



ენერჯის შემნახველი ბატარეის როლი სასისტემო მომსახურებაში თონა ელიზარაშვილი

დოქტორანტი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. ენერჯეტიკის ფაკულტეტი.
სადოქტორო პროგრამა: ენერჯეტიკა და ელექტროინჟინერია

რეზიუმე

წინამდებარე ნაშრომი შეისწავლის ენერჯის შემნახველი ბატარეების ინტეგრაციას ქარის ელექტრო სადგურებთან, როგორც ქარის არასტაბილური და ცვალებადი გენერაციის მიერ გამოწვეული რყევების დაბალანსების საშუალებას. PSCAD/EMTDC სიმულაციური პროგრამის გამოყენებით, მოდელირებულია 60 მგვტ სიმძლავრის ქარის ელექტრო სადგური (ქესი). ქესი მიერთებულია 110 კვ-იან ელექტროგადაცემის ქსელთან ლითიუმ-რკინა-ფოსფატის (LiFePO_4) ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული ბატარეებთან ერთად. კვლევის მიზნებისთვის შესწავლილია სამი სხვადასხვა სცენარი 24-საათიანი პერიოდის განმავლობაში: ბატარეის გარეშე და ბატარეასთან ერთად, ასევე გენერაციის შეზღუდვებისა და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირების პირობებში. კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ ბატარეები ეფექტურად ასწორებს ქარის სიმძლავრის რყევებს, უზრუნველყოფს ენერჯის დროში დაძვრას და ახორციელებს დამხმარე სერვისებს, მათ შორის სიხშირის სწრაფ (დაახლოებით 100 მიკროწამი) და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებას. კვლევის შედეგები ადასტურებს, რომ ბატარეების ინტეგრაცია ქესთან უზრუნველყოფს ცვალებადი ენერჯეტიკული რესურსის გარდაქმნას კონტროლირებად ენერჯეტიკულ რესურსად, ზრდის ქსელის სტაბილურობასა და ქარის სადგურის სიმძლავრის კოეფიციენტს. ასევე, კონვერტორული სადგურის მიერ გამოწვეული ასიმეტრიების დაბალანსებით, და დამხმარე სერვისების ბაზრებზე მონაწილეობის გზით აქვს დამატებითი ეკონომიკური სარგებელის ზრდის შესაძლებლობა.

საკვანძო სიტყვები: ბატარეის ენერჯის შენახვის სისტემები, ქარის ელექტროსადგურების ინტეგრაცია, სიხშირის რეგულირება, რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლი, ენერჯის დროში გადატანა.

1 შესავალი

გლობალური დათბობა და კლიმატის ცვლილება ხაზს უსვამს ნულოვან ეკონომიკაში გადასვლის აუცილებლობას. პარიზის შეთანხმება, გაეროს მდგრადი განვითარების მიზნები (SDG) და ახლახანს გამოქვეყნებული ევროკავშირის მწვანე გარიგება ხელს უწყობს და მხარს უჭერს ქვეყნებს, შექმნან სამოქმედო გეგმები 2050 წლისთვის ნახშირბადის ემისიების ნულოვანი მიზნების მისაღწევად.

სათბურის გაზების ემისიის შემცირებაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსები, როგორცაა ქარის ელექტროსადგურები. თუმცა ქარის სიჩქარისთვის დამახასიათებელია უეცარი ცვალებადობა დიდ ფარგლებში, რაც თავის მხრივ, იწვევს მათ მიერ გენერირებული ელექტროენერგიის ცვალებადობას. ცვალებადი გენერაცია თავის მხრის, სისტემაში იწვევს უბალანსობას ელექტროენერგიის გამომუშავებასა და მოხმარებას შორის და ქარის სადგურების დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სისტემის საიმედო და მდგრად მუშაობაზე. შესაბამისად, სისტემის ოპერატორები ზღუდავენ ამ ტიპის ელექტროსადგურებისთვის გენერაციის ცვალებადობის დიაპაზონს, ტვირთის აღება-მოხსნის დროს და ავალდებულებენ გენერაციის ადეკვატურობის დაცვის პირობას, წინააღმდეგ შემთხვევაში, ხდება ამ სადგურის გაჩერება და ჯარიმის დაკისრება გამოწვეული უბალანსობის აღმოსაფხვრელად.

ამასთან, ქარის ენერგიაზე დაფუძნებული ელექტროსადგურები, ქმნიან ენერგიის ხარისხის სხვადასხვა პრობლემას. მათ შორისაა სინუსოიდური მრუდების დამახინჯება, სამფაზა სისტემის ასიმეტრიულობა და ძაბვის სწრაფი ფლუქტუაციები. ყოველივე აღნიშნული ზრდის ხარისხის პარამეტრების დასაშვები ზღვრებიდან გამოსვლის რისკს, რაც ყველაზე კრიტიკულად თავს იჩენს ელექტრული ქსელის შესუსტებულ ტოპოლოგიურ სტრუქტურებში.

ქარის ელექტროსადგურების ცვალებადი გენერაციით გამოწვეული რყევების გასაგლუვებლად და გენერაციის ადეკვატურობის პირობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია სწრაფმოქმედი რეზერვების მობილიზება. ენერგიის შემნახველი ბატარეები განიხილება როგორც ერთ-ერთი საუკეთესო რეზერვის წყარო ვინაიდან, აღნიშნულ რეზერვს მოეთხოვება ძალიან მცირე აღება-მოხსნის დრო და გენერაციის დროში დამკრის შესაძლებლობა.

ამ მიზნისთვის, ენერგიის შემნახველი ბატარეების მიერთება შესაძლებელია ქსელთან ორი ძირითადი კონფიგურაციით. ერთ შემთხვევაში, შესაძლებელია რამდენიმე დიდი სიმძლავრის ენერგიის შემნახველი ბატარეის მიერთება ქსელის კრიტიკულ კვანძებში, რათა უზრუნველყოს ზოგადად სისტემის სიხშირის ბალანსის დაცვა. მეორე შემთხვევაში შესაძლებელია ბატარეა მიერთდეს იმავე კვანძში სადაც კონკრეტული ქარის

ელექტროსადგური და უზრუნველყოს ამ სადგურის ცვალებადი გენერაციის გაგლუვება და დროში დაძვრა სისტემის ოპერატორის მოთხოვნის შესაბამისად.

ამ ნაშრომში განხილულია ერთ სალტეზე მიერთებული ქარის ელექტროსადგურისა და ენერჯის შემნახველი ბატარეის ერთობლივი მუშაობის შემთხვევა. მოდელირებისა და სიმულაციის საშუალებით შესწავლილია რამდენად შეუძლია ენერჯის შემნახველ ბატარეას უზრუნველყოს სასისტემო მომსახურების სერვისები, გაზარდოს ქარის ელექტროსადგურის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი და უზრუნველყოს ამ ტიპის ელექტროსადგურის უსაფრთხო ინტეგრაცია ქსელში.

2 ენერჯის შემნახველი სისტემების მიმოხილვა

ენერჯის შემნახველი სისტემები, ელექტრული ენერჯის გარდაქმნისა და შენახვის ტექნოლოგიების მიხედვით შეიძლება დაიყოს ხუთ ძირითად ჯგუფად, შესაბამისი დიაგრამა ნაჩვენებია სურათი 1-ზე.

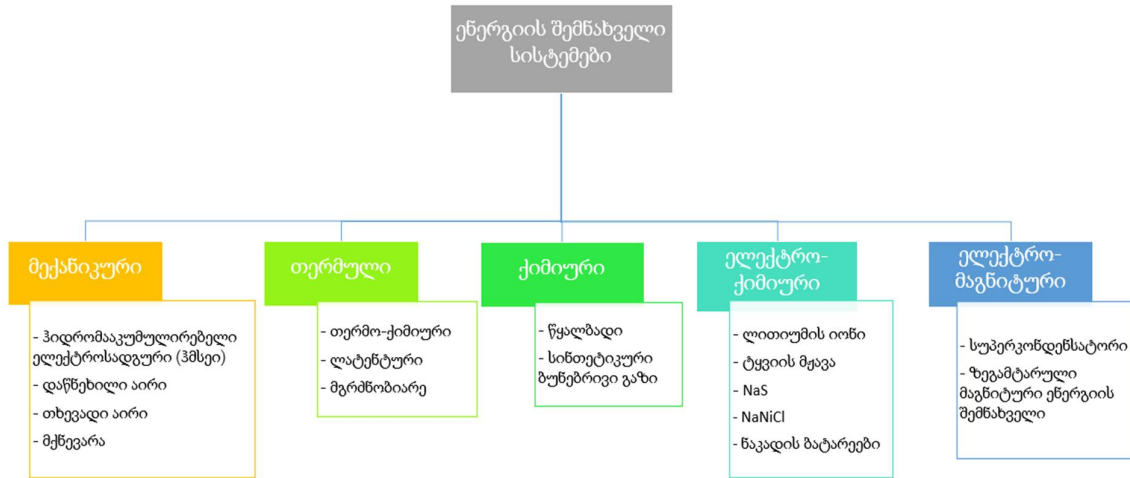
პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება მექანიკური ენერჯის შემნახველი სისტემები, რომელშიც ერთიანდებიან ჰიდრომაკუმულირებელი ელექტროსადგური (ჰმესი), დაწნეხილი აირი (მიწისქვეშა მარილის საცავი), თხევადი აირი და მქნევარა.

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება თერმული ენერჯის შემნახველები, რომლებიც ძირითადად გამოიყენება შენობების გათბობა-გაგრილებისთვის. კერძოდ, თერმო-ქიმიური (ბატარეის მსგავსია შენობის კონდიციონერის სისტემისთვის. თერმული ენერჯია გამოიყენება შექცევადი ენდოთერმული ქიმიური რეაქციის მართვისთვის, ენერჯის შესანახად, როგორც ქიმიური პოტენციალი. მაგ. მზის მაღალი გამოსხივების დროს ის ინახავს თერმულ ენერჯიას ქიმიურში; როდესაც მზის ინტენსივობა დაბალია, მიმდინარეობს საპირისპირო რეაქცია საჭირო ენერჯია მიეწოდება სისტემას). ასვე ამავე ჯგუფს მიეკუთვნებიან ლატენტური და მგრძნობიარე თერმული ენერჯის შემნახველები.

მესამე ჯგუფში გაერთიანებულია ქიმიური ენერჯის შემნახველები, როგორცაა წყალბადი და სინთეტიკური ბუნებრივი აირი.

მეოთხე ჯგუფში თავმოყრილია ელექტრო-ქიმიური ენერჯის შემნახველი ბატარეები. ამ ჯგუფში გაერთიანებული ბატარეები ელექტრულ ენერჯიას გარდაქმნიან ქიმიურ ენერჯიად. ასეთებია: ლითიუმის იონი, ტყვიის მჟავა, NaS, NaNiCl და ნაკადის ბატარეები.

ხოლო, მეხუთე ჯგუფში გაერთიანებულია ელექტრო-მაგნიტური ენერჯის შემნახველები. ასეთებია სუპერკონდენსატორი და ზეგამტარული მაგნიტური ენერჯის შემნახველი.

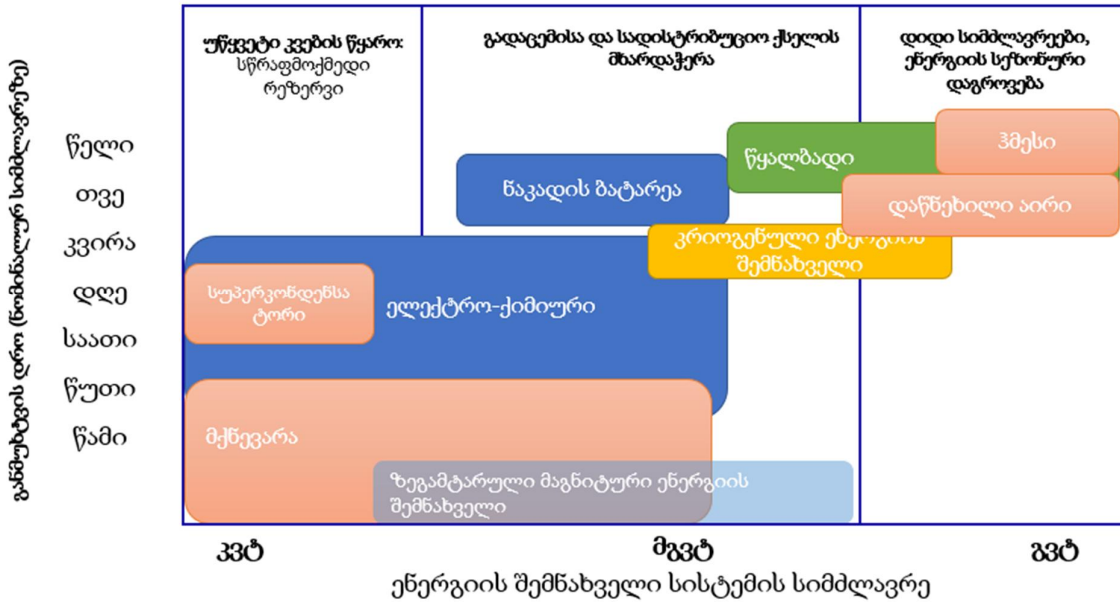


სურათი: 1 ენერჯის შემნახველი სისტემები

ენერჯის შემნახველი სისტემები დადგმული სიმძლავრისა და ენერჯის დაგროვება-განმუხტვის დროის მიხედვით იყოფიან სამ ძირითად ჯგუფად, როგორც ეს ნაჩვენებია სურათ 2-ზე მოცემულ დიაგრამაზე. დიაგრამაზე ნათლად ჩანს, რომ სუპერკონდენსატორები, ელექტრო-ქიმიური ბატარეები და ზეგამტარული მაგნიტური ენერჯის შემნახველებს შეუძლიათ შეასრულონ ე.წ. უწყვეტი კვების წყაროს ფუნქცია, ე.ი. მათ შეუძლიათ ფაქტობრივად მყისიერი დამუხტვა-განმუხტვა (წამიდან კვირამდე დროის შუალედში) და ნებისმიერი სისტემისთვის სწრაფი რეზერვების მიწოდება. მათი დადგმული სიმძლავრე მერყეობს კვტ-იდან მგვტ-ამდე ზღვრებში.

მეორე ჯგუფში თავმოყრილია უმეტესწილად ელექტრო-ქიმიური ენერჯის შემნახველი ბატარეები, მქნევარა, ზეგამტარული მაგნიტური ენერჯის შემნახველი, წყალბადი და კრიოგენული ენერჯის შემნახველი. ეს სისტემები განიხილებიან, როგორც გადაცემისა და დისტრიბუციის ქსელის საიმედო და სტაბილური მუშაობის მხარდამჭერი სერვისების მომწოდებლები. მათი მეშვეობით შესაძლებელია ენერჯის დროში დაძვრა, შესაბამისად პიკების ეფექტური მოხსნა, სიხშირის რეგულირება, გენერაციისა და ქსელის ადეკვატურობის უზრუნველყოფა. მათი განმუხტვის დრო მერყეობს წამიდან წლის ჭრილში, გამოყენებული ტექნოლოგიის მიხედვით, ხოლო დადგმული სიმძლავრე არის მგვტ-ის ფარგლებში.

მესამე კატეგორია აერთიანებს დიდი სიმძლავრის, სეზონური ენერჯის შემნახველებს, როგორებიცაა ჰიდრომაკუმულირებელი ელექტროსადგური, წყალბადი, კრიოგენული და დაწნეხილი აირის ენერჯის შემნახველები, ისინი უზრუნველყოფენ ქვეყნების იმპორტ დამოკიდებულების შემცირებას და შესაბამისად, ენერგოუსაფრთხოების დონის ამაღლებას.



სურათი: 2 ენერჯის შემნახველი სისტემების გამოყენების არეალი

აღსანიშნავია, რომ სეზონური ბალანსირებისთვის განკუთვნილი ენერჯის შემნახველები ხასიათდებიან ტექნოლოგიების სიმცირით. ვინაიდან ამ ტიპის შემნახველები წარმოადგენენ კომპლექსურ და ძვირადღირებულ სისტემებს, მათი აგება შეზღუდულია გეოგრაფიული ფაქტორით. თუმცა ისინი უზრუნველყოფენ ენერჯის შენახვას მრავალი საათის, დღისა და სეზონის განმავლობაში.

რაც შეეხება მოკლევადიან ბალანსირებას, ამ კუთხით არის ტექნოლოგიების ფართო არჩევანი და ბოლო დეკადის განმავლობაში შეინიშნება ფასის მკვეთრი შემცირება (მაგ. ლითიუმის ბატარეები). ამასთანავე, პიკში მათ აქვთ კონკურენტული ფასი წიაღისეულ საწვავთან შედარებით და მათი მონტაჟი არ არის გეოგრაფიულად შეზღუდული.

2.1 ენერჯის შემნახველი ბატარეების დადებითი და უარყოფითი მხარეები

ენერჯის შემნახველი ბატარეები, განსხვავებით ტრადიციული რეზერვის წყაროებიდან (კომბინირებული ციკლის თბოელექტროსადგური, ჰიდროელექტროსადგური და ა.შ) არ არის შეზღუდული მექანიკური, თერმოდინამიკური და ჰიდრაულიკური თვისებებით. შესაბამისად, მას გააჩნია ენერჯისა და სიმძლავრის თანაფარდობის მცირე კოეფიციენტი და აქედან გამომდინარე, ძალიან მცირე განმუხტვის დრო (100 მკწმ). ეშბ აქვს, სიმძლავრის აღება-მოხსნის ძალიან მაღალი სიჩქარე. ისინი ხასიათდებიან ხანგრძლივი სიცოცხლისუნარიანობით სხვა ალტერნატივებთან შედარებით და არ გამოყოფენ CO2 ექსპლუატაციის პერიოდში. ამასთანავე, ეშბ არის კომპაქტური სხვა ალტერნატივებთან შედარებით და შეიძლება განთავსდეს ქსელის ნებისმიერ წერტილში პირველადი ენერგორესურსისგან დამოუკიდებლად. ბოლო დეკადის განმავლობაში, მათთვის დამახასიათებელია სწრაფად კლებადი ფასი.

თუმცა აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ ეშპ შეზღუდულია სიმძლავრით, ენერჯითა და განმუხტვის დროის ხანგრძლივობით კომბინირებული ციკლის თბოელექტროსადგურთან და რეზერვუარიან ჰესებთან შედარებით. ეშპ-ს მოცულობის ზრდასთან ერთად იზრდება ინვესტიციის მოცულობაც, რამაც შესაძლოა გადააჭარბოს ელექტროსადგურისთვის საჭირო ინვესტიციას. გარდა ამისა, დღის განმავლობაში რამდენჯერმე ეშპ-ის სრული დამუხტვა-განმუხტვა იწვევს მოწყობილობის ნაადრევ დაძველებას. ეკონომიკური თვალსაზრისით, რეკომენდებულია ეშპ-ის გათვლა რამდენიმე სასისტემო სერვისის გასაწევად, რათა მომგებიანი გახდეს მათი ქსელში ინტეგრაცია.

3 ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსები

ქარის ელექტროსადგური წარმოადგენს ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსს, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სათბურის გაზების ემისიის შემცირებაში. ის წარმოადგენს ენერჯის განახლებად და ამოუწურავ წყაროს, რომელსაც შეუძლია ეფექტურად ჩაანაცვლოს ამოწურვადი საწვავის რესურსი. გარდა ამისა, საქართველოს მსგავსი ქვეყნებისთვის, რომელიც მეტწილად დამოკიდებულია ჰიდრორესურსებზე, რომელიც ხასიათდება სეზონურობით და დიდი რაოდენობით იმპორტირებულ ელექტროენერჯიაზე, ქარის ელექტროსადგურები წარმოადგენ დივერსიფიცირებული გენერაციის წყაროს და ხელს უწყობს, შემცირებულ დამოკიდებულებას იმპორტზე. ამასთან ერთად, მათ აქვთ დაბალი ზღვრული დანახარჯი ტრადიციულ ელექტროსადგურებთან შედარებით.

მეორე მხრივ, ქესი ხასიათდება ამინდზე დამოკიდებულებითა და შესაბამისი ცვალებადი გენერაციით დღის, საათის და წუთის ჭრილში. შესაბამისად აქვს უარყოფითი გავლენა სიხშირეზე, სისტემის იზოლირებულ რეჟიმში მუშაობის დროს. ამასთანავე, ქესი ვერ უზრუნველყოფს აქტიური სიმძლავრის შენარჩუნებას მოკლე შერთვების დროს და შემცირებულ აქტიურ სიმძლავრეს, თავის მხრივ, უარყოფითი გავლენა აქვს სისტემის სტაბილურობაზე. ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის თავიდან ასაცილებლად, საჭიროა სისტემაში ძვირადღირებული სწრაფად მანევრირებადი სიმძლავრის რეზერვის მობილიზება, რაც ამვირებს ელექტროენერჯის ღირებულებას.

4 სისტემის დამხმარე სერვისები

ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადი და საიმედო მუშაობის უზრუნველსაყოფად, სისტემაში მობილიზებულია შემდეგი დამხმარე სერვისები.

- სიხშირის შენარჩუნების რეზერვი (პირველადი რეზერვი)
- სიხშირის აღდგენის რეზერვი (მეორეული რეზერვი)
- ჩანაცვლების რეზერვი (მესამეული რეზერვი)

- ძაბვის რეგულირება
- სისტემის აღდგენა ნულოვანი მდგომარეობიდან

4.1 სიხშირის კონტროლი - გამოწვევა ქარის ინტეგრაციის დროს

როგორც წინა თავებში აღინიშნა, ქესის დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს, სისტემის ოპერატორებისთვის დიდ გამოწვევას წარმოადგენს სიხშირის კონტროლი. სიხშირის ნომინალური მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად აუცილებელი პირობაა სიმძლავრეთა ბალანსის დაცვა. ე.ი. გამომუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერგია დროის ნებისმიერ მოცემულ მომენტში ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს. ქესის ცვალებადი და მერყევი გენერაციის გამო კი ეს პირობა ვერ სრულდება.

სიხშირის შენარჩუნების რეზერვი აქტიურდება სიხშირის ცვლილებიდან პირველ ოცდაათ წამამდე პერიოდში. ამ ტიპის რეზერვის გააქტიურებას უზრუნველყოფენ სიხშირის რეგულატორები. მათი ვერ გააქტიურების შემთხვევაში, აქტიურდება სპეციალური ავტომატიკები.

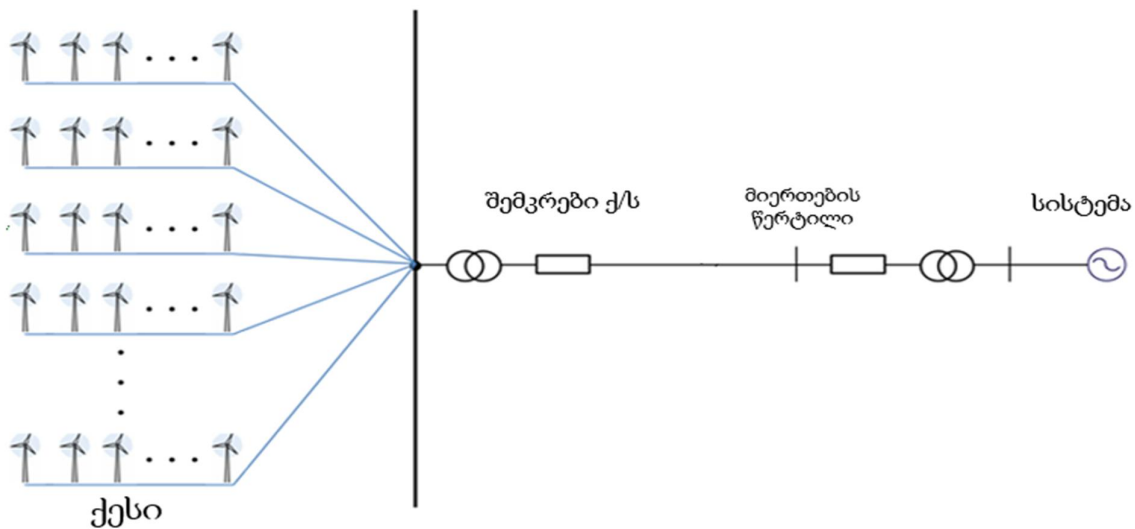
სიხშირის აღდგენის, ანუ მეორადი რეზერვი აქტიურდება სიხშირის გადახრიდან 30 წამის შემდეგ 10 წუთამდე პერიოდში. ასეთი რეზერვი აქტიურდება ავტომატური და დისტანციური მართვის (AGC) საშუალებით.

4.2 ენერჯის შემნახველი ბატარეების როლი სასისტემო მომსახურებაში

ენერჯის შემნახველ ბატარეების, თავიანთი მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, შეუძლიათ მნიშვნელოვანი როლი ითამაშონ სიხშირის რეგულირებაში. ეშპ შთანთქავს ან აწვდის ქსელს სიმძლავრეს ნომინალური დანაყენიდან გადახრის პროპორციულად, გაცილებით სწრაფად, ვიდრე ელექტროსადგურები. ეშპ განმუხტვის დროს შეადგენს საშუალოდ 100 მკწმს. ისინი ინახავენ ჭარბ ელექტროენერჯიას და ქსელში აწვდიან დეფიციტის დროს. შესაბამისად, ეშპ შეუძლია ცვალებადი ხასიათის ელექტროენერჯის კომპენსაცია და სიხშირის ბალანსის დაცვა სისტემის ოპერატორის მიერ დადგენილი მოთხოვნების შესაბამისად. ამასთანავე აქვს ძაბვისა და სიხშირის ერთდროული რეგულირების შესაძლებლობა. მათი გამოყენება ამცირებს მბრუნავი რეზერვების მობილიზების საჭიროებას და ამ მიზნით დიდი ელექტროსადგურების მშენებლობას და ზრდის მზისა და ქარის ელექტროსადგურების სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტს.

5 ქარის ელექტროსადგურის მუშაობის პრინციპი

ქარის ელექტროსადგური (ქესი) ეწოდება დიდ ტერიტორიაზე ქარის ტურბინებისგან შემდგარ ელექტროსადგურს, რომელიც პირველად ენერგორესურსად იყენებს ქარის ენერჯიას. დიდი სიმძლავრის ქარის ელექტროსადგურებში, ქარის ტურბინები განლაგებულია კლასტერებად. თითოეულ კლასტერში შეიძლება შედიოდეს რამდენიმე ქარის ტურბინა, რომლებიც იკრიბებიან ერთ სალტეზე და შემდეგ თითოეული კლასტერი საბოლოოდ ერთიანდება და ერთდება ერთ საერთო ძაბვის სალტეზე. ზოგადად ქარის ტურბინის გენერატორის გამოსასვლელი ძაბვა შეადგენს 690 ვ-ს, რომელიც შემდეგ მალდება სამაღლებელი ტრანსფორმატორით საშუალო (35 კვ) ან მაღალი ძაბვის (110/220 კვ) საფეხურამდე. ქესი შემკრები სალტიდან ძალოვანი კაბელით უერთდება ელექტროსისტემას ძირითადად მაღალი ძაბვის ქვესადგურთან. დიდი სიმძლავრის ქარის ელექტროსადგურის ზოგადი სქემა ნაჩვენებია სურათი 3-ზე.



სურათი: 3 ქესის ზოგადი სქემა

თანამედროვე ქარის ელექტროსადგურები, ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით, აგებულია ჰორიზონტალურდერძიანი ქარის ტურბინებისგან. ყველაზე გავრცელებულია ქარის ტურბინების შემდეგი კონფიგურაცია:

- ფიქსირებული სიჩქარის, რომელიც ქსელთან მიერთებულია სინქრონულად
- ცვალებადი სიჩქარის, რომელიც ქსელთან მიერთებულია ასინქრონულად, HVDC-ის გავლით

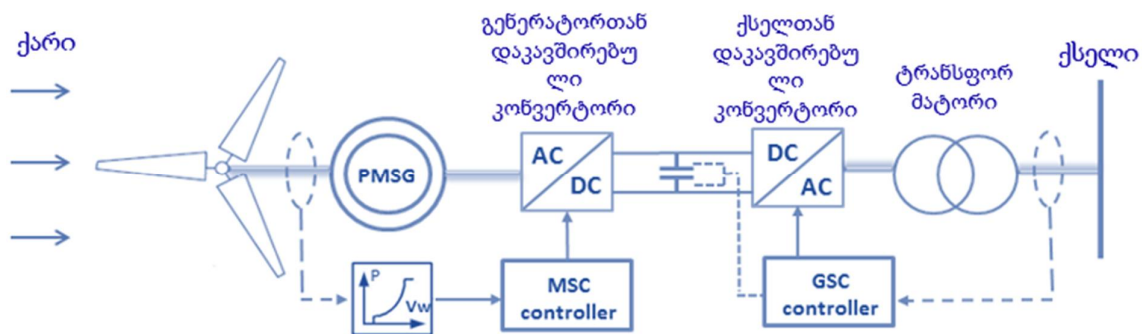
ხოლო, ამათგან მაღალი სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტის, სისტემის სიხშირეზე გაცილებით მცირე ზეგავლენისა და მეტად მოქნილი მართვის შესაძლებლობების გამო, ცვალებადი სიჩქარის ქარის ტურბინები წარმოადგენს ქესის ყველაზე გავრცელებულ

კონფიგურაციას. ცვალებადი სიჩქარის ქარის ტურბინები დაკომპლექტებულია ქვემოთ მოცემული ორი ძირითადი ტიპის გენერატორისაგან:

- ორმხრივი კვების ინდუქციური გენერატორი, რომლის სტატორსა და როტორს შორის მოთავსებულია ძალური ელექტრონიკის ინტერფეისი, რაც ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობის შესაძლებლობას იძლევა (როტორს აწვდის ცვლად ძაბვას სრიალის სიხშირის შესაბამისად). გენერირებული სიმძლავრის დაახლოებით 30% მიეწოდება ქსელს როტორიდან ძალური ელექტრონიკის გავლით, ხოლო დანარჩენი სიმძლავრე პირდაპირ გაედინება ქსელში სტატორის გავლით. სწორედ ამიტომ არის შეზღუდული ამ ტიპის ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობა.
- მუდმივი მაგნიტის სინქრონული გენერატორი (PMSG), მთლიანად არის იზოლირებული ქსელიდან ძალური ელექტრონიკის საშუალებით, რაც მთლიანად იძლევა ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობას ქსელის სიხშირისგან დამოუკიდებლად.

5.1 მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორი

მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორი სქემატურად ნაჩვენებია სურათ 4-ზე. ამ ტიპის გენერატორი ქსელიდან იზოლირებულია ძაბვის წყაროს კონვერტორული (VSC) ჩანართით. VSC-ის საშუალებით ერთმანეთისგან განცალკავებულია ძაბვისა და აქტიური სიმძლავრის კონტროლი. გენერატორთან დაკავშირებული კონვერტორით კონტროლდება აქტიური სიმძლავრე, ხოლო ქსელთან მიერთებული კონვერტორით რეაქტიული სიმძლავრე.



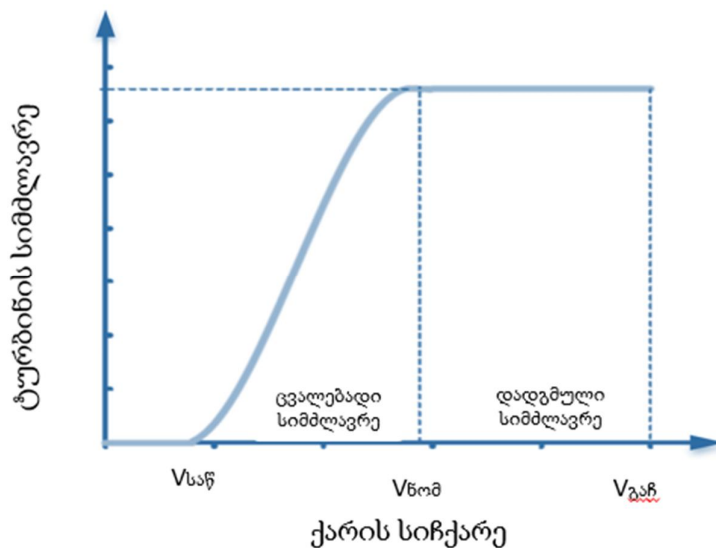
სურათი: 4 მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორის სქემა

სწორედ ზემოთ განხილული VSC-ის კონფიგურაციის საშუალებით PMSG-ის აქვს საშუალება ცვალოს თავისი სიმძლავრის გამომუშავება ქარის სიჩქარის შესაბამისად, ისე რომ მის ცვალებად სიხშირეს არ ჰქონდეს არანაირი გავლენა ქსელის სიხშირეზე. ქარის ტურბინის სიმძლავრის გამომუშავების ცვლილების შესაძლებლობა ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით ხასიათდება ქარის ტურბინის სიმძლავრის მრუდით. ტიპური

სიმძლავრის მრუდი ნაჩვენებია სურათ 5-ზე. სიმძლავრის მრუდის მიხედვით ქარის ტურბინა მუშაობას იწყებს ქარის $V_{საწ}$ სიჩქარეზე (ძირითადად 3 მ/წმ) რა დროსაც გამოიმუშავებს თავის მინიმალურ სიმძლავრეს. შემდეგ, ქარის სიჩქარის ზრდასთან ერთად, პროპორციულად იზრდება სიმძლავრის გამომუშავებაც სანამ ქარის სიჩქარე არ მიაღწევს ნომინალურ მნიშვნელობას (ძირითადად 15 – 25 მ/წმ), რომლის დროსაც ქარის ტურბინა გამოიმუშავებს ნომინალურ სიმძლავრეს. ხოლო როდესაც ქარის სიჩქარე მიაღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას $V_{გაჩ}$ (>25 მ/წმ), რომლის ზევითაც საშიში ხდება ტურბინის მუშაობა, ქარის ტურბინა ჩერდება და წყვეტს მუშაობას.

მაქსიმალური სიმძლავრის მიყოლის (MPPT) კონტროლი გამოიყენება ქარის ტურბინებში ქარის დაბალი სიჩქარეების დროს, რათა გამოიმუშაოს მაქსიმალური შესაძლებელი სიმძლავრე კონკრეტულ ქარის სიჩქარეზე

ტურბინის ფრთის დახრის კუთხის კონტროლი კი გამოიყენება ქარის უფრო მაღალი სიჩქარის დროს ტურბინის გამომუშავების შესაზღუდად.



სურათი: 5 ქარის ტურბინის ტიპური სიმძლავრის მრუდი

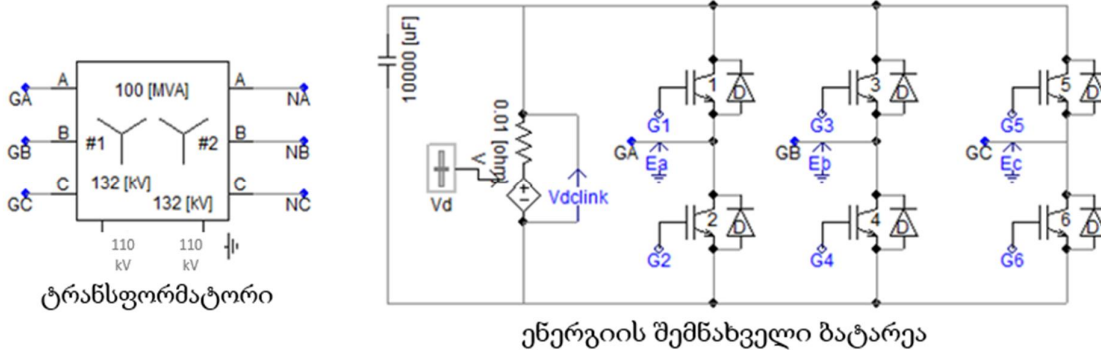
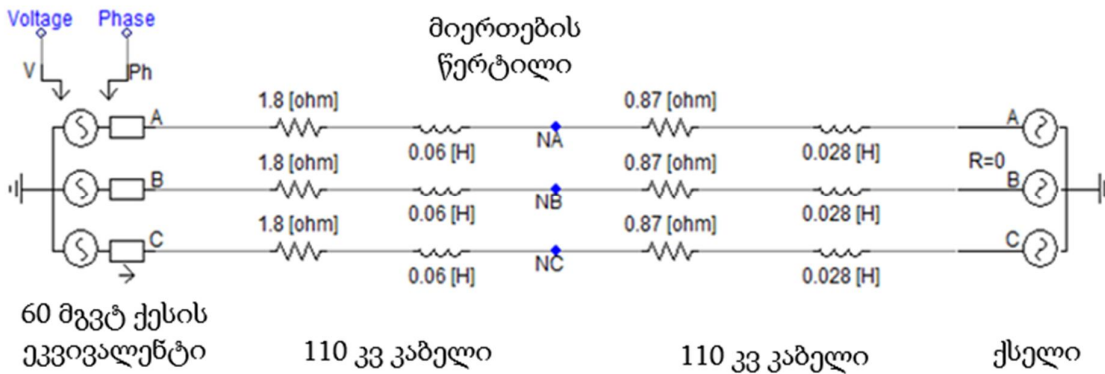
ცვალეზადი სიჩქარით მომუშავე ქარის ტურბინები საგრძნობლად ზრდის ქარის ელექტროსადგურის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტს და გაცილებით მიმზიდველს ხდის ელექტროსადგურს როგორც ინვესტორისთვის ასევე სისტემის ოპერატორისთვის.

6 სატესტო სისტემის აღწერა

სატესტო სისტემა აწყობილია სიმულაციურ პროგრამაში PSCAD/EMTDC. სატესტო სისტემა შედგება 60 მგვტ ქარის ელექტროსადგურისგან, რომელიც ქსელთან

მიერთებულია 110 კვ-იანი ძალური კაბელით და იმავე სალტზე მიერთებულია ენერჯის შემნახველი ბატარეა (სურათი 6).

მოდელში გამოყენებულია 60 მგვტ ქესის ეკვივალენტი, რომელიც წარმოდგენილია 3-ფაზა ცვლადი ძაბვის წყაროს სახით, რომლი ძაბვის სიდიდე და ფაზა კონტროლირებადია. მსგავსი მოდელის გამოყენება დასაშვებია, რადგან ამ კვლევის მიზანი არის ემბ-ის პასუხის შესწავლა ქარის სიჩქარის ცვლილებით გამოწვეულ გენერაციის ცვლილებაზე. შესაბამისად, მოდელში დაშვებულია, რომ ქესის ყველა ქარის ტურბინა არის მუშაობაში და სრულად შეესაბამება ქარხნულ პირობებს. ამავე პირობის გათვალისწინებით, შესაძლებელია მოდელში ვეიქ ეფექტის უგულვებლყოფა.



სურათი: 6 სატესტო სისტემა

ელექტროენერგეტიკული სისტემა წარმოდგენილია 3 ფაზა ძაბვის წყაროს სახით, რომლის ნომინალური ძაბვა არის 110 კვ და სიხშირე 50 ჰც. ასეთი მოდელით სისტემის წარმოდგენა მიზანშეწონილია, რადგან ელექტროენერგეტიკული სისტემა არის გაცილებით დიდი და მძლავრი, ვიდრე დამოძღვრებული ქესი.

ენერჯის შემნახველი ბატარეის მოდელი წარმოდგენილია ძაბვის კონვერტორის სახით. ამ მოდელში გათვალისწინებულია იდეალური ბატარეა, რომლის სიმძლავრეც მიჩნეულია იმდენად დიდად, რომ შეუძლია ქესის ნებისმიერი უზალანსობის

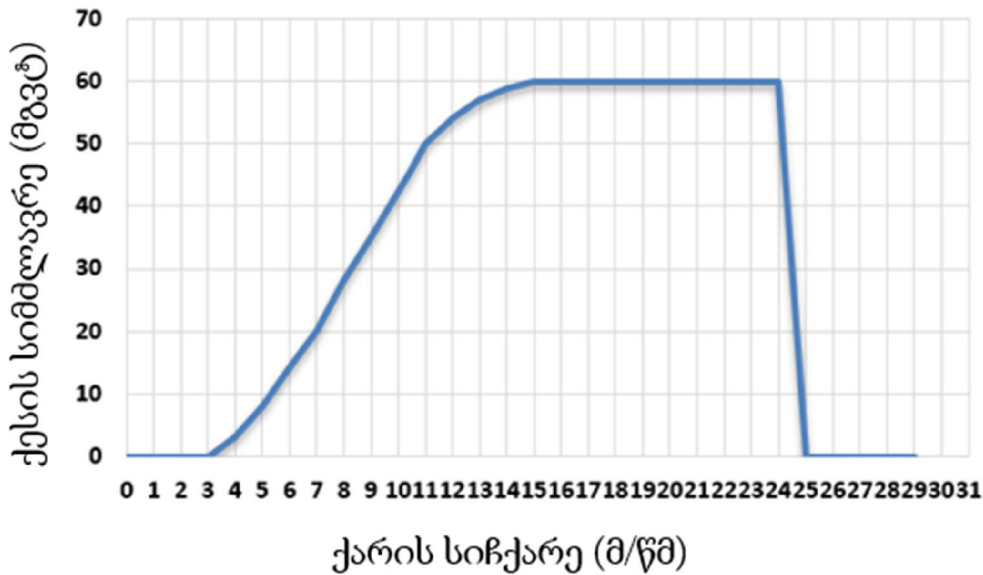
აღმოფხვრა. იდეალური ბატარეის ქცევა მიახლოებულია ლითიუმის ფოსფატის (LiFePO4) ემბ-თან, შესაბამისად, სიმულაციის შედეგები შეიძლება ჩაითვალოს ძალიან ახლოს რეალური ბატარეის ქცევასთან.

სიმულაციის დროს გამოყენებული ქარის სიჩქარის გრაფიკი 24 საათის განმავლობაში ნაჩვენებია სურათ 7-ზე.



სურათი: 7 დამოძღვრებული ქარის სიჩქარის ცვლილება 24 საათის განმავლობაში

ქესის ეკვივალენტი 3-ფაზა ცვლადი ძაბვის წყაროს ფაზის კონტროლი ხორციელდება სურათ 7-ზე მოცემული ქარის სიჩქარისა და მასზე დამოკიდებული ქარის ტურბინის სიმძლავრის მრუდის მიხედვით. აგრეგირებული ქესის სიმძლავრის მრუდი ნაჩვენებია სურათ 8-ზე.

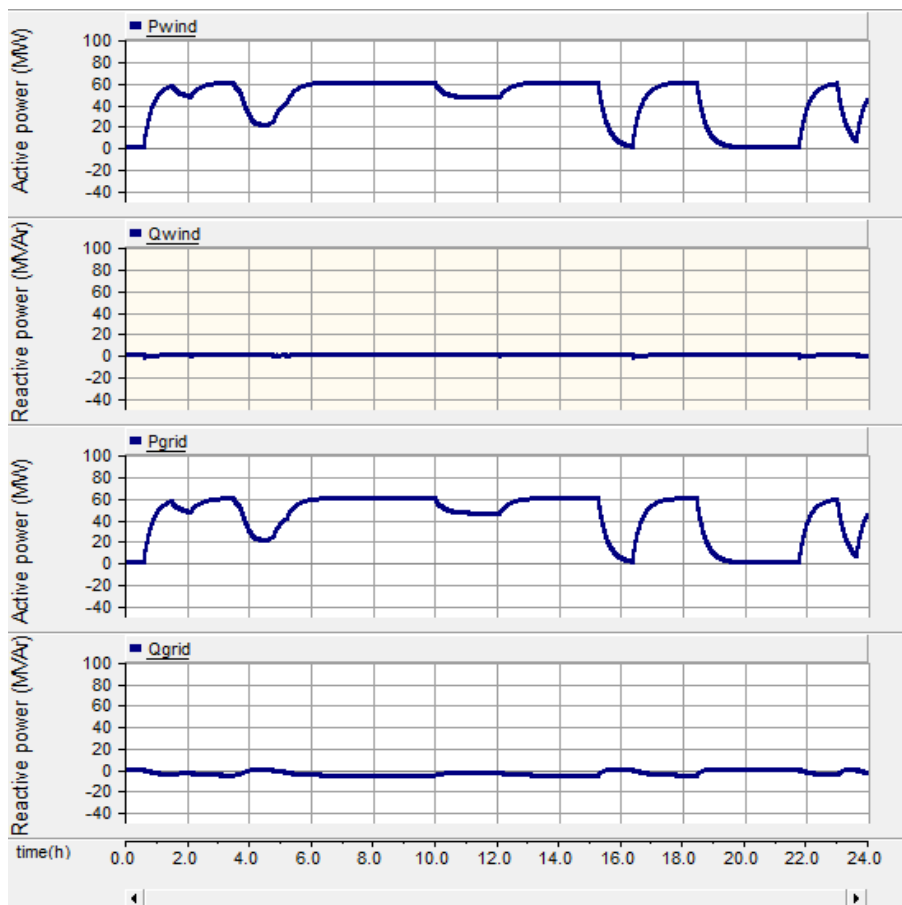


სურათი: 8 აგრეგირებული ქესის სიმძლავრის მრუდი

7 სიმულაციის შედეგები

სიმულაცია ჩატარდა სამი სხვადასხვა სცენარისთვის, სამივე სცენარში ქარის ელექტროსადგურის $\cos\phi=1$.

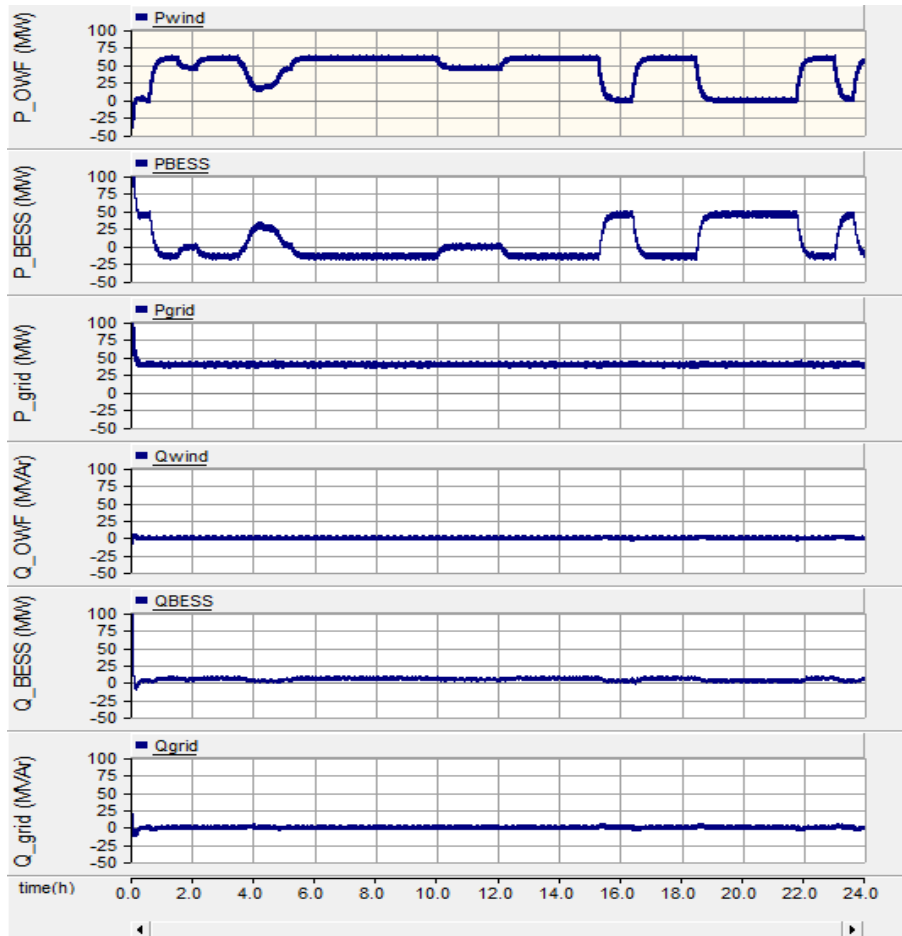
პირველ სცენარში სალტეზე მიერთებულია მხოლოდ ქესი, ხოლო ენერჯის შემნახველი ბატარეა გამორთულია. სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 9-ზე. როგორც სურათიდან ჩანს, ქარის ელექტროსადგურის გენერაციაში განსაკუთრებული რყევები შეინიშნება 15:00-დან 24:00-მდე პერიოდში. აღსანიშნავია, რომ ქესის გამომუშავება გაუტოლდა 0 მგვტ-ს 16:00 და 19:00 – 21:00 მაშინ როდესაც სისტემაში არის თეორიული პიკური დატვირთვა.



სურათი: 9 ქესის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად

პიკური დატვირთვის დროს უეცრად შემცირებული გენერაცია საფრთხის ქვეშ აყენებს ელექტროენერჯის საიმედოობისა და უწყვეტი მიწოდების პირობას და მოითხოვს სიხშირის რეზერვების გააქტიურებას, რაც თავის მხრივ აძვირებს ელექტროენერჯის ღირებულებას. მეორე მხრივ, ღამის განმავლობაში ქესი გამოიმუშავებდა თავის დადგმულ სიმძლავრეს (60 მგვტ). ღამის განმავლობაში ელექტროენერჯის მოხმარება

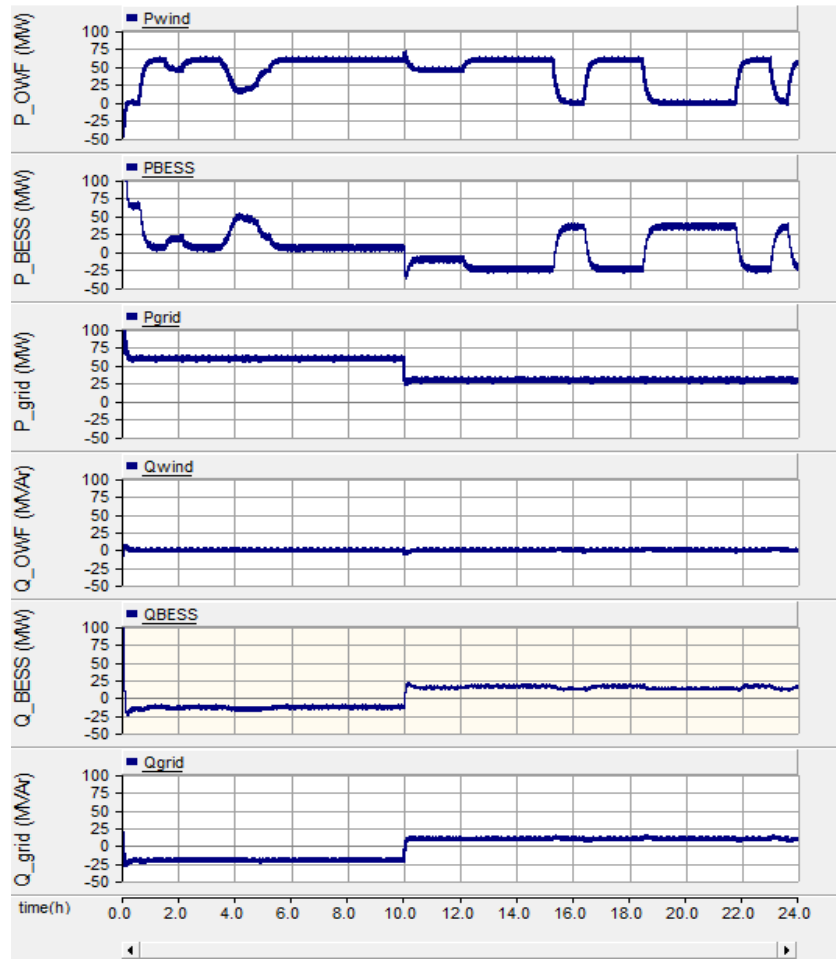
არის შემცირებული და შესაბამისად, სისტემაში არის ჭარბი გენერაცია. ამიტომ, სისტემის ოპერატორს მოუწევს ჭარბი გენერაციის შემცირება და მწვანე და იაფი გენერაციის გამორთვა.



სურათი: 10 ქესი + ეშბ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად

მეორე სცენარში დამოძღვრებულია ქესის და ეშბ-ის ერთდროული მუშაობა. ამ სცენარში განხილულია შემთხვევა, როდესაც ქარის ელექტროსადგურმა ქსელს უნდა მიაწოდოს 40 მგვტ სიმძლავრე, წინააღმდეგ შემთხვევაში დაჯარიმდება შექმნილი უბალანსობის გამო. შესაბამისად, ეშბ-ის დანაყენიც იყო 40 მგვტ და ქსელში მიწოდებული ელექტროენერგია გამოითვლება შემდეგი ფორმულით $P_{ქს} = P_{ქესი} \pm P_{ეშბ}$.

სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 10-ზე. $t=6$ სთ-ზე, ქესის გამომუშავებამ შეადგინა 60 მგვტ. ამავდროულად, ბატარეამ მყისიერად იმოქმედა და შთანთქა ზედმეტი 20 მგვტ და ქსელს მიეწოდა ხელშეკრულებით განსაზღვრული 40 მგვტ. $t=16$ სთ-ზე, ქესის გამომუშავება იყო 0 მგვტ, რა დროსაც ეშბ მყისიერად განიმუხტა 40 მგვტ-ით და ქესის გაჩერება შეუმჩნეველი გახდა სისტემის ოპერატორისთვის.



სურათი: 11 ქესი + ეშბ, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად (ქესის გენერაცია შეზღუდულია 25 მგვტ-ით)

მესამე სცენარში დამოდელირებულია შემთხვევა, როდესაც დღის ერთ მონაკვეთში $t=10$ სთ-მდე, ქესის გამომუშავება განსაზღვრული იყო 60 მგვტ-ით, ხოლო $t=10$ სთ-ის შემდეგ 25 მგვტ-ით. ამასთანავე, სისტემის ოპერატორის მხრიდან მოთხოვნილი იყო რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებაც. სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 11-ზე. წინა შემთხვევების მსგავსად, ამ შემთხვევაშიც, ქესის გენერაციის ნებისმიერი გადახრის დროს დანაყენიდან, ეშბ მყისიერად მოიხმარდა (იტენებოდა) ან გენერირებდა (განიმუხტებოდა) ზუსტად იმავე სიდიდეს რაც იყო დანაყენიდან გადახრა, შესაბამისად ქსელს მიეწოდებოდა მუდმივად ერთიდაიგივე სიდიდის სიმძლავრე კონტრაქტის შესაბამისად. ამასთან ერთად, მიუხედავად იმისა, რომ ქესის $\cos\phi=1$, ბატარეამ უზრუნველყო რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება. $t=10$ სთ-მდე, იგი მოიხმარდა რეაქტიულ სიმძლავრეს, ხოლო $t=10$ სთ-ის შემდეგ კი გენერირებდა.

8 დასკვნა

ქარის სიჩქარის ცვლილება არის შემთხვევითი და მწელად პროგნოზირებადი, რაც უქმნის საფრთხეს ელექტროსისტემის სტაბილურ და საიმედო მუშაობას, მათი დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს.

მოდელირებისა და სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ ენერჯის შემნახველ ბატარეებს შეუძლია შეამციროს ქარის ცვლადი სიჩქარით გამოწვეული რყევები, გაზარდოს ქსელის ადეკვატურობა და მოქნილობა.

ერთ კვანძში მიერთებულმა ეშბ და ქარის ელექტროსადგურმა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა ქსელის ადეკვატურობა, გაზარდა ქსელის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი და ქსელი გახდა დისპეტჩირებადი ენერჯის წყარო, მისი ცვლადი ბუნების მიუხედავად ეშბ და ქსელის კომბინაციას აქვს მნიშვნელოვანი სარგებელი როგორც სისტემის ოპერატორებისთვის, ასევე ქსელის მფლობელებისთვის, რადგან ისინი აღარ გადაიხდიან გადასახადს გენერაციის დიდ ფარგლებში ცვლადობისა და სისტემაში შექმნილი უბალანსობის გამო.

საერთო ჯამში, განხილული კომბინაცია მხარს უჭერს ქარის ელექტროსადგურების ქსელში ფართომასშტაბიან ინტეგრაციას, ელექტროსისტემის საიმედოობასა და მიწოდების უსაფრთხოებაზე მნიშვნელოვანი ზეგავლენის გარეშე

გამოყენებული ლიტერატურა

[1] European Environment Agency, 'Europe's onshore and offshore wind energy potential', no. 6. 2009.

[2] G. Ren, J. Liu, J. Wan, Y. Guo, and D. Yu, 'Overview of wind power intermittency : Impacts , measurements , and mitigation solutions,' Appl. Energy, Elsevier, vol. 204(c), no. October, pp. 47–65, 2017.

[3] ENTSO-E, 'Power Facts', 2019. [Online]. Available: https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSOE%20general%20publications/ENTSO-E_PowerFacts_2019.pdf. [Accessed: 27- Jul- 2021].

[4] 'Wind Power for Power Systems,' ed. by T. J. Ackermann, J. Wiley and Sons, Ltd, ch. 8, pp. 143–165, 2005.

[5] H . Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N. Rasmussen, 'Review of Energy Storage System for Wind Power Integration Support,' Appl. Energy, Elsevier, vol. 137, pp. 545-55, 2015.

- [6] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, 'Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation', *Appl. Energy*, Elsevier, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [7] H. HaiPing, P. WenXia, L. Bei and M.HuiMeng, 'One Power Control Strategy of Wind Farm Based on the Battery Energy Storage', in *Proc. 2012 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, IET, pp. 1-4, 2012.
- [8] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright and M. Hughes, 'Wind Generation: Modelling and Control', John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [9] M. Hoffman, A. Sadovsky, M. Kintner-Meyer, and J. DeSteele, 'Analysis tools for sizing and placement of energy storage in grid applications: a literature review,' *Pacific Northwest ...*, no. September, p. 32, 2010.
- [10] International Renewable Energy Agency, 'Battery Storage for Renewables: Market status and Technology Outlook', 2015. [Online]. Available: https://irena.org/documentdownloads/publications/irena_battery_storage_report_2015.pdf . [Accessed: 28- Jul- 2021].
- [11] Elizarashvili, T., Arziani, G., & Kvatadze, B. (2022). Renewable energy hybrid mini-grid concept for rural electrification in Georgia. In *Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022* (Paper No. C6-11119_2022).
- [12] Elizarashvili, T., & Arziani, G. (2022). FACTS with energy storage for renewable integration in the Georgian power system. In *Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022* (Paper No. B4-11120_2022). CIGRE.
- [13] K. Bakič, SEERC CIGRE History: Early Electrification and Empowerment of Region where Current Electricity was Born. Ljubljana, Slovenia: Slovenian Association of Electric Power Engineers CIGRE&CIREC, 2020.
- [14] Arziani, G., Kvatadze, B., Baramidze, L. (2023). Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow. *Georgian Scientists*, 5(4), 177–187. <https://doi.org/10.52340/gc.2023.05.04.16>
- [15] G. Arziani and T. Elizarashvili, "FACTS for effective DER integration into the Georgia distribution grids," *Turk J Electr Power Energy Syst.*, 2025; 5(2), 105-113. Published online May 5, 2025. <https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24036>

[16]. G. Arziani and G. Chkhaidze, "The Impact of the Level of Detail in the Distributed Parameter Model of a Transmission Line on Its Frequency Characteristics", GS, vol. 7, no. 2, pp. 493–502, Jun. 2025. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.02.44>

Role of energy storage systems for ancillary services

Abstract

The large-scale integration of wind power into modern electricity systems presents fundamental operational challenges, owing to the stochastic and non-dispatchable nature of wind resources. This paper examines the colocated of Battery Energy Storage Systems (BESS) with utility - scale wind power plants as a technically and economically viable strategy for mitigating generation variability and enabling firm power delivery. A 60 MW wind power plant, comprising Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG), interfaced with the grid via back-to-back Voltage Source Converters (VSC) is modeled in the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation environment, alongside a Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) - based BESS connected at the 110 kV point of common coupling. Three representative operational scenarios are evaluated over a 24-hour simulation horizon: (i) standalone wind plant operation without storage; (ii) wind-BESS co-operation with real-time power smoothing and constant 40 MW grid delivery; and (iii) combined operation under active power curtailment with simultaneous reactive power regulation. Simulation results demonstrate that BESS effectively eliminates generation volatility, enables energy time-shifting from periods of surplus to peak demand intervals, and delivers critical ancillary services: including primary frequency response and dynamic reactive power compensation with a discharge response time of approximately 100 milliseconds. The study findings have shown that BESS integration transforms an inherently intermittent wind generation into a dispatchable generation resource, enhances power system stability, improves the capacity factor of the wind plant, and has potential to generate additional economic value through the elimination of imbalance penalties, reduction of curtailments, and access to ancillary service revenue streams.

Keywords: Battery Energy Storage Systems, Wind Farm Integration, Frequency Regulation, Reactive Power Control, Energy Time-Shifting.