

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გივი შოვნაძე

ელექტრულ სისტემაში ელექტრული ენერჯის
დამაგროვებლების გამოყენების პერსპექტივა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

თბილისი

2019

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი მ. რუხვაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე,
კორპუსი VIII, აუდიტორია
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა. საქართველოს ენერგოსისტემაში არსებობს ისეთი ავარიები, რომელთაც შეუძლიათ გამოიწვიონ სისტემის მდგრადობის დარღვევა. სწორედ ასეთ დაზიანებად შეიძლება განვიხილოთ რომელიმე სისტემათაშორისი გადაცემის ხაზის გამორთვა ან 500 კვ-იანი შიდა სატრანზიტო ხაზის გამორთვა რაიმე მიზეზით, ასევე მძლავრი გენერატორის ან მოხმარების გამორთვა. გარდამავალ პროცესს, როდესაც ხდება მნიშვნელოვანი უბალანსობა, თან ახლავს სიხშირის მნიშვნელოვანი ცვლილება. იმისათვის რომ შევინარჩუნოთ სისტემის ნორმალური მუშაობა საჭიროა შესრულდეს შემდეგი პირობები: სიმძლავრის დეფიციტის დროს სიხშირე არ დავარდეს გარკვეულ სიდიდემდე, რაც გამოიწვევს საქართველოს ელ. ენერჯის მომხმარებლების გამორთვას აქტიური სიმძლავრის ბალანსის აღდგენის მიზნით; სიმძლავრის ნაჭარბისას სიხშირე არ გაიზარდოს გარკვეულ სიდიდემდე, რაც წარმოადგენს საქართველოში გენერატორების სიხშირის რეღეების დანაყენს. იმ შემთხვევაში თუ საქართველოს ელექტრულ სისტემაში დაზიანების შემდგომ გარდამავალ პროცესში სიხშირე გაიზრდება 51 ჰც-ზე მეტად, სიხშირის ავტომატური განტვირთვის მოქმედებით რეღეები გენერატორებს ქსელიდან გამორთავენ. სწორედ ამიტომ საჭიროა სისტემის მდგრადობის შესანარჩუნებლად მოინახოს ისეთი საშუალებები რაც თავიდან აგვაცილებს სისტემის დინამიკური მდგრადობის დარღვევას.

არსებული მეთოდების ნაკლოვანება. საქართველოს ელექტრულ სისტემაში მომუშავე გენერატორებს ნებისმიერ რეჟიმში გააჩნია გარკვეული სიდიდის მზრუნავი რეზერვი როგორც აქტიური სიმძლავრის მომატებაზე ასევე შემცირებაზე, რომლის ამოქმედებასაც აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევის შემთხვევაში უზრუნველყოფს გენერატორების სიჩქარის რეგულატორები. მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ მიუხედავად ტურბინის სიჩქარის რეგულატორების მოქმედებისას, უცერად წარმოქმნილ

დეფიციტზე მყისიერი რეაგირება არცერთ მათგანს არ შეუძლია მათი მნიშვნელოვანი ინერციულობის გამო.

სამუშაოს მიზანი. საქართველოს ელექტროსისტემაში გენერაციის ობიექტების და მოხმარების ზრდასთან, ასევე მეზობელ ქვეყნებთან სისტემათაშორისო ხაზების მშენებლობასთან ერთად საჭიროა მოიძებნოს ისეთი საშუალებები რომელიც სისტემის ნორმალურ მუშაობის საიმედოობას აამაღლეს, კერძოდ: შენარჩუნებული იქნება ელექტრული სისტემის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობა ნებისმიერი სახის შემფოთების დროს; განახლებადი ენერგიების ინტეგრაცია ისე რომ არ გამოიწვიოს სისტემის საიმედო მუშაობის დარღვევა; დატვირთვის პიკების მოხსნა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდოლოგია. საქართველოს ელექტრულ სისტემაში არსებული პრობლემებიდან გამომდინარე, რეკომენდებულია მოიძებნოს ისეთი ღონისძიებები, რომლებიც საჭიროებისდა მიხედვით, აქტიური/რეაქტიული სიმძლავრის უეცარი დეფიციტის/ნაჭარბის პირობებში შეინარჩუნებენ მუშაობაში მყოფ დატვირთვებს/გენერატორებს და ამასთან უზრუნველყოფენ დინამიურ მდგრადობას შენარჩუნებას. სწორედ ასეთ ღონისძიებად მიგვაჩნია ენერჯის დამაგროვებლების და სტატიკური კომპესატორის გამოყენება, რისი საკითხების შესწავლაც წარმოადგენს ნაშრომის ერთ-ერთ მიზანს. ანგარიშები ცატარებული იქნა საინჟინრო პროგრამა PSS/E დაDigsilent PowerFactory-ში.

მეცნიერული სიახლე. ბოლო წლების განმავლობაში მსოფლიო მასშტაბით ელექტრულ სისტემაში მოხდა ისეთი ელემენტების განვითარება როგორებიცაა: მუდმივი დენის ჩანართები; სხვადასხვა ტიპის ენერჯის დამაგროვებლები; ქარის და მზის სხვადასხვა ტიპის ელექტროსადგურები; ზღვის მიმოქცევის ენერჯიაზე მომუშავე ელექტროსადგურები; ამ დანადგარებმა გახადეს შესაძლებელი ენერჯის დაგროვება. დატვირთვის პიკების მოხსნა; ძაბვის და სიხშირის მცირე რყევების უინერციო გასწორება; გენერატორის დინამიკური მდგრადობის მკვეთრი გაუმჯობესება; მზის და

ქარის ელექტროსადგურებით გამომუშავებული ენერჯის შენახვა და საჭირო საათებში გამოყენება; სისტემაში სიხშირის მკეთრი ცვლილების გამორიცხვა. არსებობს ენერჯის დამაგროვებლების სხვადასხვა ტიპები, რომელთა ფუნქციონირება დამყარებულია სხვადასხვა ფიზიკურ პრინციპზე:

- ✓ ჰიდროაკუმულირებადი ელექტრო სადგური;
- ✓ შეკუმშული აირის ენერჯის დამაგროვებელი;
- ✓ ქიმიური სააკუმულატორო ბატარიები;
- ✓ სუპერ კონდენსატორები;
- ✓ მქნევარიანი, კინეტიკური დამაგროვებელი;
- ✓ ზეგამტარული მაგნიტიანი დამაგროვებელი.

შედეგების გამოყენების სფერო. ნაშრომში ჩატარებული ანალიზის შედეგების საფუძველზე შესაძლოა გაიცეს რეკომენდაციები სტატიკური კომპესატორის და ენერჯის დამაგროვებლის გამოყენების კუთხით, რაც უზრუნველყოფს მდგრადობის შენარჩუნებას მთელი რიგი დიდი შემფოთებების შემთხვევაში, იქნება ეს მოკლე შერთვები, ხაზების ავარიული გათიშვა, გენერატორების ქსელიდან გამოყოფა თუ სხვა. აღნიშნული მიიღწევა იმის საფუძველზე, რომ სტატიკურ კომპესატორს შეუძლია საჭიროებისდა მიხედვით მყისიერად გასცეს ან მიიღოს რეაქტიული/აქტიური სიმძლავრე, მყისიერად აღადგინოს ქსელში ძაბვის ნომინალური სიდიდე. ენერჯის დამაგროვებელი კი აუმჯობესებს სისტემის დინამიურ მდგრადობას, „ასწორებენ“ დატვირთვის გრაფიკებს, აუმჯობესებენ ენერჯის ხარისხს. მათი გამოყენება ქარის და მზის ელექტროსადგურებთან კომპლექტში ზრდის ამ სადგურების გამოყენების ეფექტიურობას. ამავე დროს შესასწავლია ენერჯის დამაგროვებლების გავლენა ცალკეული გენერატორების სტატიკურ მდგრადობაზე. მაგალითად კომპური მზის ელექტროსადგური აღჭურვილია სინქრონული გენერატორით. დილით და საღამოს მზის სადგურის სიმძლავრე მინიმალურია, ვინაიდან მზე დაბლა დგას და მზის ენერჯის კონცენტრაცია

ორთქლგენერატორზე მინიმალურია, შუადღისით კი პირიქით. ამიტომ დღის საათებში სადგურის ენერჯის ნაწილი გაიცემა ქსელში, ნაწილი კი გროვდება დამაგროვებელში. სადამოს კი გენერატორი და დამაგროვებელი ერთად გასცემენ ენერჯიას ქსელში, ასევე ამით საქართველოს სისტემა შეინარჩუნებს მნიშვნელოვანი სიდიდის მომხმარებლებსა თუ გენერატორებს გარდამავალ პროცესში.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ელექტროენერჯეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტში I კოლოქვიუმზე 2018 წლის მარტში, II კოლოქვიუმზე 2018 წლის ივლისში და III კოლოქვიუმზე 2019 წლის თებერვალში; წინასწარ დაცვაზე 04.05.2019-ში და სტუ-ს სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - 2019 წელი.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო სტატია.

ცნობები დისერტაციის მოცულობისა და სტრუქტურის შესახებ. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 105 გვერდს, მათ შორის 6 ცხრილს და 101 ნახაზს. იგი შეიცავს შესავალს, სამ თავს, დასკვნასა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას.

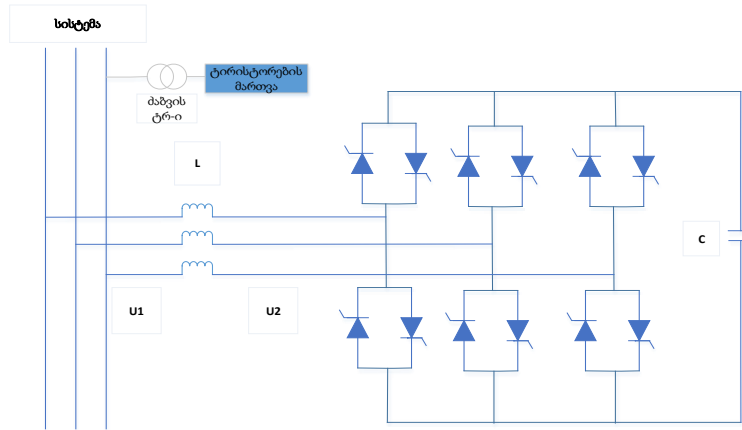
ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

თავი 1. ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის დანიშნულება და სახეები

მსოფლიო მაშტაბით არსებობს სხვადასხვა ტიპის ენერჯის დამაგროვებლები, რომლებიც განსხვავდებიან მათი მუშაობის პრინციპებიდან და დამყარებულია სხვადასხვა ფიზიკურ პროცესებზე. ენერჯის დამაგროვებლის გამოყენება შესაძლებელია სხვადასხვა დანიშნულებისათვის, კერძოდ: დატვირთვის პიკების მოხსნა; ძაბვის და სიხშირის მცირე რყევების გასწორება; გენერატორების დინამიკური მდგრადობის მკვეთრი გაუმჯობესება; მზის და ქარის ელექტროსადგურებით გამომუშავებული ენერჯის შენახვა მინიმალური დატვირთვის დროს და გამოყენება საჭიროებისდა მიხედვით მაქსიმალური დატვირთვის დროს; სისტემაში სიხშირის მკვეთრი ცვლილების გამორიცხვა. ასევე ბოლო წლებში ფართოდ გამოიყენება სტატიკური სინქრონული კომპენსატორი, რომელიც აუმჯობესებს სიტემის დინამიკურ და სტატიკურ მდგრადობას.

სტატიკური სინქრონული კომპენსატორი მუშაობა დაფუძნებულია მუდმივი დენის წყაროს (დამუხტული კონდენსატორის) ელექტრული ველის ენერჯის ინვენტირებაზე სამფაზა ცვლად დენად. გამოიყენება ტირისტორული ანდა ველის ტრანზისტორებზე აგებული ინვენტორ-გამმართველი. კომპენსატორის პრინციპიალური სქემა ნაჩვენებია ნახ.1-ზე. D დიოდების საშუალებით C კონდენსატორი დამუხტულია U_k ძაბვამდე.

კონდენსატორში დაგროვებულია $W_k = \frac{U_k^2 C}{2}$ ენერჯია. T ტირისტორების ანთების კუთხის სათანადო შერჩევით, კონდენსატორის მუდმივი ძაბვა გარდაიქმნება U_2 სამფაზა, 50 ჰერცის სიხშირის სინუსოიდალურ ძაბვად. ამ ძაბვის სიდიდის ცვლილება შესაძლებელია ტირისტორების ანთების კუთხის რეგულირებით.

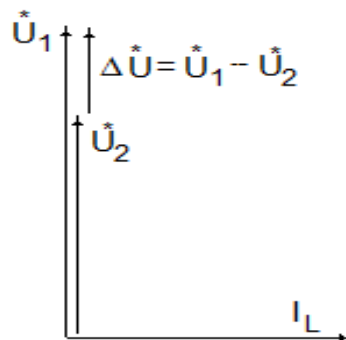


ნახ. 1. სტატიკური კომპენსატორის პრინციპიალური სქემა

ცხრილი 1. ABB ტიპის სტატიკური სინქრონული კომპენსატორის გამოყენება მსოფლიო მასშტაბით

წელი	ტიპი	ქვეყანა	ძაბვა [კვ]	ინდუქციური სიმძლავრე [მგვარ]	ტევადური სიმძლავრე [მგვარ]
2015	STATCOM	Sweden	8,6	20	20
2013	STATCOM	Kazakhstan	35	32	32
2013	STATCOM	Wales	132	50	70
2012	STATCOM	England	33	100	50
2012	STATCOM	Scotland	33	68	68
2011	STATCOM	Germany	30	32	48
2011	STATCOM	Scotland	33	12,5	12,5
2011	STATCOM	England	33	26	26
2011	STATCOM	Scotland	33	51	51
2010	STATCOM	England	33	13	26
2009	STATCOM	Chile	220	65	140
2009	STATCOM	Scotland	33	54	54
2008	STATCOM	Japan	22	10	90
2007	STATCOM	France	63	15	15
2007	STATCOM	England	33	24	24
2007	STATCOM	England	33	24	24
2006	STATCOM	Ireland	21	12,5	12,5
2006	STATCOM	Malaysia	11	13	13
2006	STATCOM	Indonesia	20	10	30
2006	STATCOM	Canada	138	72	72
2004	STATCOM	Indonesia	33	64	64
2003	STATCOM	USA	138	80	110
2001	STATCOM	France	90	16	16
1993	STATCOM	USA	138	72	72

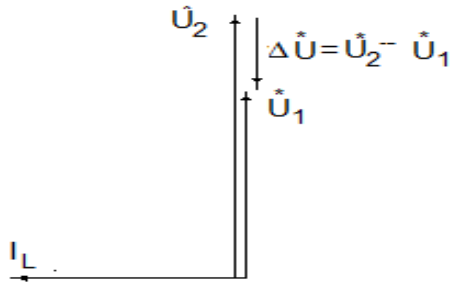
კონდენსატორში დაგროვებულია $W_k = \frac{U_k^2 C}{2}$ ენერგია. ტირისტორების ანთების კუთხის სათანადო შერჩევით, კონდენსატორის მუდმივი ძაბვა გარდაიქმნება U_2 სამფაზა, 50 ჰერცის სიხშირის სინუსოიდალურ ძაბვად. ამ ძაბვის სიდიდის ცვლილება შესაძლებელია ტირისტორების ანთების კუთხის რეგულირებით. ცხრილი 1.-ში მოყვანილია ABB ტიპის სტატიკური სინქრონული კომპენსატორის გამოყენება მსოფლიო მაშტაბით.



ნახ. 2. ძაბვის ვექტორული დიაგრამა სტატკომის ინდუქტიური ხასიათის დატვირთვის დროს

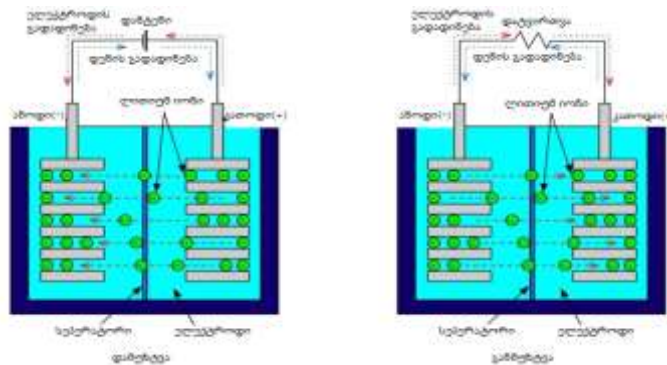
სტატიკური სინქრონული კომპენსატორის მუშაობის რამოდენიმე ვარიანტი არსებობს. იმ შემთხვევაში თუ სისტემის ძაბვა U_1 მეტია სტატკომის ძაბვაზე U_2 მაშინ რეაქტორში გაივლის დენი რომელიც ჩამორჩება სისტემის ძაბვას 90° ეს ნიშნავს, რომ კომპენსატორი მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს. ნახ.2 ამ სიმძლავრის სიდიდის რეგულირება ხდება U_2 ძაბვის სიდიდის ცვლილებით, ტირისტორების ანთების კუთხის ცვლილებით. თუ ინვერტორი აგებულია ველის ტრანზისტორებზე, მაშინ ამ ტრანზისტორების მართვის ძაბვის რეგულირებით. თუ სისტემის U_1 ძაბვა ნაკლებია კომპენსატორის U_2 ძაბვაზე, მაშინ რეაქტორში გაივლის დენი, რომელიც უსწრებს სისტემის ძაბვას 90 გრადუსით და ის ტევადურია. ამ შემთხვევაში კომპენსატორი სისტემაში გასცემს რეაქტიულ სიმძლავრეს.

ნახ.3



ნახ. 3. ძაბვის ვექტორული დიაგრამა სტატკომის ტევადური ხასიათის დატვირთვის დროს

ლითიუმ იონის ბატარეა წარმოადგენს მრავალჯერადი დატენვის ტიპის ბატარეას რომელშიც ხდება იონების გადაადგილება, კერძოდ როდესაც ხდება ბატარეის დატენვა ამ დროს ლითიუმის იონები გადაადგილდებიან უარყოფითი ელექტროდებიდან დადებითი ელექტროდებისკენ, განმუხტვის პროცესში დადებითი ელექტროდებიდან უარყოფითი ელექტროდებისკენ ნახ.4. ბატარეის შემადგენელი ნაწილებია: კათოდური ელექტროდი, რომელიც დამზადებულია ალუმინის ფოლგაზე და ანოდური ელექტროდი რომელიც დამზადებულია სპილენძის ფოლგაზე. კათოდი დამზადებულია ლითიუმ კობალტის ოქსიდისაგან, ანოდი კი დამზადებულია გრაფიტისაგან, ელექტროდები განცალკევებულია ერთმანეთისაგან ელექტროლიტით გაჟღენთილი ფოროვანი სეპარატორით.



ნახ. 4. ლითიუმ იონის ბატარეას პრინციპიალური ელექტრული სქემა

ლითიუმ-იონის ბატარეები ძირითადად გამოიყენება სამომხმარებლო ელექტრონიკაში მათი მაღალი ენერჯის და დაბალი ლოდინის დანაკარგების გამო. უახლოესი წლების განმავლობაში მოხდა ახალი ტექნოლოგიების განვითარება და 2000 წლიდან ლითიუმ-იონის ბატარეები უფრო მეტად გამოიყენება ელექტროძრავისა და საავიაციო პროგრამებისთვის. ბოლომდე დამუხტული აკუმულატორის ძაბვა 3,5-3,8 ვოლტია. ელექტრულ სისტემებში გამოიყენება აკუმულატორთა ბატარეები რომლებსაც შეუძლიათ გასცენ ქსელში 20 მეგავატი 1 საათის განმავლობაში, ან 50 მგვტ 0,5 საათის განმავლობაში ან და 400 მეგავატი 20 წამის განმავლობაში.

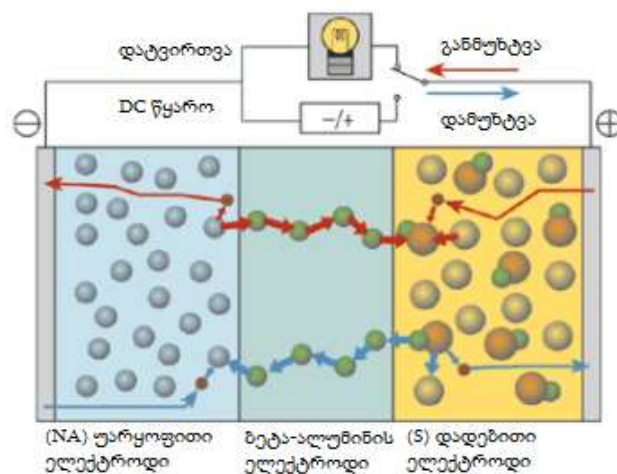
ლითიუმ-იონის ბატარეებს აგრეთვე გააჩნიათ უარყოფითი მხარე. პირველი, მისი მუშაობის ხანგძლივობა დამოკიდებულია დატენვის ციკლზე, ანუ თუ რამდენად ხშირად ხდება მისი დატენვა განმუხტვის პროცესი, ასეთი ბატარეები არ უნდა გამოიყენებოდეს იმ მომხმარებლებისთვის რომლებიც მოითხოვენ ბატარიის სრულ განმუხტვას. მეორე, რკინის ოქსიდის ელექტროდი შეიძლება გახდეს თერმულად არასტაბილური ელემენტის გადახურების გამო, რის გამოც ირღვევა შესაბამისად განმუხტვის და დამუხტვის ნორმალური რეჟიმი. საბოლოოდ, ასეთი ბატარიის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს მისი ფასი. ცხრილი 2.-ში მოცემულია ლითიუმ იონის ბატარეას ელექტრული პარამეტრები.

ცხრილი 2. ლითიუმ იონის ბატარეას ელექტრული პარამეტრები

შენახვის ფორმა	ქიმიური ენერჯია
დროის კლასიფიკაცია	მოკლევადიანი შენახვა
ტევადობა	1kWh – 40MWh
ენერჯის სიმკვრივე	110 - 240 Wh/kg
ეფექტიანობის მაჩვენებელი	90% - 97%
თვითგანმუხტვის მაჩვენ.	0,008 – 0,041 %/d
რეაქციის დრო	3 – 5 ms

გოგირდ-ნატრიუმის ბატარეა შეიცავს დამდნარ ნატრიუმს როგორც უარყოფით ელექტროდს (ანოდი), მყარ კერამიკულ ელექტროლიტს და დამდნარ გოგირდს როგორც დადებით ელექტროდს (კათოდი). ნატრიუმის დადებითი იონები მყარი კერამიკული ელექტროლიტის გავლით გადადიან გამდნარ გოგირდში სადაც ხდება ქიმიური რეაქცია, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.5-ზე. იონების გადაადგილების გამარტივების მიზნით გოგირდი და ნატრიუმი ინახება გამდნარ მდგომარეობაში 300°C და 360°C ტემპერატურის ქვეშ.

მთავარ ფუნქციას ასეთი ტიპის ბატარეებისთვის წარმოადგენს ენერჯის დიდი ხნის განმავლობაში შენახვა, ასევე გამოიყენება დატვირთვების გაწონასწორებისთვის და განახლებადი ენერჯების მიერ როგორცაა მზის და ქარის ელექტროსადგურები გამომავალი სიმძლავრის გაგლუვება. მარგი ქმედების კოეფიციენტია 89%. პიკური დატვირთვის დროს ბატარეას შეუძლია 30 წამის განმავლობაში გასცეს ქსელში დენი, რომელიც აღემატება მის ნომინალური განმუხტვის დენს 6 ჯერ. აკუმულატორებს ათავსებენ თბოიზოლირებულ ვაკუმურ სათავსოში. დამუხტულ მდგომარეობაში აკუმულატორის ძაბვა 2 ვოლტია.



ნახ. 5. გოგირდ-ნატრიუმის ბატარეას პრინციპიული ელექტრული სქემა

ასეთი ტიპის ბატარეებს უწევთ მაღალი ტემპერატურის ქვეშ მუშაობა და შესაძლებელია მოხდეს მისი აფეთქება იმ შემთხვევაში თუ შეხება ექნებათ წყალთან ამიტომ უნდა მოხდეს უსაფრთხოების წესების დაცვა. მისი გამომავალი ენერგია მერყეობს 360 კვტ საათიდან ათეულ მგვტ საათამდე, ნომინალური განმუხტვის სიმძლავრე მერყეობს 50 კვტ-დან 100 კვტ-მდე. ცხრილი 3.-ში მოცემულია გოგორდ ნატრიუმის ბატარეას ელექტრული პარამეტრები.

ცხრილი 3. გოგორდ-ნატრიუმის ბატარეას ელექტრული პარამეტრები

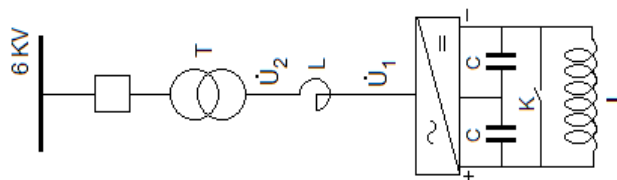
შენახვის ფორმა	ქიმიური ენერგია
დროის კლასიფიკაცია	მოკლევადიანი შენახვა
ტევადობა	1kWh – 100MWh
ენერჯის სიმკვრივე	120 - 230 Wh/kg
ეფექტიანობის მაჩვენებელი	72% - 81%
თვითგანმუხტვის მაჩვენებელი	ქიმიურად მინიმალური, მაგრამ სითბური დანაკარგები/სითბური ენერგია

თავი 2. ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის გათვალისწინებით დინამიკური მდგრადობის ანალიზი

მეორე თავში განხილულია სხვადასხვა მაგალითებით ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის გავლენა ელექტრული სისტემის დინამიკურ მდგრადობაზე.

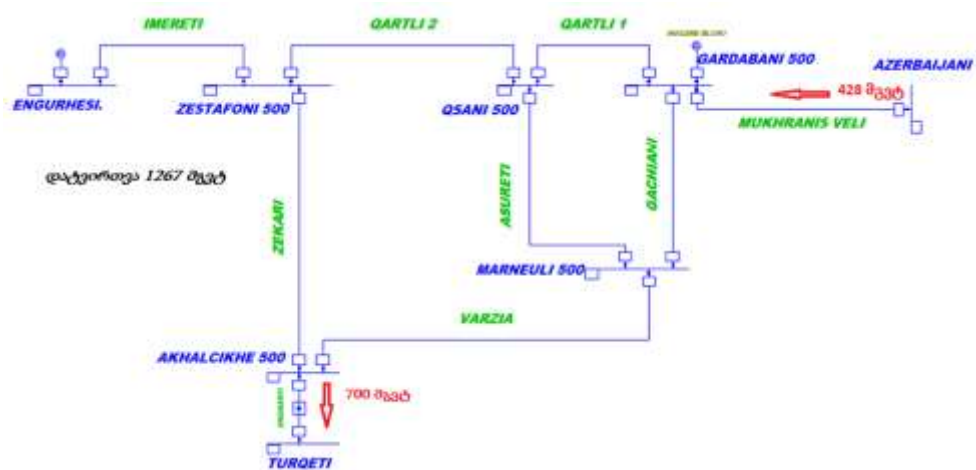
ელექტრული ენერჯის აკუმულირების ერთ-ერთი საშუალებაა მისი დაგროვება მაგნიტური ველის ენერჯის სახით. კოჭის მაგნიტური ველის ენერჯის სიდიდე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით: $E = \frac{LI^2}{2}$ ჯოული. დიდი ინდუქციურობის მიღება შეიძლება კოჭის ხვიათა დიდი რაოდენობით. დენის დანაკარგების უგულვებლყოფა შეიძლება მივიღოთ ზეგამტარ სადენში.

შერთებულ შტატებში ფირმა „American Superconductor“ შექმნა მოწყობილობა D-SMES რომლის საშუალებით 20 მგვტ.სთ ტოლი ენერჯის დაგროვება შეუძლია. ამ მოწყობილობის გამარტივებული სქემა ნაჩვენებია ნახ.6-ზე. მოწყობილობა შედგება L ინდუქციურობის მქონე ზეგამტარ კოჭისგან, ტევადობისგან და ტრანზისტორული ინვერტორ გამმართველისგან. თუ K ჩამრთველი ჩაკეტილია, დენი კოჭაში გაივლის უსასრულო დროის განმავლობაში. ჩამრთველის გახსნის მომენტიდან იწყება ენერჯის გაცემა ქსელში. 2003 წელს ვისკონსინის შტატში დადგმული იყო 6 ასეთი მოწყობილობა და ეკონომიკურმა ეფექტმა მიაღწია მიაღწია 3,2 მილიონ დოლარს, ეს მიღწეულია მომხმარებლისთვის მიწოდებული ელექტრული ენერჯის ხარისხის ამაღლების ხარჯზე. ვინაიდან ენერჯის დამაგროვებელი უინერცოა, მას შეუძლია აქტიური და რეაქტიული ენერჯის გაცემა მყისიერად და ამით გააუმჯობესოს ელექტრული ენერჯის ძაბვის და სიხშირის პარამეტრები. ზემოთ აღწერილ დამაგროვებელს შეუძლია გასცეს 20 მგვტ 1 საათის განმავლობაში, 10 მგვტ 2 საათის განმავლობაში ან 400 მგვტ 100 წამის განმავლობაში. ასეთი დამაგროვებელი ძალიან სასარგებლო იქნება საქართველოს ელექტრული სისტემის მუშაობის იმედიანობის გასაზრდელად. თავისი გეოგრაფიული მდგომარეობიდან გამომდინარე, საქართველოს ელექტროსისტემა წარმოადგენს ბუნებრივ დერეფანს თურქეთის, აზერბაიჯანის, სომხეთის და რუსეთის ელექტრულ სისტემებს შორის ენერჯით ვაჭრობისათვის.



ნახ. 6. ზეგამტარული ენერჯის დამაგროვებლის გამარტივებული ელექტრული სქემა

საქართველოს ელექტროსისტემის არსებული 500 კვ-იანი ქსელი და ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი საშუალებას იძლევა განვახორციელოთ 1000-1400 მგვტ სიმძლავრის გადაცემა აზერბაიჯანიდან თურქეთში, რუსეთიდან ან სომხეთიდან თურქეთში, რუსეთიდან საქართველოსა და სომხეთის გავლით ირანში და სხვა. საქართველოს 500 კვ-იანი სქემა ნაჩვენებია ნახ.7-ზე.

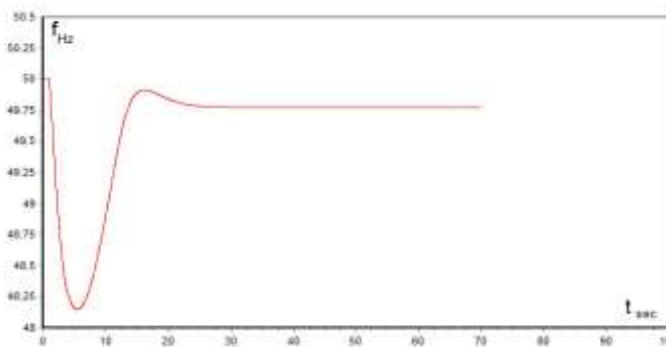


ნახ. 7. საქართველოს 500 კვ-იანი სქემა

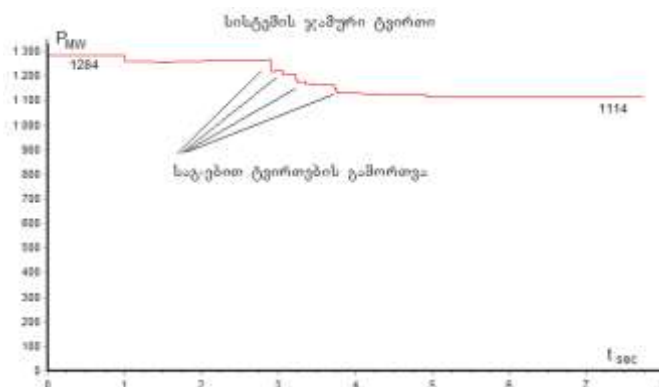
ტექნიკურად ასეთი მნიშვნელოვანი სიმძლავრის გატარება შესაძლებელია, მაგრამ იქმნება გარკვეული პრობლემები. პრობლემა საქართველოს ელექტროსისტემის სიდიდეშია. საქართველოს სისტემის ზამთრის მაქსიმუმის დროს სიმძლავრე 1700-1800 მგვტ-ია, ზაფხულში ღამის საათებში კი 900-1000 მგვტ-ია. თუ აზერბაიჯანიდან თურქეთში გადის 700 მგვტ, მაშინ გარდაბანი-სამუხი (მუხრანის) ხაზის გამორთვა შექმნის საქართველოში 40-70% დეფიციტს რეჟიმის მიხედვით. სიხშირე დაიწყებს ძალიან სწრაფად ვარდნას და საჭირო ხდება მომენტალურად შემცირდეს თურქეთში გაცემა ან/და გამოირთოს სასისტემო ავტომატიკის მეშვეობით საქართველოს მოხმარების დიდი ნაწილი, ეს დაკავშირებულია დიდ მატერიალურ ზარალთან, თანაც ეს ყველაფერი შეიძლება მოხდეს იმ

დროს, როცა საქართველოს ელექტრო სადგურებზე არსებობს როგორც მბრუნავი ასევე „ცივი“ რეზერვი. ამ რეზერვის ამოქმედებას ჭირდება რამოდენიმე ათეული წამი, იმისათვის რომ ჰიდროგენერატორების მიმმართველი აპარატები გაიღოს საჭირო სიდიდით. კერძოდ, ენგურჰესის მანქანების მიერ სიმძლავრის აღების სიჩქარეა 8 მგვტ/წმ, ვარდნილ ჰესის 7,5 მგვტ/წმ, შაორ ჰესზე 0,5 მგვტ/წმ, ხრამჰესებზე და ჟინვალზე 1,2 მგვტ/წმ.

მოვახდინეთ ასეთი ავარიის მოდელირება როდესაც აზერბაიჯანიდან შემოდიოდა 428 მგვტ და თურქეთში გადიოდა 700 მგვტ. საქართველოს სისტემის ჯამური ტვირთი იყო 1267 მგვტ. ენგურჰესზე მუშაობდა ხუთივე მანქანა. 500 კვ ძაბვის ხაზის „მუხრანის ველის“ გამორთვა იწვევს საქართველოს სისტემაში სიხშირის სწრაფ შემცირებას, ნახ.8.



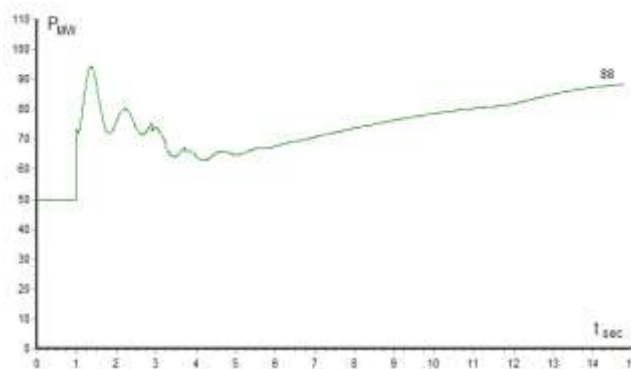
ნახ. 8. სიხშირის ცვლილება ეგ მუხრანის ველის გამორთვის შემდეგ



ნახ. 9. საქართველოს ჯამური მოხმარება

სიხშირის ასეთი შემცირება გამოიწვევს სიხშირით ავტომატური განტვირთვის (საგ) რელეების ამოქმედებას და ამის შედეგად გამოირთვება ზოგიერთი დატვირთვა. ამ შემთხვევაში გამოირთო 260 მგვტ. ნახ.9

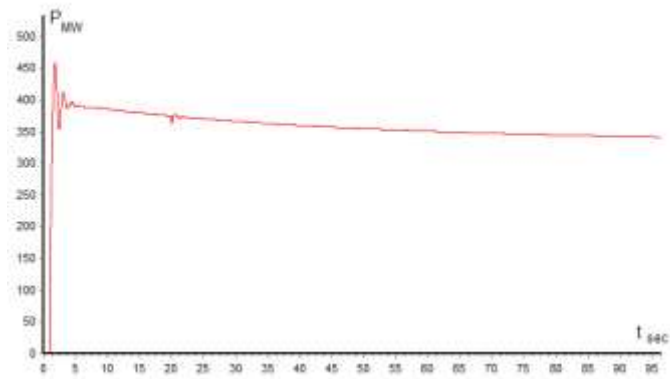
დეფიციტით დარჩენილი $428-260=168$ მგვტ სიმძლავრე დაიფარება გენერატორების მიერ სიმძლავრის აღებით. მაგალითად ენგურჰესის N1 მანქანამ აიღო დამატებით 38 მგვტ. ნახ.10.



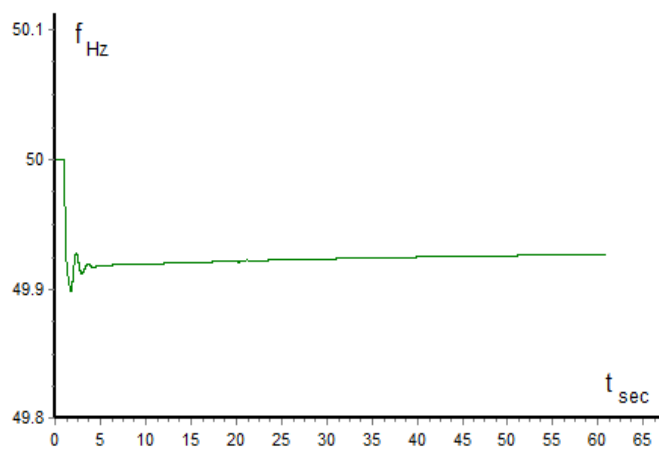
ნახ. 10. ენგურჰესის ერთი აგრეგატის მიერ განვითარებული სიმძლავრე

გარდა ამისა გადაიტვირთა გარდაბანში ბლოკი N9 რაც მოითხოვს დისპეჩერის ჩარევას.

მოდელირების შემდეგ ეტაპზე, გარდაბანში, 220 კვ სალტეზე მიერთებულია ზეგამტარული ენერჯის დამაგროვებელი. დამაგროვებლის ნომინალური ძაბვა 10 კვ-ია, ამიტომ საჭირო გახდა 220/10კვ ტრანსფორმატორის გამოყენება. დამაგროვებლის ტევადობა 20 მგვტ.სთ-ია და მას შეუძლია გასცეს 400 მგვტ 100 წამის განმავლობაში. ნახ.11-ზე ნაჩვენებია ბატარეის მიერ სიმძლავრის გაცემის მრუდი. როგორც ვხედავთ ბატარეამ თავის თავზე აიღო დეფიციტის უდიდესი ნაწილი, სიხშირე პრაქტიკულად არ შეცვლილა ნახ.12 და ჰიდროგენერატორებმა არ აიღეს დამატებითი ტვირთი.



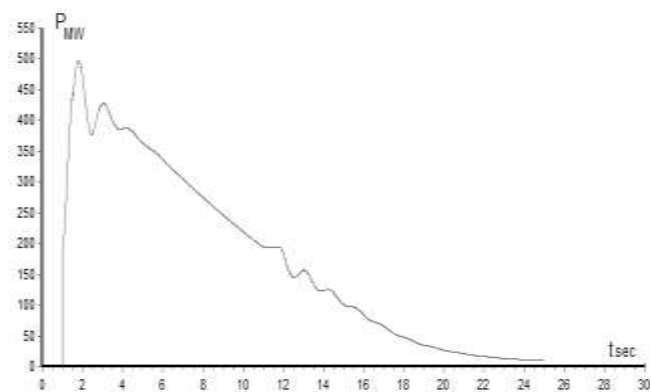
ნახ. 11. ბატარეის მიერ სიმძლავრის გაცემის მრუდი.



ნახ. 12. სიხშირე ელექტრული ენერჯის დამაგროვებელი გამოყენებისას

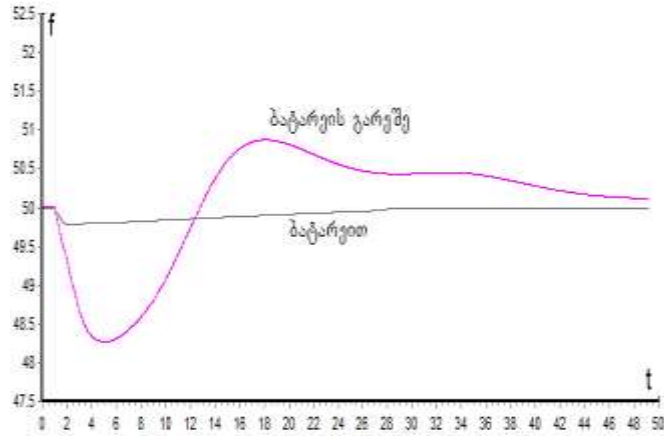
როგორც აღვნიშნეთ ბატარეას არ შეუძლია 100 წამზე მეტხანს გასცეს 400 მგვტ სიმძლავრე, ამიტომ მართო ბატარეა არ წყვეტს პრობლემას. საჭიროა გვქონდეს ინფორმაციის გადაცემის სისტემა. ასეთ სისტემას წარმოადგენს ამჟამად არსებული სისტემა “SCADA” - supervisory control and data acquisition“ – „სადისპეჩერო მართვა და მონაცემთა შეგროვება“. ამ სისტემის ფარგლებში ყველა ძირითადი ელექტროსადგური და 500-220 კვ ძაბვის ქვესადგური დაკავშირებული ერთმანეთთან და სადისპეჩერო ფართან ოპტიკური კაბელებით. სადისპეჩერო პულტის კომპიუტერში რეგულარულად შემოდის ინფორმაცია გენერატორების დატვირთვაზე, ხაზების და ტრანსფორმატორების მდგომარეობაზე (ჩართულია თუ გამორთულია). ბატარეის სწორი გამოყენებისთვის საჭიროა ვაკონტროლოთ

მის მიერ გაცემული აქტიური სიმძლავრე. დამყარებულ რეჟიმში ბატარეა არ გაცემს აქტიურ სიმძლავრეს, მაგრამ დეფიციტის წარმოქმნისას მყისიერად იწყებს სიმძლავრის გაცემას. ბატარეის მიერ სიმძლავრის აღებისას სიგნალები უნდა გაიგზავნოს იმ გენერატორებზე რომელსაც გააჩნიათ მბრუნავი რეზერვი. გენერატორების დატვირთვის გაზრდა გამოიწვევს ბატარეის სიმძლავრის შემცირებას. ეს პროცესი გაგრძელდება მანამდე სანამ გენერატორები არ დაფარავენ წარმოქმნილ დეფიციტს. ასეთი ალგორითმი რეალიზირებული იყო მოდელირების დროს. ნახ.13-ზე ნაჩვენებია დამაგროვებლის მიერ სიმძლავრის გაცემის მრუდი. როგორც ჩანს ნახაზიდან, დეფიციტის ლიკვიდაციას დაჭირდა 25 წამი და მოხმარებლის გამორთვა არ მოხდა.



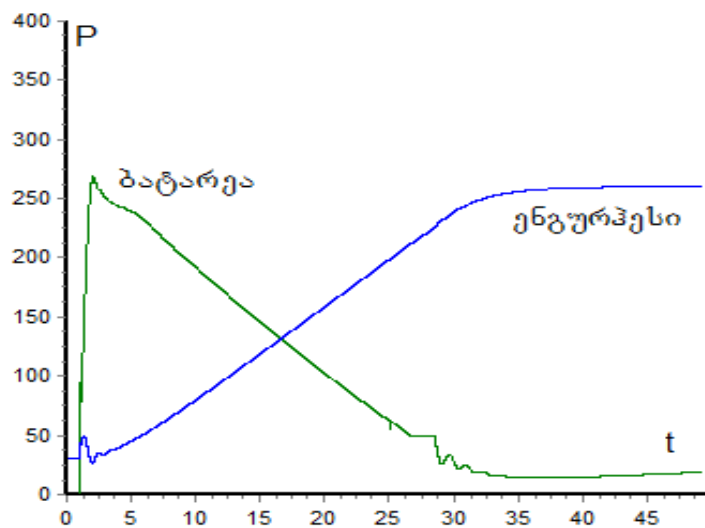
ნახ. 13. დამაგროვებლის მიერ სიმძლავრის გაცემის მრუდი

ანალოგიური ეფექტი იქნება სხვა რეჟიმშიც. მაგალითად საქართველოს სისტემა მუშაობს იზოლირებულად. ჯამური ტვირთია 1284 მგვტ, თურქეთში გადის 200 მგვტ. გარდაბანში ბლოკი N9 მუშაობს 280 მგვტ სიმძლავრით. მისი ავარიული გამორთვა იწვევს სისტემაში სიხშირის შემცირებას და სიხშირის ავტომატური განტვირთვის რეაქციები გამორთავენ სხვადასხვა ქვესადგურში 130 მგვტ დატვირთვის. სიხშირე იწყებს ზრდას და აღწევს 51 ჰერცს, შემდეგ კი რამოდენიმე რყევის შემდეგ მყარდება, ნახ.14.



ნახ. 14. სიხშირე ბატარეით და ბატარეის გარეშე

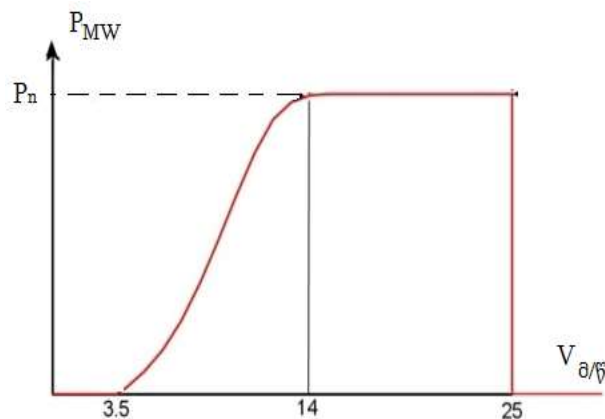
თუკი სისტემაში ჩართულია ბატარეა, მაშინ სიხშირე პრაქტიკულად არ იცვლება. ბლოკის გამორთვისთანავე ბატარეა თავის თავზე იღებს ბლოკის ტვირთს და აძლევს საშუალებას ენგურჰესს აილოს დატვირთვა მისთვის მისაღებ სიჩქარით. ნახ.15. ამასობაში ბატარეის ტვირთი შესაბამისად მცირდება.



ნახ. 15. ბატარეის და ენგურჰესის აქტიური სიმძლავრის მრუდი

**თავი 3. ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის გათვალისწინებით
სტატიკური მდგრადობის ანალიზი**

ქარის ელექტროსადგურების სწრაფი განვითარება განპირობებულია „სუფთა“ ენერჯის გამოყენების დიდი უპირატესობით. ასეთ სადგურს არ ჭირდება სათბობი და შედეგად არ ხდება ატმოსფეროში CO₂ გამოყოფა. ამავე დროს ქარის ელექტროსადგურები ქმნიან გარკვეულ პრობლემებს ელექტრული სისტემის მუშაობაში. საქმე იმაშია, რომ ქარის სადგური მიერ ქსელში გაცემული სიმძლავრე ყოველთვის არ არის სტაბილური. ეს სიმძლავრე შეიძლება იცვლებოდეს ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით. ქარის გენერატორის ტიპური მახასიათებელი მოყვანილია ნახ.16-ზე.

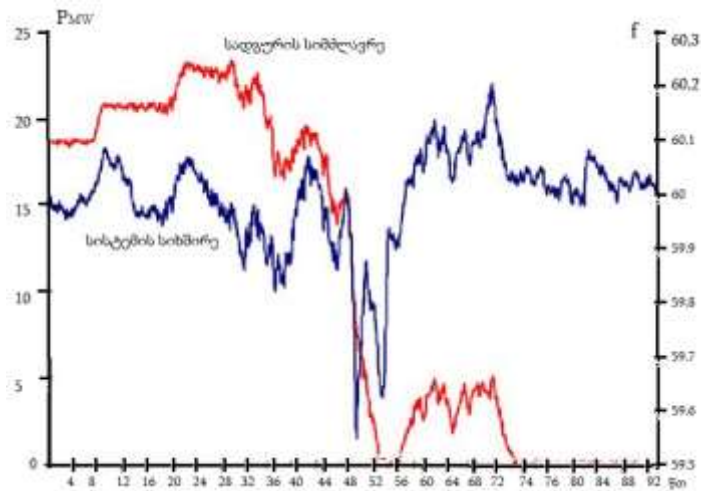


ნახ. 16. დამოკიდებულება ქარის სიჩქარესა და ქარის გენერატორის მიერ გამოიმუშავებულ სიმძლავრეს შორის

ქარის გენერატორი მუშაობს ნომინალური სიმძლავრით, თუ ქარის სიჩქარე 14მ/წმ-25მ/წმ დიაპაზონშია. ძალიან ძლიერი ქარის დროს, რომლის სიჩქარე მაგალითად 25მ/წმ (ეს 90კმ/სთ) , ქარის ტურბინა გაითიშება. თუ ქარის სიჩქარე ნაკლებია 14 მ/წმ ზე, მაშინ ქარის გენერატორის სიმძლავრე იცვლება ქართან ერთად. შესაბამისად იცვლება ელექტრულ სისტემაში მიწოდებული სიმძლავრე. ამან კი შეიძლება გამოიწვიოს როგორც სისტემის სიხშირის ასევე ძაბვის რყევა. ეს

დაუშვებელია სისტემის მომხმარებლების ელექტრომომარაგების თვალსაზრისით.

ქვემოთ მოყვანილ ნახატზე ნაჩვენებია თუ როგორ იცვლება ამერიკის შეერთებული შტატების ერთ-ერთი სადგურის სიმძლავრე და სისტემის სიხშირე ქარის სიჩქარის ცვლილების გამო ნახ.17

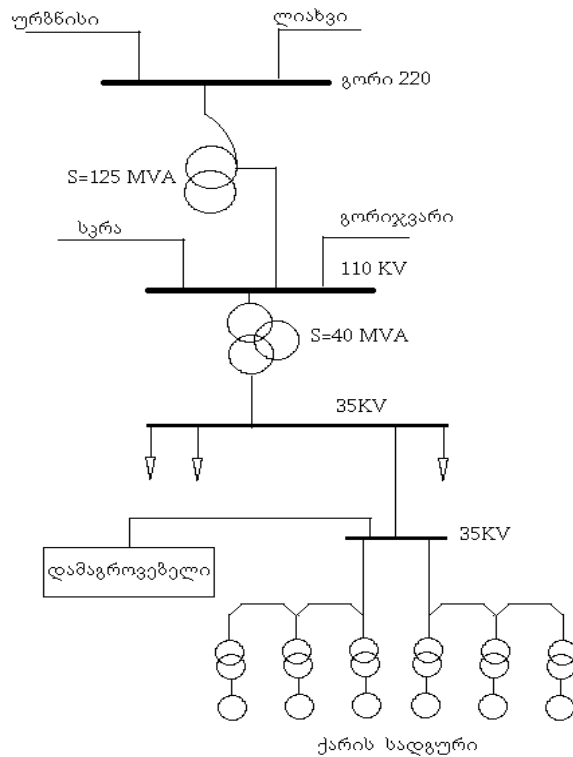


ნახ. 17. სისტემის სიხშირის ცვლილება ქარის სიჩქარის ცვლილების გამო

საქართველოში არსებობს ქარის სადგური. ერთერთია გორის 20 მგვტ სიმძლავრის ქარის სადგური. სადგური შედგება ექვსი ქარის გენერატორისაგან, რომელთა ჯამური ნომინალური სიმძლავრეა 20 მგვტ. სადგური მიერთებული იქნება გორის ქვესადგურის 35 კვ ძაბვის სალტებთან. ამ სადგურის სისტემის მუშაობაზე გავლენის შესწავლის მიზნით ჩატარდა ქარის ცვლილების პროცესის მოდელირება. მოდელში გამოყენებული იყო „შემთხვევითი რიცხვების გენერატორი“, რომელიც ცვლიდა ქარის სადგურის მიერ გაცემულ სიმძლავრეს 5 მგვტ დან 15 მგვტ მდე. მოდელირება ჩატარდა ორჯერ, ერთხელ მხოლოდ ქარის სადგურის მხედველობაში მიღებით, მეორედ ქარის სადგურთან ჩართული იყო ენერჯის დამაგროვებელი. შესაბამისი სქემა მოყვანილია ნახ.18-ზე.

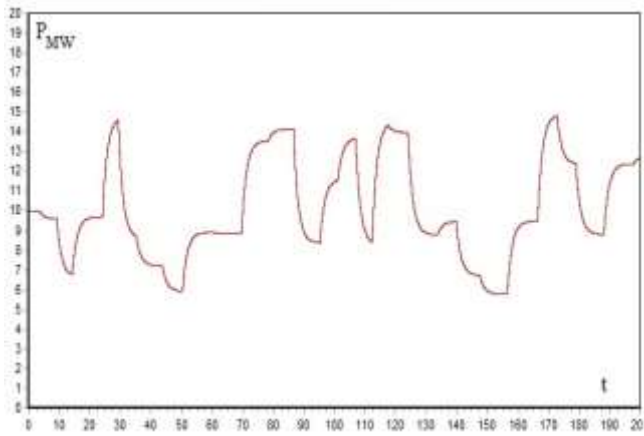
ელექტრული სისტემის რეჟიმი მოდელირების ორივე შემთხვევაში იყო შემდეგი.

სისტემის ჯამური ტვირთი 1256 მგვტ; სისტემის ჯამური გენერაცია 1646 მგვტ; ექსპორტი თურქეთში 345 მგვტ;

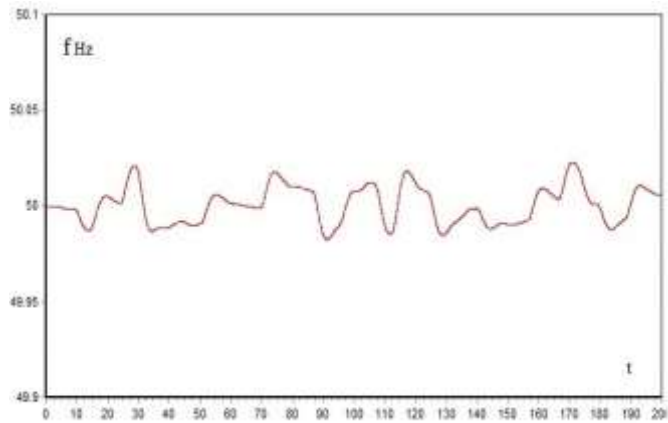


ნახ. 18. ქვესადგური გორის 220 კვ ჩანაცვლების სქემა

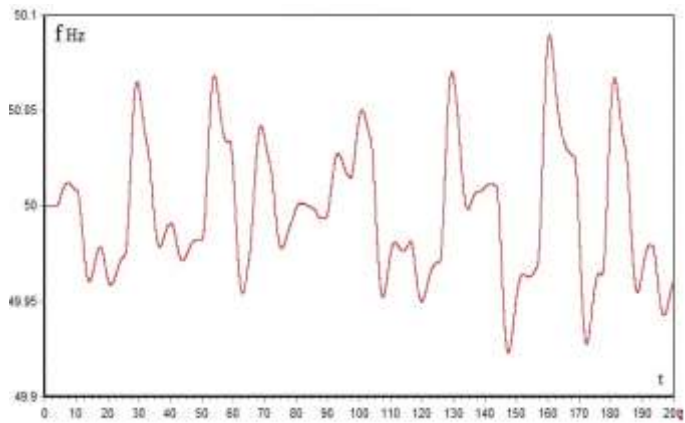
ქვემოთ მოყვანილია მოდელირების რეზულტატები, იმ შემთხვევაში, როცა ენერჯის დამაგროვებელი გამორთულია. ნახ.19-ზე ნაჩვენებია ქარის სადგურის სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით. სისტემაში გაცემული სიმძლავრე იცვლება 6-15 მგვტ-ს ფარგლებში. სიმძლავრის ასეთი რყევა იწვევს სისტემის სიხშირის ცვლილებას, ნახ.20 სიხშირის გადახრა უმნიშვნელოა. მაგრამ თუ განვიხილავთ ზაფხულის მინიმალურ რეჟიმს, სადაც ჯამური გენერაცია 920 მგვტ-ია, მაშინ სიხშირის ცვლილება იქნება დაახლოვებით +0,1 -0,1 ჰერცის ფარგლებში, ნახ.21



ნახ. 19. აქტიური სიმბლავრის ცვლილება როდესაც ენერჯის დამაგროვებელი გამორთულია

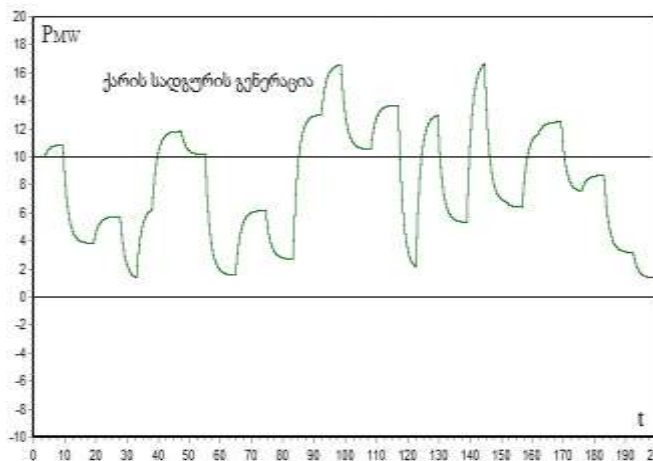


ნახ. 20. სიხშირის ცვლილება როდესაც ენერჯის დამაგროვებელი გამორთულია

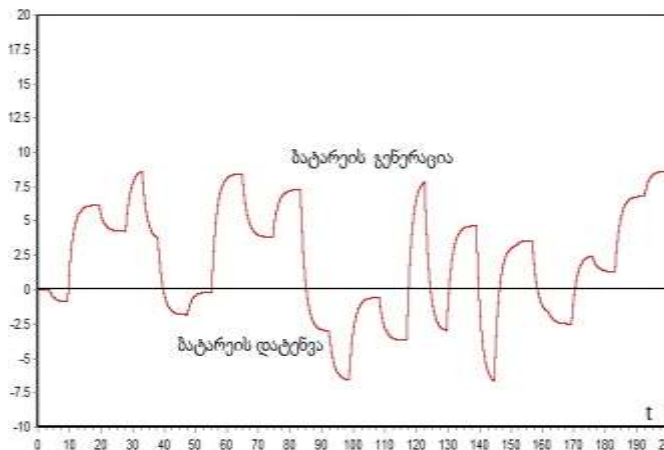


ნახ. 21. სიხშირის ცვლილება მინიმალური დატვირთვის პერიოდში როდესაც ენერჯის დამაგროვებელი გამორთულია

ენერგიის დამაგროვებლის გამოყენება რადიკალურად ცვლის პროცესს. დამაგროვებელი პრაქტიკულად მყისიერად გასცემს ან შთანთქავს სიმძლავრეს, ისე, რომ ქსელში გაცემული სიმძლავრე რჩება უცვლელი. ქარის სადგურის სიმძლავრის ცვლილება მოყვანილია ნახ.22 ხოლო ნახ.23 კი მოყვანილია დამაგროვებლის სიმძლავრე.



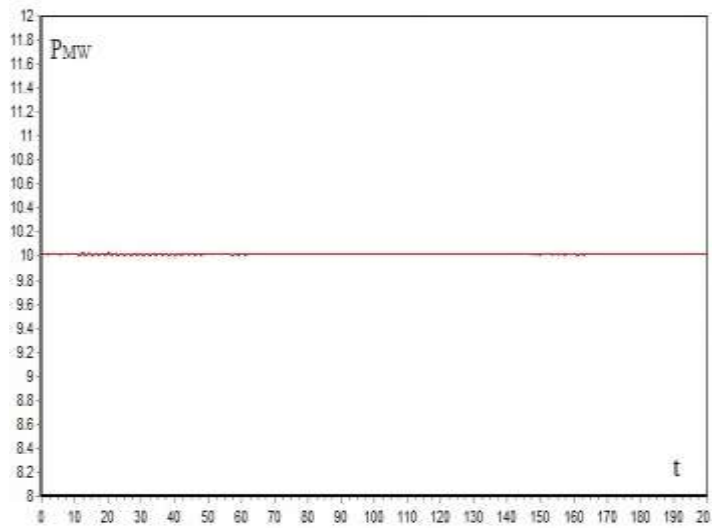
ნახ. 22. ქარის გენერატორების აქტიური სიმძლავრის მრუდი



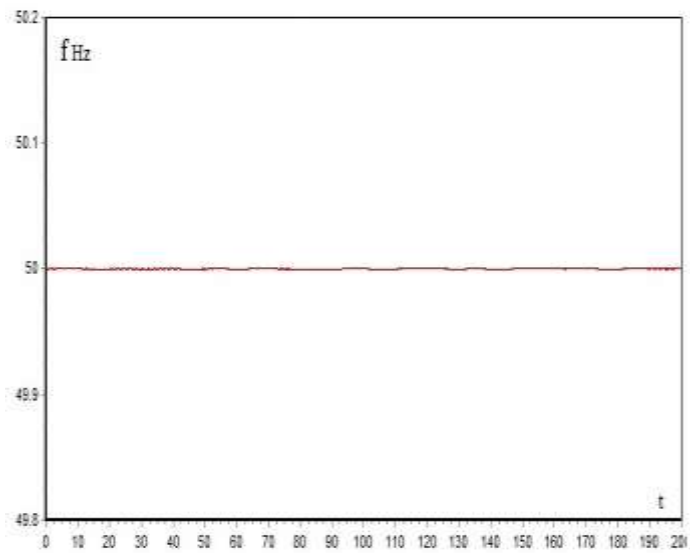
ნახ. 23. ენერგიის დამაგროვებლის აქტიური სიმძლავრის მრუდი

ამრიგად დამაგროვებელი ხან გასცემს სიმძლავრეს ქსელში, ხან მოიხმარს სიმძლავრეს ქსელიდან. ამის შედეგად ქარის სადგურის და დამაგროვებლის ჯამური სიმძლავრე მუდმივია და უდრის 10 მგვტ, ნახ.24

ბუნებრივია, რომ ამ პირობებში სისტემის სიხშირე დარჩება უცვლელი, ნახ.25.



ნახ. 24. ქარის გენერატორებისა და ენერჯის დამაგროვებლის ჯამური გენერირებული სიმძლავრე



ნახ. 25. სიხშირე როდესაც ენერჯის დამაგროვებელი ჩართულია

დასკვნა

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ დასკვნა რომ ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის და სტატიკური კომპენსატორის გამოყენება ელექტრულ სისტემაში ამაღლებს სტატიკურ და დინამიკურ მდგრადობას. კერძოდ:

1. ელექტრულ ქსელში ენერჯის დამაგროვებლის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს შევინახოთ ელექტრული ენერჯია იმ პერიოდის განმავლობაში როდესაც მოხმარება არის მინიმალური და გამოვიყენოთ საჭიროების მიხედვით როდესაც მოხმარება არის მაღალი.
2. ელექტრულ ქსელში განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაციასთან ერთად უნდა მოხდეს ენერჯის დამაგროვებლის მოწყობა მაგალითად: ქარის ელექტროსადგურის მიერ გამომუშავებულ სიმძლავრე იცვლება ქარის სიჩქარის მიხედვით, შესაბამისად იცვლება ელექტრულ სისტემაში მიწოდებული სიმძლავრე. ამან კი შეიძლება გამოიწვიოს როგორც სისტემის სიხშირის ასევე ძაბვის რყევა. ეს დაუშვებელია სისტემის მომხმარებლების ელექტრომომარაგების თვალსაზრისით, ელექტრული ენერჯის დამაგროვებლის დაყენება კი ხსნის ამ პრობლემას და ქსელში მიწოდებული სიმძლავრე რჩება უცვლელი.
3. თუ სისტემაში გამოყენებული იქნება ზეგამტარული ელექტრული ენერჯის დამაგროვებელი ის უზრუნველყოფს მყისიერად გასცეს ან მიიღოს აქტიური სიმძლავრე სერიოზული ავარიის დროს, შედეგად შენარჩუნებული იქნება დინამიკური მდგრადობა.
4. ელექტრული ენერჯის დამაგროვებელი მაღალი ეფექტურობით გამოიყენება მზრუნავი რეზერვის როლში, ასევე გამორიცხავს ძაბვის და სიხშირის რყევებს ნებისმიერი სახის შემფოთების დროს.

5. სტატიკური სინქრონული კომპენსატორის გამოყენება ამაღლებს სისტემის დინამიკურ მდგრადობას და ასევე ეფექტურად მოქმედებს ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის მოქმედებისას.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. რუხვაძე მ., შოვნაძე გ. ზეგამტარული ენერჯის დამაგროვებლის გავლენა ელექტროსისტემის მუშაობაზე. „ენერჯია“, 2018, N2(86), 45-48გვ.
2. არზიანი გ., რუხვაძე მ., შოვნაძე გ. ახალციხის ქვესადგურში სტატიკური კომპენსატორის გამოყენების შესახებ. „ენერჯია“, 2016, N4(80), 70-73 გვ.
3. შოვნაძე გ. ენერჯის დამაგროვებლის გამოყენება სიხშირის რყევების ჩასაქრობად. „ინტელექტუალი“, 2018, N35, 181-185 გვ.

Resume

According to statistic of last year's electrical demand and new generation course are increasing in Georgia power system, at the same time to construct new interconnection lines also to rehabilitate exist interconnections lines. Therefore, it is possible increase active power import and export with neighbor system, also Georgian power system can be use as transit system. In order to improve the system reliability in parallel in these processes appropriate measures should be taken to avoid violation of the system's dynamic sustainability.

First chapter of diploma work consist energy storage use for electrical system reliably operation. In this chapter is considered and compared different type of energy storage, the principe of operation, also advantage and disadvantage side. Also is discussed algorithm of static synchronous compensator, the regime of operation, advantage and disadvantage of other such kind of device.

Second chapter of diploma work consist dynamic stability analysis in Georgian power system with and without energy storage and static synchronous compensator. It is sometimes possible bad situation of operation in Georgian power system especially when operation isolate mode because power system is very small respectively small inertia. Therefore, it is necessary to avoid the unstable operation of the system during large power inbalance. Large power inbalance can be caused by following situation: Emergency tripping of interconnection 500 KV OHLs; Emergency tripping of internal transit OHLs; shutdown of the large power units Enguri HPP, 9th thermal unit; Nowadays it is used to prevent this problem following activities: RAS (remedial action scheme); Spinning reserve; UFLS (under frequency load shedding); but all of activities depend on some conditions, for example: Spinning reserve take some time for activate because of the time constant of speed governor and frequency droop of generator; under frequency load shedding and remedial action scheme don't activate until frequency rich certain degree. In some case when the inbalance is very large the frequency changes instantaneously, therefore to activate UFLS or RAS and shut down demand/generation, that is mean the dynamic stability do not maintain. For increased reliability power system, it is necessary instant reaction when inbalance is very large. Effective method of dynamic stability maintenance is to use energy storage and static synchronous compensator. In case when happen any kind of inbalance energy storage and static synchronous compensator instantaneously either generate or consume active/reactive power, therefore dynamic stability will be maintenance.

Third chapter of diploma work consist static stability analysis in Georgian power system. The generation and demand of electric power depend on the season, for example: During the winter period, generation of HPPs is small than during summer, because water is less in the river and in some case it is necessary import from neighbor system. The high generation of HPPs during the spring and summer when due to high water flows available in Georgian rivers and it is possible to store

energy by energy storage and use during the winter. Also energy storage use for renewable energy source (wind and solar power plants) integration. Wind generation output power is depended on the wind speed, meaning that even modest wind speed fluctuations may result in significant variation of power output from wind generation therefore it could be change voltage and frequency, which is undesirable process for demand. Energy storage power input and output can be controlled precisely and varied rapidly to offset effects from RE generation short duration variability, therefore active power of sum wind power plant and energy storage will be constant. In addition, energy storage can be used as well to store RE generation output when electricity demand is low and used when electricity demand is high.