

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

თეონა ელიზარაშვილი

„FACTS“ და „BESS“ ტექნოლოგიები მომავლის ენერგეტიკული
სისტემების მოქნილობისა და მდგრადობისთვის

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: A კატეგორიის პროფესორი გ. არზიანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

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

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

დღესდღეობით თანამედროვე ელექტროენერგეტიკული სისტემები დიდ ტრანსფორმაციას განიცდის, რაც განპირობებულია მიმდინარე გლობალური დათბობითა და კლიმატის ცვლილებით. ნახშირბადის ნეიტრალიტეტის მიღწევის გლობალური ვალდებულებების ფონზე ენერჯის განახლებადი წყაროების წილი სისტემის ჯამურ დადგმულ სიმძლავრეში მზარდია. ამ ტენდენციას პარალელურად მოჰყვება ელექტროენერგეტიკული სისტემების ოპერირების ტრადიციული პარადიგმის ცვლილება: დიდი ინერჯის მქონე კონტროლირებად სინქრონულ გენერატორებს თანდათანობით ანაცვლებს ძალოვან ელექტრონიკაზე, ინვერტორებზე დაფუძნებული განახლებადი ელექტროსადგურები, რომლებსაც არ შეუძლია სისტემისთვის ბუნებრივი ინერჯის მიწოდება.

ეს ტრანსფორმაცია ქმნის ტექნიკურ გამოწვევებს, რომლებიც ტრადიციული ქსელის მართვის ინსტრუმენტებით ვერ გადაიჭრება სათანადო ეფექტიანობით. კერძოდ, სისტემის ინერჯის შემცირება, ძაბვის პროფილის გაუარესება განაწილებული გენერაციის ობიექტების კვანძებში და სიხშირის გადახრების რისკის ზრდა - ეს ყველაფერი ახალი, ელექტრონიკაზე დაფუძნებული მართვის ტექნოლოგიების გამოყენებას მოითხოვს. სწორედ ამ კონტექსტში მოიპოვა განსაკუთრებული ყურადღება მოქნილი ცვლადი დენის გადამცემი სისტემების (მცდგს) და ბატარეის ენერჯის შენახვის სისტემების (ეშბ) კომბინირებულმა გამოყენებამ.

კვლევის აქტუალობა და პრაქტიკული მნიშვნელობა

განახლებადი ენერჯის წყაროების წილის ზრდასთან ერთად, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც მათი კონცენტრაცია აღემატება დადგმული სიმძლავრის ნახევარს, სისტემაში მკვეთრად მცირდება ინერჯია, ირღვევა ძაბვის პროფილი და წარმოიქმნება სიხშირული გადახრების რისკი. ეს გამოწვევები განსაკუთრებით მწვავეა განვითარებადი ენერგეტიკული ბაზრების მქონე ქვეყნებისთვის, მათ შორის საქართველოსთვის, სადაც მზის და ქარის ელექტროსადგურების ინტეგრაცია ინტენსიურად მიმდინარეობს.

არსებული სამეცნიერო ლიტერატურა ძირითადად მცდგს და ეშბის ტექნოლოგიებს ცალ-ცალკე სწავლობს. მათი კოორდინირებული, ერთობლივი გამოყენების ოპტიმიზაციის საკითხი კი, შედარებით ნაკლებად არის შესწავლილი. სწორედ ეს ხარვეზი განსაზღვრავს წინამდებარე კვლევის მეცნიერულ აქტუალობას.

კვლევის მიზანი და ამოცანები

კვლევის ძირითადი მიზანია განახლებადი ენერჯის მაღალი კონცენტრაციის მქონე ელექტროსისტემაში მცდგს და ეშბ-ის ტექნოლოგიების კომბინირებული გამოყენების ტექნიკური ეფექტიანობის შეფასება.

კვლევის ძირითადი ამოცანებია:

- განახლებადი ენერჯის წყაროების მასშტაბური ინტეგრაციის გავლენის გაანალიზება ძაბვის სტაბილურობასა და ელექტროსისტემის დინამიკურ მახასიათებლებზე.
- სხვადასხვა მცდგს მოწყობილობის (SVC, STATCOM, TCSC, UPFC) მოდელირება და სიმულაცია სხვადასხვა პირობებში.
- ეშბ-ის როლის განსაზღვრა აქტიური სიმძლავრის დაბალანსებასა და სიხშირის რეგულირებაში.
- მცდგს და ეშბ-ის ჰიბრიდული სისტემების კოორდინირებული მართვის ოპტიმალური სტრატეგიების შემუშავება და შეფასება.

კვლევის ობიექტი და საგანი

კვლევის ობიექტია განახლებადი ენერჯის მაღალი კონცენტრაციის მქონე ელექტროენერჯეტიკული სისტემა, კერძოდ IEEE 39-კვანძიანი სისტემის მოდიფიცირებული მოდელი ინტეგრირებული ქარისა და მზის გენერაციით, მცდგს მოწყობილობებითა და ლითიუმ-იონური ეშბ-ით.

კვლევის საგანია მცდგს და ეშბ-ის კოორდინირებული სისტემის მართვის გზით სისტემის ოპერირების ტექნიკური ეფექტიანობის შეფასება ძაბვის მდგრადობის, სიხშირის რეგულირებისა და ქსელის საიმედოობის ჭრილში.

კვლევის მეთოდოლოგია და მეთოდები

კვლევა ეფუძნება კომპიუტერული სიმულაციის მეთოდს, რომელიც განხორციელდა ენერჯოსისტემის პროფესიული მოდელირების პროგრამული

პაკეტის DIgSILENT PowerFactory-ის გამოყენებით. ქსელის საბაზისო მოდელად გამოყენებულია IEEE 39-კვანძიანი სისტემის მოდიფიცირებული ვარიანტი, რომელშიც ინტეგრირებულია:

- ქარისა და მზის გენერაციის ობიექტები დადგმული სიმძლავრის 54%-ის ოდენობით, 40 - 70%-იანი მომენტალური კონცენტრაციის სცენარებით;
- სხვადასხვა ტიპის FACTS მოწყობილობები სტრატეგიულ კვანძებში;
- ლითიუმ-იონური BESS მოდელები დამუხტვის მდგომარეობის (SOC - State of Charge) სრული დინამიკის ჩათვლით.

კვლევა მოიცავს ხუთი ძირითადი სცენარის (S1 - S5) ანალიზს: ტრადიციული საბაზისო სისტემიდან (S1) სრულ მცდგს და ეშბს ჰიბრიდულ სისტემამდე (S5). ამასთანავე სისტემის საიმედოობის შეფასების მიზნით ჩატარდა ექვსი ავარიული სცენარის (C1 - C6) სიმულაცია, მათ შორის: ქარის სადგურის (WF37) გათიშვა, გენერატორის ამოვარდნა (GEN33), სამფაზა მოკლედ შერთვის ანალიზი, სისტემაში N-1 ანალიზი - ელექტროგადამცემი ხაზის გათიშვა.

სამეცნიერო სიახლე

- ჰიბრიდული ინტეგრაციის კვლევა: FACTS და BESS ტექნოლოგიების ერთდროული, კოორდინირებული კონტროლის შესწავლა რეალურ დროში ძაბვისა და აქტიური სიმძლავრის სამართავად, შედარებით ნაკლებად შესწავლილი მიმართულება.
- ერთიანი ჰიბრიდული სიმულაციური მოდელის შემუშავება: ორივე ტექნოლოგიის ერთ ჩარჩოში ინტეგრირებული მოდელი, რომელიც კოორდინირებული ანალიზის საშუალებას იძლევა.
- ექსტრემალური სცენარების ანალიზი: ქარისა და მზის გენერაციის შემცირება ხანგრძლივი პერიოდით და ამ დროს სისტემის ქცევის შეფასება.
- იერარქიული კოორდინირებული მართვის სტრატეგია: ჰიბრიდული სისტემისთვის კოორდინირებული, მრავალდონიანი მართვის სტრატეგიის შემუშავება.

მიღებული შედეგების პრაქტიკული ღირებულება და გამოყენების სფერო

კვლევის შედეგებს პრაქტიკული მნიშვნელობა პირველ რიგში გადამცემი ქსელის ოპერატორებისთვის, სადაც მცდგს და ეშბ-ის ჰიბრიდული სისტემები

შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც განახლებადი ენერჯის მაღალი წილის მქონე სისტემების განვითარების ძირითადი ინსტრუმენტი. რაც შეეხება ენერგეტიკულ პოლიტიკას და რეგულირებას, კვლევა ადასტურებს, რომ ეს ტექნოლოგიები კომერციულად სიცოცხლისუნარიანი გადაწყვეტილებებია და საჭიროებს შესაბამის სარეგულაციო ჩარჩოს, რომელიც შესაძლებლობას მისცემს ჰიბრიდულ, კომბინირებულ სისტემას სრულად აანაზღაუროს კაპიტალური დანახარჯები. ამ კვლევის შედეგად გამოვლენილი შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს „hardware-in-the-loop“ (HIL) ტესტირებისა და საპილოტე პროექტების შესამუშავებლად სიმულაციური შედეგების ვალიდაციის მიზნით. ნაშრომის მეთოდოლოგია და რეკომენდაციები შეიძლება გამოყენებული იქნეს მომავლის ენერგეტიკული სისტემების გრძელვადიანი დაგეგმვისა და განვითარებისთვის, რათა ხელი შეუწყოს განახლებადი ენერჯის მაქსიმალურ ინტეგრაციას.

სამუშაოს აპრობაცია

სადისერტაციო ნაშრომის შესრულებისადმი წაყენებული მოთხოვნების შესაბამისად, დისერტაციის თემაზე ჩატარებული კვლევის შედეგები მოხსენებულ იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტზე ჩატარებულ 3 კოლოკვიუმზე, 4 საერთაშორისო კონფერენციაზე და წინასწარ დაცვაზე. გარდა ამისა, დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 6 სტატია, საზღვარგარეთ საერთაშორისო რეფერირებად ჟურნალში.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 103 ნაბეჭდ გვერდს, 22 ცხრილისა და 13 ნახაზის ჩათვლით და შედგება შესავლის, 4 თავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

თავი I - შესავალი და კვლევის ჩარჩო

პირველ თავში წარმოდგენილია კვლევის კონტექსტი, მეცნიერული და პრაქტიკული მოტივაცია. გაანალიზებულია გლობალური ენერგეტიკული ტრანსფორმაციის ტენდენციები: განახლებადი ენერჯის სწრაფი ზრდა, ინვერტორებზე დაფუძნებული გენერაციის მზარდი წილი და მათი გავლენა ქსელის გადატვირთვის, სისტემური ინერჯის, ძაბვის მდგრადობისა და სიხშირის რეგულირების მახასიათებლებზე. განსაკუთრებულად გამოყოფილია ისეთი კრიტიკული პარამეტრები, როგორცაა სიხშირის ცვლილების სიჩქარე (RoCoF), სიხშირის მინიმალური ზღვარი (Frequency Nadir) და ძაბვის დაუშვებელი გადახრები. ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი, ამოცანები, ობიექტი, საგანი, სამეცნიერო სიახლე და ნაშრომის სტრუქტურა.

თავი II - ლიტერატურის მიმოხილვა: მცდგს და ეშბ ტექნოლოგიები

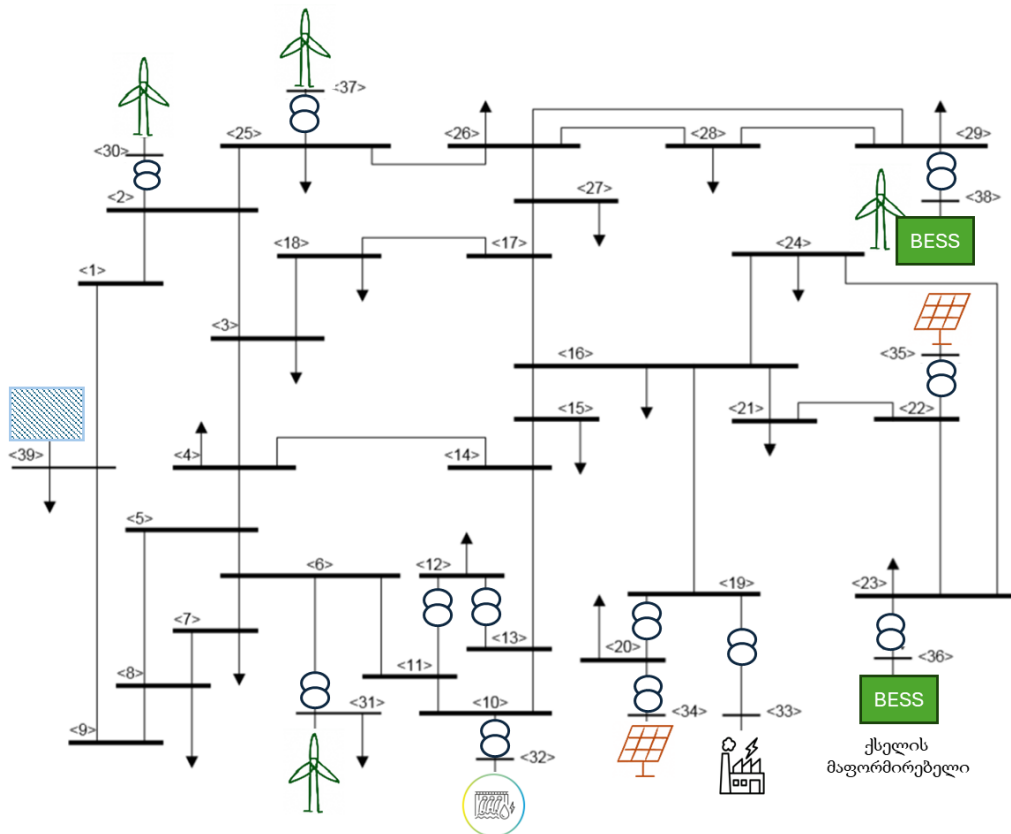
მეორე თავი მოიცავს მცდგს და ეშბ-ის ტექნოლოგიების თეორიული საფუძვლების, კლასიფიკაციისა და ლიტერატურის კრიტიკულ მიმოხილვას. მცდგს მოყობილობებიდან სრულად არის განხილული: SVC (სტატიკური ვარკომპენსატორი), STATCOM (სტატიკური სინქრონული კომპენსატორი), TCSC (ტირისტორული კონტროლირებადი სერიული კომპენსატორი) და UPFC (ერთიანი სიმძლავრის ნაკადის კონტროლერი). აგრეთვე აღწერილია მათი სამუშაო პრინციპები, მართვის ალგორითმები და გამოყენების სფეროები. ეშბ-ის ნაწილში განხილულია ლითიუმ-იონური ტექნოლოგია, დამუხტვის მდგომარეობის (SOC) მოდელირება, დამუხტვა-განმუხტვის სტრატეგიები და სიხშირის რეგულირებაში BESS-ის ინტეგრაციის თანამედროვე მიდგომები.

თავი III - მეთოდოლოგია და სიმულაციური მოდელები

მესამე თავი ეძღვნება კვლევის მეთოდოლოგიასა და სიმულაციური მოდელის აგებას. DIgSILENT PowerFactory პროგრამული პაკეტის საფუძველზე შემუშავდა IEEE 39 - სალტიანი სისტემის მოდიფიცირებული მოდელი, სადაც

ინტეგრირებულია ქარისა და მზის გენერაციის ობიექტები, მცდგს მოწყობილობები და ლითიუმ-იონური ბატარეები. ქსელი მოიცავს 39 სალტეს, 34 გადამცემ ხაზს, 12 ტრანსფორმატორს და 19 დატვირთვის კვანძს:

- 500 კვ სისტემაწარმომქმნელი ქსელი - აკავშირებს გენერაციისა და დატვირთვის ძირითად ცენტრებს.
- 220 კვ რეგიონული ქსელი - რომელიც ენერგიას ანაწილებს რეგიონული დატვირთვის კვანძებში.
- 110 კვ გადაცემის ქსელი - წარმოადგენს დატვირთვის კვანძებისა და გენერატორების მიერთების წერტილს.



ნახაზი 1. გამოყენებული სისტემის მოდელი

კვლევა მოიცავს 5 სცენარს:

სცენარი	კონფიგურაცია
S1	ტრადიციული საბაზო სისტემა, მცდგს/ეშპ გარეშე
S2	განახლებადი ენერჯია და მცდგს

S3	განახლებადი ენერჯია და ეშბ
S4	განახლებადი ენერჯია, მცდგს და ეშბ (ჰიბრიდული)
S5	მაღალი განახლებადების კონცენტრაცია, მცდგს და ეშბ გარეშე

ასევე განსაზღვრულია ავარიული სიტუაციების სცენარები:

სცენარი	ავარიის ტიპი	სიმძლავრე	ძირითადი ეფექტი
C1	WF37 ქარის სადგურის გათიშვა	540 მვტ	სიხშირის სწრაფი ვარდნა, RoCoF
C2	GEN33 სინქრონული გენერატორის ამოვარდნა	426 მვტ	ინერციის და სიმძლავრის ერთდროული დაკარგვა
C3	PV34/PV35 მზის სადგურების წელი შემცირება	100%- დან 20% მდე / 60 წმ	წელი დინამიკა, ღრუბლიანობის სიმულაცია
C4	GEN33 და WF37 ერთდროული გათიშვა	კომბინირებული	ყველაზე მძიმე მულტი-კონტინგენცია
C5	სამფაზური მოკლე ჩართვა		დინამიკური მდგრადობა
C6	500 კვ ხაზის (BUS25 - BUS26) გათიშვა		N-1: სიმძლავრის ნაკადგანაწილება

თავი IV — სიმულაციის შედეგები და შედარებითი ანალიზი

მეოთხე თავი წარმოადგენს ნაშრომის ძირითად შინაარსობრივ ნაწილს, სადაც სისტემატურად არის გაანალიზებული ყველა სცენარის შედეგები. ძირითადი შედეგები:

ძაბვის მდგრადობა: მცდგს მოწყობილობებმა, კერძოდ STATCOM-მა და SVC-მა, მნიშვნელოვნად გააუმჯობესეს ძაბვის პროფილი განახლებადი გენერაციის კვანძებთან ახლოს. STATCOM-მა გარდამავალ რეჟიმებში საუკეთესო შედეგი გამოავლინა, ვინაიდან მისი კომპენსაციის შესაძლებლობა ძაბვისგან დამოუკიდებელია SVC-ისგან განსხვავებით, რომლის გამომუშავება ძაბვის კვადრატის პროპორციულია.

სიხშირის რეგულირება: S1 სცენარში (კომპენსაციის გარეშე) RoCoF-ის მნიშვნელოვანი ზრდა დაფიქსირდა ქარის სადგურის გათიშვის სიმულაციისას. S3 სცენარში ეშბ-ის ინტეგრაციამ RoCoF დასაშვებ ფარგლებში შეინარჩუნა;

გენერაციის ამოვარდნის კომპენსაცია ეშბ-ის მიერ განხორციელდა 200 მილიონამზე ნაკლებ დროში.

სინერგიული ეფექტი (S4): მცდგს და ეშბ-ის ჰიბრიდულმა სისტემამ ყველა შეფასებულ მაჩვენებელზე მნიშვნელოვნად გაზარდილი ეფექტი აჩვენა, დამოუკიდებლად თითოეული ტექნოლოგიის მიერ ნაჩვენებ შედეგებს. მცდგს-მა უზრუნველყო ძაბვის სტატიკური მხარდაჭერა, ხოლო ეშბ-მა კი სიხშირის დინამიკური მდგრადობა. ორი ტექნოლოგიის სინერგია განსაკუთრებით გამოიხატა ავარიული გათიშვების სცენარების დროს.

N-1 საიმედოობის ანალიზი: UPFC-მა ეფექტურად მოახდინა სიმძლავრის ნაკადგანაწილება გადატვირთული შტოებიდან ნაკლებად დატვირთულ შტოებზე, რის შედეგადაც კასკადური გათიშვების განვითარება თავიდან იქნა აცილებული ყველა C1 - C6 სცენარში.

წინამდებარე კვლევა ემპირიულად ადასტურებს სამ ძირითად მეცნიერულ პოზიციას:

პირველი, ინვერტორზე დაფუძნებული გენერაციის 40 - 70%-იანი კონცენტრაციის პირობებში ტრადიციული ქსელის მართვის ინსტრუმენტები, ტრადიციული სიხშირის რეგულატორები, მექანიკური კომუტაცია, სათანადო ეფექტიანობით ვერ უზრუნველყოფს ოპერაციული სტანდარტების დაცვას. ეს არა თეორიული პრობლემა, არამედ გამოთვლადი, რაოდენობრივი ფაქტია: S1 სცენარი განსაზღვრული 8 კრიტერიუმიდან, მხოლოდ 3 ENTSO-E კრიტერიუმს ასრულებს, S5 კი მხოლოდ 2-ს განსაზღვრული 8 კრიტერიუმიდან.

მეორე, მცდგს და ეშბ კომპლემენტარული, ურთიერთშემავსებელი ტექნოლოგიებია, არა ურთიერთჩამანაცვლებელი. მცდგს რექტიული სიმძლავრის (ძაბვა, სტაბილობის ზღვარი, სიმძლავრის ნაკადები) ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტია; ეშბ კი აქტიური სიმძლავრის (სიხშირე, სიხშირის ცვლილების სიქარე, ვირტუალური ინერცია) ინსტრუმენტი. მხოლოდ მათი კომბინაცია იძლევა სრულ საოპერაციო შესაბამისობის მიღწევის საშუალებას.

მესამე, მცდგს და ეშბ-ის ჰიბრიდული სისტემები ეკონომიკურად გამართლებული, ტექნიკურად სიცოცხლისუნარიანი გადაწყვეტილებებია და არა ექსპერიმენტული კონცეფცია. მათი ფართომასშტაბიანი დანერგვა განახლებადი

ენერჯის ინტენსიური ინტეგრაციის მქონე ენერჯოსისტემებში სტრატეგიული ინვესტიციის, სანდო სარეგულაციო ჩარჩოსა და ემპირიული HIL ვალიდაციის ერთობლიობის გზით, ენერჯეტიკული სისტემებისთვის მოქნილობისა და მდგრადობის ყველაზე ეფექტური საშუალებაა.

განახლებადი ენერჯის წყაროების კერძოდ, ქარის და მზის ელექტროსადგურების სწრაფი განვითარება მსოფლიო ენერჯეტიკის ყველაზე მნიშვნელოვანი სტრუქტურული ცვლილებაა. სახელმწიფო მხარდამჭერი პოლიტიკა და ტექნოლოგიური ღირებულების სწრაფი კლება ერთობლივად ქმნის პირობებს, სადაც ცვლადი განახლებადი ენერჯის წილი სულ უფრო იზრდება. ეს ტენდენცია შეუქცევადია, მაგრამ ერთდროულად სისტემური გამოწვევების კომპლექსს წარმოშობს, რომლებსაც ტრადიციული ქსელის საოპერაციო ჩარჩოებს ვერ უმკლავდება.

ენერჯეტიკული სტრატეგიების გადახედვა ამ მოცემულობაში გარდაუვალი პროცესია. ცვლადი განახლებადი ენერჯის მზარდი წილი ახალ შესაძლებლობებს ქმნის ეფექტური, ჰკვიანი და ეკონომიკურად მომგებიანი ქსელის მშენებლობის მხრივ, თუმცა ამ შესაძლებლობების განსახორციელებლად საჭიროა ზუსტი ტექნიკური მეთოდოლოგია, დაგეგმვის ინსტრუმენტები და მარეგულირებელი ჩარჩოს ადაპტაცია.

ელექტრული სისტემის მართვა ცვლადი განახლებადი გენერაციის მაღალი წილის პირობებში ფუნდამენტურად განსხვავდება ტრადიციული, სინქრონულ გენერაციაზე დამყარებული სისტემისგან. სტრუქტურული ცვლილებები, უპირველეს ყოვლისა, სისტემური ინერჯის კლებაში გამოიხატება. ცვლადი განახლებადი გენერაცია ამჟამად ვერ უზრუნველყოფს იმ ინერჯიას, რასაც მის მიერ ჩანაცვლებული ტრადიციული გენერაცია გვთავაზობდა. სინქრონული გენერატორების მზრუნავი მასა, ფიზიკური ბუნებიდან გამომდინარე, სიხშირის ცვლილების წინააღმდეგ მყისიერ ინერჯიულ პასუხს იძლევა. ინვერტორზე დაფუძნებული განახლებადი რესურსები ამ მახასიათებელს ბუნებრივად მოკლებულია.

ინერჯის შემცირება პირველადი სიხშირის კონტროლის სარეზერვო სიმძლავრის მოთხოვნილებას სხვადასხვა გზით ზრდის. განახლებადი ან

ტრადიციული გენერატორის მოულოდნელი გამორთვის შემდეგ სიხშირის სტაბილიზაციისთვის რეალურ დროში ხელმისაწვდომი სარეზერვო სიმძლავრის ადეკვატური ოდენობა სავალდებულო პირობაა. აქ პრინციპული განსხვავება ისაა, რომ ცვლადი განახლებადი გენერაცია პირველადი სიხშირის კონტროლს ამჟამად ვერ უზრუნველყოფს, ამ ფუნქციის განხორციელება ტრადიციული, სინქრონულ გენერატორებსა და ეშბ სისტემებს ეკისრებათ. შედეგად, დაგეგმვისა და კონტროლის პროცესები გაძლიერებას საჭიროებს, რათა პირველადი სიხშირის კონტროლის ადეკვატური სარეზერვო სიმძლავრე ყოველთვის ხელმისაწვდომი იყოს.

სადისერტაციო კვლევამ ემპირიულად დაადასტურა ამ გამოწვევის მასშტაბი: 70%-იანი განახლებადი ენერჯის კონცენტრაციის პირობებში, ეშბ ჩართვის გარეშე, სიხშირის ცვლილების სიჩქარე -1.75 ჰც/წამს აღწევდა, ეს მნიშვნელობა ევროპის ქსელის ოპერატორების მიერ განსაზღვრულ კრიტიკულ ზღვარს მნიშვნელოვნად სცდება. ეშბ-ის ვირტუალური ინერციის ემულაციის ჩართვის შემდეგ სიხშირის ცვლილების სიჩქარე -0.86 ჰც/წმ-მდე შემცირდა, ხოლო სისტემის ეფექტური ინერცია 3.52 წამის ეკვივალენტით გაიზარდა.

წინამდებარე კვლევის მეთოდოლოგია, სცენარების ანალიზი და მართვის სტრატეგიები განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს მცირე ინერციის მქონე ენერგოსისტემებისთვის, სისტემებისთვის, სადაც განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია ინტენსიური ტემპით მიმდინარეობს, ხოლო ქსელის ტოპოლოგია და გენერაციის გეოგრაფიული განაწილება სიმძლავრის ნაკადების ასიმეტრიას წარმოქმნის. ამ კონტექსტში საქართველოს ენერგოსისტემა ტიპური, პრაქტიკულად მნიშვნელოვანი შემთხვევის სახით გამოიყოფა.

საქართველო ჰიდრო, ქარისა და მზის გენერაციის ინტენსიური ზრდის ეტაპზეა. ქვეყნის ენერგეტიკული პოლიტიკა განახლებადი ენერჯის წყაროების წილის 2030 წლისთვის მნიშვნელოვნად გაზრდას ისახავს მიზნად, რაც ახალ ტექნიკურ გამოწვევებს წარმოქმნის. კერძოდ, სეზონური ჰიდროგენერაციის გამოხატული ცვალებადობა, ზამთრის პიკი და გვალვის სეზონის სიმძლავრის ბალანსირებისა და სიხშირის მდგრადობის ისეთ პრობლემებს ქმნის, რომლებიც S3 და S5 სცენარებში მოდელირებულ სცენარებს ზუსტად ასახავს. ამასთანავე,

ქართული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ქსელური ტოპოლოგია, რთული ლანდშაფტით განპირობებული გრძელი, შედარებით სუსტი გადამცემი ცასები, სიმძლავრის ნაკადების ასიმეტრიისა და ხაზების სელექციური გადატვირთვის ტიპური პირობებია, სადაც TCSC-ისა და UPFC-ის მიმდევრობითი, ჰიბრიდული კომპენსაცია ყველაზე უშუალო ტექნიკურ სარგებელს მოიტანს.

კონკრეტულად, C1 სცენარი (ქარის სადგურის მოულოდნელი გათიშვა) და C3 სცენარი (გენერაციის წელი, კვაზი-სტატიკური შემცირება) პირდაპირ ასახავს ქართული ენერგოსისტემის ოპერაციულ გამოწვევებს: ქარის გენერაციის არარსებობის პერიოდები, ჰიდროსადგურების სეზონური შეზღუდვები (მდინარის დაბალი დინება) ან სარეაბილიტაციო სამუშაოები სისტემისთვის ზუსტად ამ ტიპის სტრესია. ეშბ-ის ინტეგრაცია სეზონური ჰიდროგენერაციის არარსებობის, ე.წ. „გვალვის“, პერიოდებში სიხშირული მდგრადობის უზრუნველყოფის ყველაზე ეფექტური, სწრაფად გამოყენებადი ინსტრუმენტია. ამ პერიოდებში, როდესაც სინქრონული ჰიდროგენერაცია და მასთან ერთად სისტემის ინერცია მინიმუმამდეა დაყვანილი, ეშბ-ის ვურტუალური ინრეციის კომპონენტი ინერციის ეფექტური კომპენსაციის ერთადერთ სწრაფ ინსტრუმენტს წარმოადგენს, ვინაიდან ტრადიციული სარეზერვო სიმძლავრის (ბუნებრივი გაზის ელექტროსადგური) ამოქმედება, 5–15 წუთის განმავლობაში, ამ ამოცანისთვის ბუნებრივად საკმარისი სიჩქარის არ არის.

უფრო ფართო გეოგრაფიული პერსპექტივიდან, ეს კვლევა ასევე მნიშვნელოვანია სხვა მსგავსი ოპერაციული პირობების მქონე ენერგოსისტემებისთვის, როგორებისაა ბალკანეთის ქვეყნები, კავკასიის რეგიონი, ცენტრალური აზია, სადაც განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია დასაწყისის ეტაპზეა, ქსელის მოდერნიზაცია კი დიდი მოცულობის საინვესტიციო პროექტების წინაპირობაა. ამ ქვეყნებში ეშბ-ს და მცდგს სისტემები, ტრადიციული ქსელის გაფართოებასთან შედარებით, ყოველ ჩადებულ დოლარზე ნაკლები ინვესტიციით მეტი ოპერაციული ეფექტის მომტანია.

თავი V - განხილვა, დასკვნები და სამომავლო კვლევის მიმართულებები

მეხუთე თავი შეიცავს მიღებული შედეგების ყოვლისმომცველ ანალიზს, დაკვირვებების ინტერპრეტაციას, კვლევის შეზღუდვების განხილვასა და სამეცნიერო-ტექნიკური დასკვნების ჩამოყალიბებას. კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები და ჩატარებული სიმულაციური ანალიზი საშუალებას იძლევა, ჩამოყალიბდეს შემდეგი ძირითადი სამეცნიერო-ტექნიკური დასკვნები:

- FACTS მოწყობილობების: SVC, STATCOM, TCSC და UPFC ინტეგრაცია განახლებადი ენერჯის მაღალი კონცენტრაციის მქონე ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში უზრუნველყოფს ძაბვის პროფილის არსებით გაუმჯობესებას, სტატიკური მდგრადობის ზღვრის გაფართოებას და სისტემის კონტროლის გაუმჯობესებას. სიმულაციური შედეგები ადასტურებს, რომ ამ მოწყობილობების სტრატეგიულ კვანძებში განთავსება განსაკუთრებით ეფექტურია ქსელის იმ უბნებში, სადაც განახლებადი გენერაციის ობიექტებია კონცენტრირებულია.
- STATCOM-ი გარდამავალ (დინამიკურ) რეჟიმებში მნიშვნელოვნად აჭარბებს SVC-ს ეფექტიანობით. ეს განპირობებულია STATCOM-ის ძირითადი ტექნიკური უპირატესობით - ძაბვისგან დამოუკიდებელი სრული სიმძლავრის გამომუშავებისა და ათვისების შესაძლებლობით, მაშინ, როდესაც SVC-ს კომპენსაციის შესაძლებლობა ძაბვის კვადრატის პროპორციულია. ეს განსხვავება განსაკუთრებით მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ძაბვის ვარდნის პირობებში ჩატარებული ავარიული სცენარების ანალიზის დროს.
- ბატარეის ენერჯის შენახვის სისტემა წარმოადგენს დაბალი ინერციის მქონე ელექტროენერგეტიკული სისტემების სიხშირული სტაბილურობის უზრუნველყოფის ყველაზე ეფექტიან ინსტრუმენტს. ლითიუმ-იონური ბატარეების მიერ განხორციელებული სიხშირის პირველადი და მეორეული რეგულირება სიხშირის ცვლილების სიჩქარეს (RoCoF) და კვაზი-სტატიკურ სიხშირულ გადახრას (QSFD) მნიშვნელოვნად ამცირებს, ხოლო სიხშირის კრიტიკულ დონეზე ჩამოვარდნის რისკი ფაქტობრივად გამოირიცხება. გენერაციის მოულოდნელი ამოვარდნის კომპენსაცია ემზ-ის მიერ ხდება 200

მილიწამზე ნაკლებ დროში, რაც ვერ უზრუნველყოფდა ტრადიციული სარეზერვო გენერაციის საშუალებებით.

- FACTS და BESS ტექნოლოგიების კომბინირებული, კოორდინირებული გამოყენება (S5 სცენარი) სისტემური ეფექტიანობის თვალსაზრისით ყველა შეფასებულ კრიტერიუმზე - ძაბვის მდგრადობა, სიხშირის გადახრა, ქსელის გამძლეობა საგანგებო სიტუაციებში - ცალ-ცალკე გამოყენებულ ტექნოლოგიებს (S3 და S4 სცენარები) მნიშვნელოვნად სჯობია. ეს ადასტურებს ამ ორი ტექნოლოგიის სინერგიულ ბუნებას: მცდგს უზრუნველყოფს რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციასა და ძაბვის მხარდაჭერას, ხოლო ეშბ - აქტიური სიმძლავრის დაბალანსებას.
- UPFC-ი N-1 პირობებში ეფექტურად ახდენს სიმძლავრის ნაკადების დინამიკურ გადანაწილებას გადატვირთული შტოებიდან ნაკლებად დატვირთულ კონტურებზე, რაც კასკადური გათიშვების განვითარების ალბათობას მნიშვნელოვნად ამცირებს. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ ქსელებში, სადაც განახლებადი გენერაციის ობიექტები გეოგრაფიულად ერთ ან რამდენიმე ლოკაციაზეა კონცენტრირებული (რესურსის ხელმისაწვდომობიდან გამომდინარე).
- მცდგს და ეშბ-ის ჰიბრიდული სისტემები: ამ კვლევის ფარგლებში ჩატარებული სიმულაციური ანალიზის საფუძველზე, შეფასებულია, როგორც ტექნიკურად სრულყოფილი, კომერციულად სიცოცხლისუნარიანი და ეკონომიკურად გამართლებული გადაწყვეტილება. ამ ტექნოლოგიების ფართომასშტაბიანი დანერგვა განახლებადი ენერჯის ინტეგრაციის სტრატეგიების განუყოფელ კომპონენტად უნდა განიხილებოდეს.

რეკომენდაციები

ჩატარებული კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით ჩამოყალიბებულია შემდეგი პრაქტიკული რეკომენდაციები:

- რეკომენდებულია გადამცემი ქსელის ოპერატორებმა მოახდინონ ეშბის და მცდგს ჰიბრიდული სისტემების გამოყენება ქსელის გაძლიერებისა და განახლებადი ენერჯის ინტეგრაციის გეგმებში - განსაკუთრებით იმ კვანძებში, სადაც განახლებადი ენერჯის კონცენტრაცია ქვეყნის ენერჯოსისტემის სტაბილურობისთვის კრიტიკულ ზღვარს უახლოვდება.
- მარეგულირებელი ჩარჩო საჭიროებს მიზანმიმართულ განახლებას, რათა აისახოს ეშბ-ისა და მცდგს მოწყობილობების მიერ გაწეული სისტემური დამხმარე სერვისების, მაგალითად, სიხშირის და ძაბვის რეგულირების, ხელოვნური ინერჯის მიწოდების - სრული ეკონომიკური ღირებულება. ეს ღონისძიება ხელს შეუწყობს ამ ტექნოლოგიების ბაზარზე ინტეგრაციასა და ინვესტიციების მოზიდვას.
- სამომავლო კვლევებში რეკომენდებულია წინამდებარე ნაშრომის სიმულაციური შედეგების ვალიდაცია Hardware-in-the-Loop (HIL) პლატფორმებზე, ასევე საცდელი, საპილოტე პროექტების განხორციელება რეალური საოპერაციო გარემოს პირობებში - კვლევის შედეგების პრაქტიკული გამოყენებადობის დასადასტურებლად.
- მცდგს და ეშბ სისტემების კოორდინირებული მართვის ალგორითმების სრულყოფის მიზნით პერსპექტიულია მანქანური სწავლების (Machine Learning) და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მეთოდების ინტეგრაცია, რაც სისტემის ადაპტაციური, მდგომარეობაზე დამოკიდებული მართვის შესაძლებლობებს მნიშვნელოვნად გაზრდის.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომების სია:

1. ელიზარაშვილი თ. ენერჯის შემნახველი ბატარეის როლი სასისტემო მომსახურებაში. „ქართველი მეცნიერები“, 2026, ტ. 8, გამოც. 2, გვ. 250-267.
2. Elizarashvili T., Arziani G., Kvatadze B. FACTS for improved controllability of the high-voltage power transmission network in Georgia. Proceedings of the CIGRE SEERC Conference 2023, Istanbul (Turkey), pp. 343-350.
3. Elizarashvili T., Arziani G., Kvatadze B. Renewable energy hybrid mini-grid concept for rural electrification in Georgia. Proceedings of the CIGRE Paris Session, 2022, Paris (France), 8p., (Paper No. C6-11119_2022).
4. Elizarashvili T., Arziani, G. FACTS for effective DER integration into the Georgian distribution grid. Proceedings of the CIGRE Kyoto Symposium, 2022, Kyoto (Japan), pp. 105-113.
5. Elizarashvili, T., Arziani, G. FACTS with energy storage for renewable integration in the Georgian power system. Proceedings of the CIGRE Paris Session, 2022, Paris (France), 9p., (Paper No. B4-11120_2022).
6. Arziani G, Burdiashvili O, Elizarashvili T, Rukhvadze M. Modelling of the Automatic Emergency Response System used in Georgian Power System. Proceedings of the CIGRE Paris Session, 2020, Paris (France), 10p., (Paper No. C4-111_2020).

Abstract

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Battery Energy Storage Systems (BESS) for Future Power Systems

Keywords: FACTS, BESS, STATCOM, SVC, UPFC, power system stability, renewable energy integration, voltage control, frequency regulation, DIgSILENT PowerFactory
The rapid expansion of renewable energy sources, primarily wind and solar, is fundamentally transforming modern power systems. As instantaneous renewable penetration reaches 40 to 70%, conventional grids face unprecedented challenges: declining system inertia, degraded voltage profiles, and heightened risk of frequency deviations. Traditional control tools are increasingly inadequate, creating an urgent need for advanced technological solutions.

This dissertation investigates the technical effectiveness of combining Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Battery Energy Storage Systems (BESS) in high-renewable power networks. While both technologies are individually well-studied, their coordinated deployment and joint optimization remain comparatively underexplored — a gap that this research directly addresses.

The research is conducted using the DIgSILENT PowerFactory simulation platform, with a modified IEEE 39-bus system as the test network. The model incorporates integrated wind and solar generation at varying penetration levels, lithium-ion BESS models with State of Charge (SOC) dynamics, and FACTS devices including SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC, placed at strategically selected nodes. Five distinct scenarios (S1 to S5) are analyzed, progressing from a conventional base case to a fully integrated FACTS-BESS hybrid system. Contingency testing encompasses largest wind farm outages, largest synchronous generator trips, low availability of wind solar generation output and three-phase faults to assess system resilience under extreme conditions.

The key findings confirm that FACTS devices significantly improve voltage profiles and extend voltage stability margins, with STATCOM demonstrating superior transient performance compared to SVC. BESS emerges as the dominant technology for frequency stability in low-inertia systems, substantially reducing the Rate of Change of Frequency (RoCoF) during disturbances. More importantly, the combined FACTS and BESS deployment (Scenario S4) outperformed all individual technology configurations across every measured metric, providing simultaneous voltage support and active power injection. During contingency events, UPFC effectively redirected power flows to prevent N-1 violations, while BESS compensated for sudden generation losses within milliseconds and STATCOM ensured dynamic voltage support, preventing higher voltage drops by increasing the stability margin.

From a scientific novelty perspective, the dissertation makes four principal contributions: (1) a thorough, coordinated analysis of simultaneous FACTS and BESS optimization for real-time voltage and active power control; (2) the development of a unified hybrid simulation model integrating both technologies within a single analytical framework; (3) evaluation of FACTS and BESS impact on grid behavior during prolonged periods of low wind and solar generation; and (4) the formulation of a hierarchical coordinated control strategy for the hybrid system.

The practical implications of these findings are important primarily for the transmission system operators, that should treat FACTS and BESS hybrids as a primary instrument for grid reinforcement in renewable-heavy regions. Regulatory frameworks must evolve to allow full recovery of the ancillary service value delivered by these technologies. The research confirms that these are no longer experimental concepts but economically justified solutions ready for broad implementation. Future work should focus on hardware-in-the-loop (HIL) validation and pilot project deployment to confirm simulation results under real operational conditions.