩვენა, რომ სტატორის გრაგნილის ფაზების პარალელულ შტოებში შექმნილი ხელოვნური არასიმეტრიის შემთხვევაში, პირველ რიგში უნდა რეაგირებდეს გენერატორის განივი დიფერენციალური დაცვა, რომლის დანაყენის კოეფიციენტსაც შეიძლება მოუწიოს გაუხეშება, რაც საბოლოო ჯამში იმოქმედებს მის საიმედო მუშაობაზე. ეს ყველაფერი დაკავშირებულია გამათანაბრებელი დენის სიდიდესთან, რომელიც თავის მხრივ დამოკიდებულია კონკრეტული გენერატორის სტატორის გრაგნილის კონსტრუქციული პარამეტრებთან და გამორთული დაზიანებული ხვიების რაოდენობასთან.

4. გამათანაბრებელი დენის ანგარიშმა კონკრეტულ მაგალითზე (ხრამ ჰეს-2 ის გ-2 $CB \frac{430}{210} - 14$ ტიპის გენერატორზე) გვიჩვენა, რომ ერთი გათიშული ხვიის პირობებშიც კი მოცემული ტიპის გენერატორის სტატორის გრაგნილის ფაზის ერთ-ერთ პარალელურ არადაზიანებულ განშტოებაში გამავალმა დენმა შეიძლება 20%-ით გადააჭარბოს ნომინალურს, რაც იწვევს დანაკარგების ზრდასა და, შესაბამისად, გრაგნილის 40%-ზე ზემოდ გახურებას.

აღნიშნული გამათანაბრებელი დენი გაივლის განივ დიფერენციალურ დაცვაში, ვინაიდან ამ დაცვის დანაყენი როგორც ცნობილია თავიდანვე გაუხეშებულია (20-30)% -ით. შეიძლება ვიმედოვნოთ რომ ამ დაცვის ცრუ მოქმედება იქნება თავიდან აცილებული. ამისთვის საჭიროა წინასწარ განსაზღვრული იყოს მისი ზუსტი დანაყენი, იმ შემთხვევაში თუ მისი დანაყენი ნაკლებია გამათანაბრებელ დენზე მაშინ დაგვჭირდება მისი გაუხეშება არანაკლებ 30%-მდე.

5. მოყვანილი მაგალითი გვიჩვენებს, რომ რელეური დაცვის მუშაობის ფუნქციონირება მისი ძირითადი დანიშნულებით არ იქნება დარღვეული, რადგან საერთოთ ამ რელეურ დაცვას აქვს მკვდარი ზონები. ამ კონკრეტულ შემთხვევაში ერთი ხვიის ამოღება შედის მკვდარ ზონაში და არ ამცირებს დაცვის ფუნქციონირებას.

6. რაც შეეხება ამ რეჟიმის თერმულ ზემოქმედებას დაუზიანებელ შტოზე უნდა აღინიშნოს, რომ სტატორის გრაგნილი იზოლაციის დაუშვებელი გადახურებისა და დაზიანების თავიდან აცილების მიზნით, ავარიულ რეჟიმში მუშაობისას (განხილულ მაგალითისთვის, ფაზის პარალელურ განშტოებებს ერთ გამორთულ ხვიის შემთხვევაშიც კი) საჭიროა გენერატორის სრული გასაცემი სიმძლავრე 20%-ით შემცირდეს. ხრამჰეს- II-ის გენერატორისთვის ეს პროცესი გამოიხატება სტატორის დნის შეზღუდვით 3100 ამპერის ფარგლებში.

7. გენერატორის მუშაობა სტატორის გრაგნილში ხელოვნური არასიმეტრიით რეალიზაციის პროცესში, იმისათვის, რომ შემოწმდეს

მოცემულ სამუშაოში შესრულებული ანგარიშების სისწორე და რელეური დაცვის დანაყენების სისწორე იმ დენებისათვის, რომლებიც წარმოიშვება გრაგნილის დაზიანებული ფაზის დროებითი „დამოკლებით“ მომუშავე გენერატორში, საჭიროა გაიზომოს დენები გენერატორის ნულოვან სადენში, რელეური დაცვის წრედში.

8. ყოველივე ზემოთ მოხსენებული გვამლევს საშუალებას ვიმედოვნოთ, რომ სტატორის გრაგნილის ფაზებში ხელოვნური არასიმეტრიის შემთხვევაში ჰიდროგენერატორის მუშაობაში ამგვარი რეჟიმის გამოყენება განსაკუთრებულ შემთხვევებში შეიძლება გახდეს შესაძლებელი. მაგრამ ეს განხორციელებადაც ყველა მოქმედი ფაქტორების დეტალური გამოკვლევის შემდეგ, რომლებიც თან ახლავს გენერატორის ამგვარ ანორმალურ რეჟიმს. ამ გამოკვლევის საფუძველზე კონკრეტული ელექტროსადგურის გენერატორებისათვის უნდა იყოს განხორციელებული შესაბამისი ღონისძიებები და რელეური დაცვის დანაყენები. შედეგად შეთავაზებულ უნდა იქნეს მკაფიო პირობები, გადასვლასთან და მის პრაქტიკულ განხორციელებასთან დაკავშირებული შეზღუდვები. გარდა ამისა, თითოეულ კონკრეტულ შემთხვევაში შეფასებულ უნდა იქნეს ეკონომიკური ეფექტურობა და სტატორის გრაგნილში ასიმეტრიის მქონე ჰიდროგენერატორის მუშაობის რეჟიმის გამოყენების მიზანშეწონილობა.

გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა

1. ვ. გიორგობიანი, შ. ნაჭყებია, მ. რუხვაძე. **ელექტრული სადგურების და ქვესადგურების ელექტრული ნაწილი**. სახელმძღვანელო. თბილისი, 2007. 182 გვ.
2. **Основы современной энергетики**. Ч.2. Современная электроэнергетика./ Под ред.проф. Бурмана А.П. и Стролева В.А./ издат. МЭИ, М.: 2003. 462 с.; ил.
3. გ. მახარაძე. **ელექტროენერგეტიკული (ელექტრული) სისტემები**. სახელმძღვანელო / გამომც. "უნივერსალი". თბილისი, 2011. 482 გვ.
4. ლაოშვილი დ. **ელექტროენერგეტიკა**. სახელმძღვანელო. გამომც. "ტექნიკური უნივერსიტეტი". თბილისი, 2003.
5. Сыромятников И.А. **Определение допустимой нагрузки синхронных машин при несимметричных режимах**. М.: Госэнергоиздат, 1944.
6. **Аномальные режимы работы крупных синхронных машин**. / Е.Я. Казовский, Я.Б. Данилевич, Э.Г. Кашарский, Г.В. Рубисов. Л.: Наука, 1969.
7. Тер-Газарян Г.Н., Биджамов Я.Г., Ананянц С.С. **Нагрузочный несимметричный режим гидрогенераторов с непосредственным охлаждением меди статора водой**. – Электрические станции, М., 1989, №2. с. 71-74.
8. Тер-Газарян Г.Н., Биджамов Я.Г. **Пофазный ремонт трансформаторных фаз на ГЭС**. - Повышение надежности и эффективности работы эл. станций в горных условиях. Сборник научных трудов ГрузНИИЭГС, М., Энергоатомиздат, 1991, с.90-94.
9. **ელექტროსადგურებისა და ქსელების ტექნიკური ექსპლუატაციის წესები**. დარგობრივი წესები. 1.01.97. თბილისი, 1999
10. რ.არველაძე, ი.ბიჯამოვი, ს.გალუსტოვი. **ხრამქეს-II-ის გენერატორის თბური მდგომარეობის გამოკვლევა**. ენერგია, N-2(10), 1999, გვ.89-95.
11. Биджамов Я.Г.**Работа гидрогенератора с несимметрией в параллельных ветвях фазы обмотки статора**. / Науч.техн. жур. "Энергия". Тб. 2000, № 4 (16).
12. Арвеладзе Р. Д., Биджамов Я. Г. **О влиянии пониженной частоты тока в сети на работу электрогенераторов**. М., НТФ "Энергопрогресс", «Электрические станции». 1997, №9, с.61-64.
13. შ. ნემსაძე, შ. ნაჭყებია. **ელექტრული წრედების თეორია**. სახელმძღვანელო. თბილისი, 2009. 285 გვ.
14. ბ. კვაჭაძე. **ელექტრული სისტემების რელეური დაცვის და ავტომატიზაციის საფუძვლები**. საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა. სსე. 449გვ. В

15. Андреев В.А. **Релейная защита и автоматика систем электроснабжения.** Изд. третье, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991.
16. Чернобровов Н. В. **Релейная защита.** Учебное пособие. Изд. 5-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974. 680 с. с ил.
17. L. Mgaloblishvili, Y. Bijamov, N. Uplisashvili. **Hydraulic-Turbine Generator Losses Upon Current Frequency Decrease in Power Network.** Bulletin of the Georgian academy of sciences, 168, #3, 2003, p. 510-513
18. D. Mirtskhulava, Y. Bijamov. **On the thermal state of hydrogenerators in the poversystem.** Energy. Tbilisi , 2000, № 2 (14). p. 43-45.
19. Тер-Газарян Г. Н. **Несимметричные режимы синхронных машин.** М.: Энергия, 1969, 214 с.
20. Я.Биджамов, М.Двалидзе. Режим работы генератора с искусственной несимметрией в обмотке статора. „ენერგია” №2(74), 2015.
21. ა.ზამკოვი, კ.წერეთელი, ა.ზერეკიძე, **ელექტრული მანქანები.** მეოთხე ნაწილი. „ტექნიკური უნივერსიტეტი” თბილისი, 2011. 217გვ.
22. ლ.პოტროვსკი. **ელექტრული მანქანები.** გამომცემლობა „განათლება”, თბილისი, 1974. 595გვ.
23. რ.მონასელიძე. **სინქრონული მანქანების გეგმარების საფუძვლები.** „განათლება”, 444გვ.
24. Иванов-Смоленокый А.В. **Электрические Машины.** М. „Энергия”, 1980, - 928 с. с ил.
25. Волъдек А.И. **Электрические Машины.** Изд.Второе, перераб. И доп. Л.,„Энергия”, 1974, - 840 с. с ил.
26. Абрамов А.И. Иванов-Смоленокый А.В. **Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов:** М. „Высшая школа”, 1978, - 312 с. с ил.
27. **Правила технической эксплуатации эл. станций и сетей.** 14-ое изд. перераб. и доп. М. „Энергоатомиздат”, 1989, - 288 с.
28. Федосеев А.М. **Основы релейной защиты.** Изд. второе, перераб. М.Л. „Госэнергоиздат”, 1961, - 440 с. с ил.
29. Марголин Н.Ф. Чернин А.Б. **Метод расчета токов при внутренних замыканиях в синхронных генераторах, ОНТИ.**
30. Соколов Н.И. **Токи при внутренних коротких замыканиях в статорной обмотке многополюсных генераторов.** Конф. по обмену опытом экспл. релейной защиты энергосистем Сибири, Урала и Востока. Новосибирск, 1960.
31. Тер-Газарян Г.Н. **Аномальные режимы работы гидрогенераторов.** М.: Энергоатомиздат, 1990, 232 с.
32. Зимин В.И. Каплан М.Я. Палей А.М. и др. **Обмотки электрических машин.** Л. „Энергия”, 1970, - 475 с.
33. **Электрическая часть станций и подстанций:** учеб. для вузов / А.А.Васильев, И.П.Крючков, Е.Ф.Наяшкова и др.- 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-576 с.: ил.

34. Г.Ф. Быстрицкий. **Основы энергетики:** учебник для ВУЗ-ов. - 4-е изд., стер. - М.: КНОРУС, 2013. – 352 с.
35. **Справочник по ремонту и модернизации гидрогенераторов** / под ред. В.М. Надточего, Я.С. Уринцева. – М. Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.
36. **Технология крупного машиностроения.** изд. 2-е, перераб. и доп.; Том 2. **Гидрогенераторы.** / М.И. Зунделевич, С.А. Прутковский, - Л.: Энергоиздат, 1981, 312 с.
37. Копылов И.П. **Электрические машины:** Учебник для вузов. — 2-е изд. переработ. и доп. М.: Высш. шк., 2002.
38. Иванов-Смоленский А.В. **Электрические машины** : учебник: в 2 т. / 2-е изд., перераб. и доп. // М. : Изд-во МЭИ. 2004. -Т. 2.- 2004.-532 с.;