

ჰარმონიკული რეზონანსის კვლევა მაღალი ძაბვის ქსელში

გვანცა ბარდაძე, ირაკლი გორდიაშვილი

სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა“

gvantsa.bardadze.gb@gmail.com , gordiashvili@gmail.com

რეზიუმე

თანამედროვე ელექტროენერგეტიკული სისტემები სწრაფად იცვლება განახლებადი ენერგიის წყაროების, განსაკუთრებით ქარისა და მზის ენერგიის მზარდი ინტეგრაციის ფონზე. ენერგიის აღნიშნული წყაროები ხშირად ოპერირებენ ინვერტორული ტექნოლოგიებით, რომლებიც ელექტრონულად უკავშირდება ელექტრულ ქსელს და წარმოქმნის ჰარმონიკულ სიგნალებს სხვადასხვა სიხშირული რიგების სახით. მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების შესწავლა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მაშინ, როდესაც განახლებადი ენერგეტიკული წყაროები ერთვება მაღალი ძაბვის გადაცემის ან ქვეგადაცემის დონეებზე. ასეთ შემთხვევებში, გარდა იმისა რომ ჰარმონიკულად ბინძურდება მთელი ელექტრული სისტემა, იზრდება ელექტრული ქსელში ჰარმონიკული რეზონანსის გაჩენის რისკი, რაც უარყოფითად აისახება ქსელის სტაბილურობასა და ელექტროენერგიის ხარისხზე. სწორედ ამიტომ კრიტიკულად მნიშვნელოვანია მაღალი ძაბვის ქსელის სიხშირული მახასიათებლების, კომპლექსური წინაღობებისა და პოტენციური რეზონანსული წერტილების სიღრმისეული გამოკვლევა, რაც ხელს შეუწყობს ამ ფენომენთან დაკავშირებული რისკების დროულ იდენტიფიცირებას, შერბილებისა და ჩახშობის ღონისძიებების დროულ შერჩევას და სისტემის სტაბილურობისა და ენერგიის ხარისხის შენარჩუნებას განახლებადი ენერგიის მზარდი ინტეგრაციის პირობებში.

ჰარმონიკული რეზონანსი წარმოიქმნება ისეთ შემთხვევებში, როდესაც ჰარმონიკული კომპონენტების სიხშირე ემთხვევა ელექტრული ქსელის ბუნებრივ რეზონანსულ სიხშირეს. ასეთ თანხვედრა იწვევს ჰარმონიკების ამპლიტუდების გაძლიერებას, რამაც საბოლოო ჯამში შესაძლოა სისტემის ელემენტების დაზიანებამდე კი მიგვიყვანოს.

დამატებით სირთულეს ქმნის განახლებადი გენერაციის დეცენტრალიზებული სტრუქტურა. ტრადიციული ცენტრალიზებული ელექტროსადგურები, როგორც წესი, გამოირჩევიან იმპედანსური მახასიათებლების სტაბილური და პროგნოზირებადი ქცევით, რაც ამარტივებს მათ შესწავლას. სამწუხაროდ, სწრაფად ცვალებადი განახლებადი გენერაციების შემთხვევაში ეს ასე არ არის. ასეთი რესურსები ფართოდ არის განლაგებული სხვადასხვა რეგიონში და მათი

სიმძლავრე მუდმივად ცვალებადია, რაც იწვევს გენერირებული სიხშირული სპექტრებისა და ტოპოლოგიური იმპედანსების მუდმივ, დინამიკურ ცვლილებებს. ეს ყოველივე საბოლოო ჯამში ართულებს ჰარმონიკული რეზონანსის მოვლენების წინასწარ შეფასებასა და მათ მართვას რეალურ დროში.

აღსანიშნავია, რომ წინამდებარე კვლევა წარმოადგენს კომპლექსური და მრავალგანზომილებიანი ანალიზის ნაწილს, რომელიც კვლავაც მიმდინარეობს. გამომდინარე თემის ტექნიკური სირთულიდან, ავტორები განაგრძობენ მონაცემთა შეგროვებას, სიხშირული მოდელების დახვეწას და სისტემური სიმულაციების განხორციელებას, რათა მიღწეული იქნეს უფრო ზუსტი და გამოყენებადი შედეგები. კვლევის გაგრძელება მიზნად ისახავს ჰარმონიკული რეზონანსის პრევენციის ინსტრუმენტების შემუშავებას, ოპტიმალური ფილტრაციის სტრატეგიების დაგეგმვას და მათ შემოწმებას მოდელირებულ გარემოში. კვლევის საბოლოო მიზანია ისეთი პრაქტიკული მიდგომისა და მეთოდების ჩამოყალიბება, რომელიც შესაძლებელს გახდის განახლებადი ენერგიის წყაროების უსაფრთხო ინტეგრაციას ელექტრულ სისტემაში, მინიმალური ტექნიკური რისკითა და მაქსიმალური ეფექტურობით.

საძიებო სიტყვები: განახლებადი ენერგია, ჰარმონიკები, ჰარმონიკული რეზონანსი, ჰარმონიკული ანალიზი, ჰარმონიკული დამახინჯება, ელექტრული სისტემა, ელექტრული ქსელი, სიხშირული სკანირება.

შესავალი

თანამედროვე ელექტრულ სისტემებში აქტიურად მიმდინარეობს ცვალებადი განახლებადი ენერგიის წყაროების, მათ შორის მსხვილმასშტაბიანი ქარისა და მზის პროექტების მასიური ინტეგრაცია [1]. ეს განახლებადი წყაროები, რომლებიც ენერგოსისტემასთან დაკავშირებისთვის იყენებენ ელექტრონულ ინვერტორებს, ქსელში წარმოქმნიან სხვადასხვა სპექტრალური რიგის ჰარმონიკებს. პროექტების მასშტაბებიდან გამომდინარე, გენერაციის წყაროები შესაძლოა დაუკავშირდნენ როგორც ქვეგადაცემის, ისე გადაცემის ძაბვის დონეებს, რაც ჰარმონიკული რეზონანსის გაჩენის ყურადსაღებ რისკს წარმოშობს. შესაბამისად, აუცილებელი ხდება ქსელის მაღალსიხშირული იმპედანსების და პოტენციური რეზონანსული წერტილების სიღრმისეული შესწავლა [2], [3], [4].

ინვერტორზე დაფუძნებული განახლებადი გენერაციის მასობრივად დანერგვას თან ახლავს ჰარმონიკებთან დაკავშირებული მნიშვნელოვანი ტექნიკური გამოწვევები. ინვერტორები წარმოქმნიან ჰარმონიკულ დენებს, რომლებიც ურთიერთქმედებენ ქსელის ბუნებრივ რეზონანსულ სიხშირეებთან. როდესაც ინვერტორების მიერ წარმოქმნილი ჰარმონიკები ემთხვევა ამ რეზონანსულ სიხშირეებს, ეს იწვევს ჰარმონიკული დამახინჯების გაძლიერებას, რაც აუარესებს ენერგიის ხარისხს და შეიძლება სისტემურ არასტაბილურობამდეც კი მიგვიყვანოს [2], [3], [4].

გარდა ამისა, განახლებადი ენერგიის დეცენტრალიზებული ბუნება არსებითად ცვლის ელექტრული სისტემის იმპედანსურ პროფილს. განახლებადი წყაროების ცვალებადობა წარმოშობს დინამიკურ ცვლილებებს სიმძლავრის ნაკადებსა და ქსელის კომპლექსურ

წინააღმდეგობაში, რაც ქმნის რეზონანსულ რისკებს, რომელთა პროგნოზირება და მართვა საკმაოდ რთულია [2], [3], [4].

ჰარმონიკული რეზონანსის ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული სიმპტომია ძაბვის ანომალური დამახინჯება, განსაკუთრებით ისეთ წერტილებში, სადაც არაწრფივი დატვირთვა ან ინვერტორული გენერაცია არ არსებობს. საერთო ჯამში, ჰარმონიკული რეზონანსი მრავალმხრივ საფრთხეს უქმნის ელექტრულ ქსელებს და მათ შემადგენელ კომპონენტებს. ის იწვევს ენერგიის ხარისხის მნიშვნელოვან გაუარესებას, მოწყობილობების დაზიანებას, ექსპლუატაციის ხარჯების ზრდას და უსაფრთხოების პრობლემებს. ამ ფონზე, ჰარმონიკების ანალიზის ჩატარება, ქსელის სისტემური დაგეგმარება და შესაბამისი დამცავი ტექნოლოგიების გამოყენება აუცილებელი ხდება მდგრადი და საიმედო ელექტრული სისტემის უზრუნველსაყოფად.

ნაშრომში წარმოდგენილია მოდელირებითა და სიმულაციით მიღებული შედეგები, რომლებიც ნათლად გვიჩვენებს თუ როგორ ცვლის განახლებადი ენერგიის დეცენტრალიზებული ბუნება ქსელის იმპედანსურ პროფილს და რა სირთულეებს ქმნის ეს ჰარმონიკების მართვის კუთხით. ამ კვლევაში, რომელიც წარმოადგენს მასშტაბური კვლევის მხოლოდ მცირე ნაწილს, ძირითადი ყურადღება ეთმობა პროაქტიული სტრატეგიების საჭიროებას, მათ შორის ოპტიმიზებული ფილტრაციის სისტემებისა და რეალურ დროში გაზომვისა და ანალიზის სისტემების დანერგვას, რათა მოხდეს ჰარმონიკებთან დაკავშირებული პრობლემების ეფექტური მართვა და ნეგატიური გავლენების მინიმიზაცია.

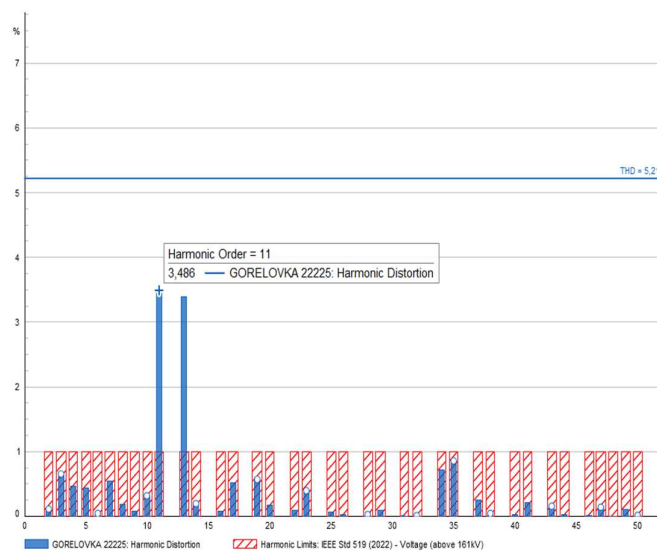
ჰარმონიკული ნაკადგანაწილებისა და სიხშირული სკანირების შედეგები

ქსელის სხვადასხვა რეჟიმში ჩატარებულმა ჰარმონიკულმა ანალიზმა გამოავლინა რიგი მნიშვნელოვანი ფაქტორები, რომელთაც განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს ელექტრული სისტემის განვითარების ყველა ეტაპზე. ამ ფაქტორების შეჯამება შემდეგნაირად შეიძლება ჩამოყალიბდეს:

- **განახლებადი ელექტროსადგურების მასიური ინტეგრაციის გავლენა ჰარმონიკულ დამახინჯებაზე:** ქარისა და მზის სადგურების ინტეგრაცია მნიშვნელოვნად ცვლის ქსელში ძაბვის ჰარმონიკულ სპექტრებს. ინვერტორებზე დაფუძნებული გენერაციის წყაროები ზრდიან ჰარმონიკულ, ინტერჰარმონიკულ და სუპრაჰარმონიკულ კომპონენტებს, რაც ცალკეული ჰარმონიკების (IHD) და ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების (THD) დონეების გადაჭარბებას იწვევს გარკვეულ კვანძებში, რაც შესაძლოა გასცდეს ქსელის წესებით განსაზღვრულ დასაშვებ ზღვრებს.
- **ინვერტორების ტექნიკური მახასიათებლების მნიშვნელობა განახლებად სადგურებში:** იმისათვის, რომ არ მოხდეს ჰარმონიკული პროფილის გაუარესება, განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს იმ ინვერტორების ტექნიკურ პარამეტრებს, რომლებიც გამოიყენება განახლებადი ენერგიის წყაროებზე მომუშავე სადგურებში. ყურადღება უნდა გამახვილდეს მათი მიერ წარმოქმნილ ჰარმონიკულ, ინტერჰარმონიკულ და სუპრაჰარმონიკულ კომპონენტებზე და მათ ამპლიტუდებზე. ამ პარამეტრების ნორმის ფარგლებში შენარჩუნება ხელს შეუწყობს ქსელში ძაბვის ჰარმონიკული დამახინჯების შემცირებას.

- ქსელთან შეერთების სპეციალური მეთოდების შემუშავების აუცილებლობა: ინვერტორზე დაფუძნებული სადგურებისა და არახაზოვანი დატვირთვების ქსელთან უსაფრთხო ინტეგრაციისთვის საჭიროა სპეციალური მიდგომების შემუშავება, რომლებიც მაღალი სიზუსტით შეაფასებენ მათ გავლენას ქსელზე. ასეთმა მეთოდებმა უნდა მოიცვას ფონური ჰარმონიკების გაძლიერების შეფასება და მათი შესაძლო ზეგავლენის პროგნოზირება, რათა მოხდეს უარყოფითი გავლენის მინიმიზაცია.
- დატვირთვების რეაქტიული სიმძლავრის გავლენა ჰარმონიკულ პროფილზე: დატვირთვების მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ჰარმონიკულ დამახინჯებაზე. ანალიზმა აჩვენა, რომ რეაქტიული სიმძლავრის შემცირება, როგორც წესი, არსებითად ამცირებს როგორც ცალკეულ ჰარმონიკულ, ისე ჯამურ ჰარმონიკულ დამახინჯებებს ენერგოსისტემის უმეტეს კვანძში.

ჰარმონიკული ანალიზის ზოგიერთი კონკრეტული შედეგი, რომელშიც კარგად ჩანს ჯამური და ინდივიდუალური დამახინჯებების გადახრა დასაშვები ზღვრებიდან 1,2,3 და 4 ნახაზებზეა მოცემული. სიმულაციებმა გამოავლინა ელექტრული ქსელის ისეთი კვანძები, რომლებშიც ცალკეული და ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების მაჩვენებლები აღემატება იმ ზღვრულ მნიშვნელობებს, რომლებიც განსაზღვრულია როგორც ლოკალურ ქსელის წესებში, ასევე, საერთაშორისო სტანდარტებში.



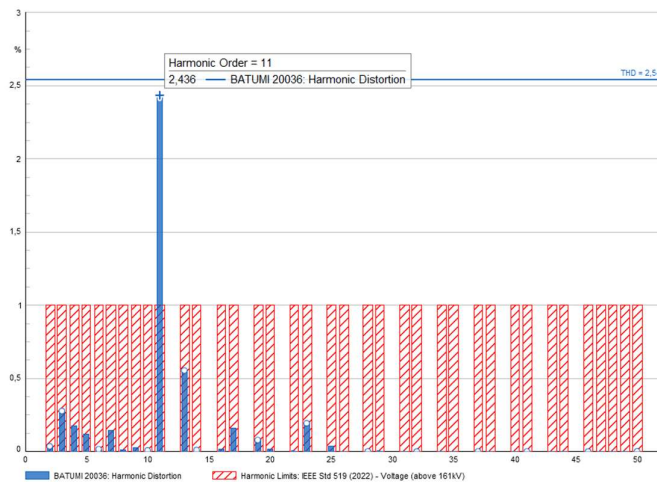
ნახაზი 7 - ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება ქვესადგურ 1 - ში

როგორც ნახაზ 1 - დან ჩანს ქვესადგურ 1 - ში დომინანტი ჰარმონიკები, რომლთა ამპლიტუდებიც დასაშვებ ზღვრებს მიღმაა, მე-11 და მე-13 რიგისა.

ქვესადგურ 2-ში, გარდა მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკებისა, ყურადღებას იქცევს უფრო მაღალი, კერძოდ კი, 34-ე და 35-ე რიგებიც.

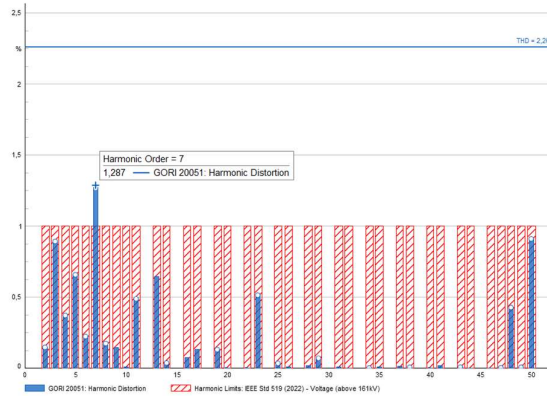


ნახაზი 8 - ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება ქვესადგურ 2 - ში



ნახაზი 9 - ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება ქვესადგურ 3-ში

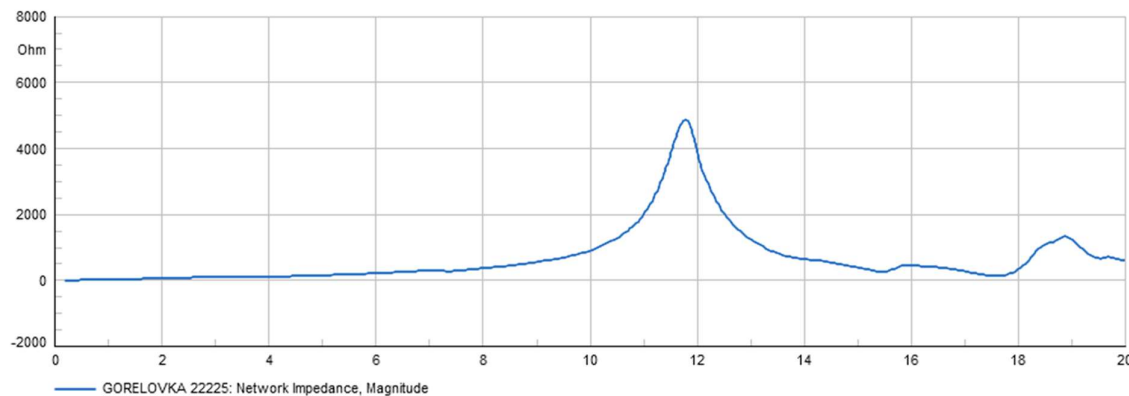
ქვესადგურ 3 - ში მხოლოდ მე-11 რიგის ჰარმონიკა არღვევს დადგენილ ლიმიტს, ქვესადგურ 4 - ში კი, მხოლოდ მე 7 რიგის ჰარმონიკა, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზ 3 - ზე და ნახაზ 4 -ზე, შესაბამისად. მხოლოდ ამ მონაცემების ანალიზიც კი გვაძლევს საფუძველს დავასკვნათ, თუ რა ძლიერ არის დამოკიდებული მაღალსიხშირული ტოპოლოგიური სურათი ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების შედეგებზე.



ნახაზი 10 - ინდივიდუალური ჰარმონიკული დამახინჯება ქვესადგურ 4 - ში

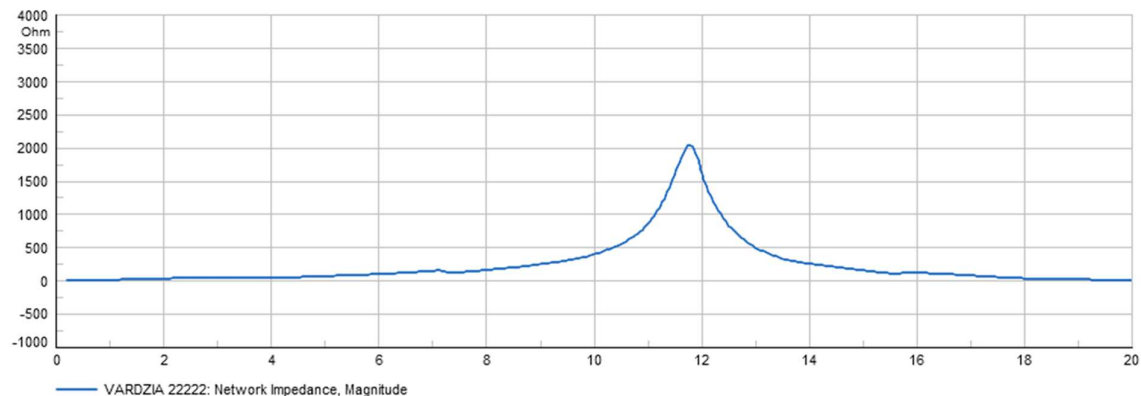
მსგავსი ტიპის ანალიზი ჩავატარეთ უფრო დამძიმებულ, ე.წ. N - 1 რეჟიმებშიც, სადაც შედეგები შედარებით მძიმეა. ეს შეიძლება აიხსნას შემდეგი გარემოებით: ჰარმონიკულ დენებს უწევთ უფრო მაღალი წინაღობების გავლა, რაც საბოლოო ჯამში ჰარმონიკული ძაბვის ვარდნების გაზრდილ მნიშვნელობებში ვლინდება.

გარდა ჰარმონიკული დონეების განსაზღვრისა, კვლევა ითვალისწინებს ქსელის სპექტრული, კომპლექსური წინაღობების შესწავლასაც. ამ მიზნის მისაღწევად, ვიყენებთ ქსელის სიხშირული სკანირების აპრობირებულ მეთოდს. აღსანიშნავია, რომ ამ მეთოდის წარმატებისთვის აუცილებელი პირობაა რომ მოდელში ქსელის კომპონენტების სიხშირული მახასიათებლები მაღალი სიზუსტით იყოს გათვალისწინებული. სიხშირული სკანირების შედეგები ქვესადგურ 1 - ისა და ქვესადგურ 2 - სთვის მე-5 და მე-6 ნახაზებზეა ნაჩვენები.



ნახაზი 11 - სიხშირული სკანირების შედეგი ქვესადგურ 1 - ში

ამ ტიპის სკანირება გვებმარება დავადგინოთ ქსელის პარალელური რეზონანსული კონტურების ძირითადი სიხშირეები და გავითვალისწინოთ ეს ინფორმაცია, როგორც პრობლემის გამომწვევი ფაქტორების დადგენაში, ასევე ფილტრაციის ღონისძიებებისა და მექანიზმების განსაზღვრაში.



ნახაზი 12 - სიხშირული სკანირების შედეგი ქვესადგურ 2 - ში

მე - 5 და მე - 6 ნახაზებზე ნაჩვენებ მახასიათებლებში, დომინანტი სიხშირე ახლოს არის მე - 11 და მე - 12 რიგებს შორის არის მოქცეული, რაც ნაწილობრივ ხსნის ამ ქვესადგურებში მე - 11 რიგის ჰარმონიკული კომპონენტის გაძლიერებას.

წინასწარი რეკომენდაციები და დასკვნა

მოცემული ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს რამდენიმე საწყისი რეკომენდაცია, რომლებიც მიმართულია ჰარმონიკული დამახინჯების შემცირებისა და რეზონანსული მოვლენების რისკის მინიმიზაციისკენ.

ერთ-ერთ ყველაზე ეფექტურ მიდგომად მოიაზრება ჰარმონიკების ჩამხშობი ღონისძიებების გონივრული დაგეგმვა. სწორად გათვლილი პასიური შუნტური ფილტრების გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა, შევამციროთ მაღალი ამპლიტუდის მქონე ჰარმონიკული კომპონენტები. რიგ შემთხვევებში შესაძლებელია დადგეს გრძივი ჩამხშობი ელემენტების დანერგვის აუცილებლობაც. ეს ღონისძიებები ემსახურება არა მხოლოდ ჰარმონიკულ ჩახშობას, არამედ რეზონანსული სიხშირეების ხელოვნურ გადანაცვლებას სიხშირულ ღერძზე.

განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს ქსელის იმპედანსურ მახასიათებლებს, რათა მათ არ მოხდეს თანხვედრა ჰარმონიკულ სიხშირეებთან, განსაკუთრებით მოწყვლად კვანძებში. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ასევე გავლენას ახდენს იმპედანსურ პროფილზე, რაც სასიკეთოდ შეიძლება გამოვიყენოთ ორმაგი სარგებელი შევქმნათ ქსელისთვის.

განახლებადი ენერგიის მაღალი წილით დატვირთულ ქსელებში განსაკუთრებული ყურადღება უნდა გამახვილდეს ინვერტორის ტექნიკურ მონაცემებზე. დაუშვებელია ისეთი ინვერტორების გამოყენება, რომელთა მიერ გენერირებული სიხშირული სპექტრები ვერ აკმაყოფილებს საერთაშორისოდ აღიარებულ დასაშვებ ნორმებს.

ჰარმონიკების რეალურ დროში მონიტორინგის და მართვისთვის აუცილებელია ცენტრალიზებული სისტემის დანერგვა. მონიტორინგის გარეშე, რეგულარული გაზომვა შესაძლებელს ხდის, რომ დროულად მოხდეს რეზონანსული მოვლენების იდენტიფიცირება

და მათზე პრევენციული რეაგირება, რაც თავიდან აგვაცილებს მოწყობილობების დაზიანებასა და სისტემურ შეფერხებებს.

საბოლოო ჯამში, აუცილებელია ენერგიის ხარისხზე ყურადღების გამახვილება, ტექნოლოგიების გონივრული დანერგვა და ამ მიმართულებით განვითარების სტრატეგიის მარეგულირებელ ჩარჩოებთან სრული თავსებადობა, რაც გრძელვადიან პერსპექტივაში უზრუნველყოფს ელექტრული სისტემის მდგრად განვითარებასა და განახლებადი ენერგეტიკული წყაროების უსაფრთხო ინტეგრაციას.

ლიტერატურა

- [1] 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&CIRED, 2020.
- [2] G. Arziani, B. Kvatadze, and L. Baramidze, “Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow”, GS, vol. 5, no. 4, pp. 177–187, Nov. 2023. <https://doi.org/10.52340/gs.2023.05.04.16>
- [3] G. Arziani and T. Elizarashvili, “FACTS for effective DER integration into the Georgia distribution grids,” Turk J Electr Power Energy Syst., Published online May 5, 2025. doi 10.5152/tepes.2025.24036.
- [4] 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>

Harmonic Resonance study in HV Network

Gvantsa Bardadze, Irakli Gordiashvili

Abstract

Modern power systems are undergoing rapid transformation amid the increasing integration of renewable energy sources, particularly wind and solar power. These sources often rely on inverter-based technologies, which interface with the electrical grid through power electronic converters and generate harmonic signals across a range of frequency orders. The study of high-frequency harmonics becomes especially important when renewable energy sources are connected at high-voltage transmission or sub-transmission levels. In such cases, in addition to contaminating the electrical system with harmonics, the risk of harmonic resonance within the power network increases significantly, which can adversely affect grid stability and power quality. Therefore, it is critically important to conduct an in-depth analysis of the frequency characteristics, complex impedances, and potential resonant points of the high-voltage network. Such analysis will facilitate the timely identification of risks associated with harmonic phenomena and enable the selection of optimal mitigation and suppression strategies to ensure the stability and quality of power delivery amid the growing integration of renewable energy.

Harmonic resonance occurs when the frequency of harmonic components coincides with the natural resonant frequency of the electrical network. Such frequency alignment leads to the amplification of harmonic amplitudes, which can ultimately result in damage to system components.

An additional complexity arises from the decentralized nature of renewable generation. Traditional centralized power plants typically exhibit stable and predictable impedance characteristics, making them easier to analyze and model. Unfortunately, this is not the case with rapidly fluctuating renewable energy sources. These resources are widely distributed across different regions and have variable output, leading to dynamic shifts in the generated frequency spectra and grid impedance topologies. Consequently, predicting and managing harmonic resonance phenomena in real time becomes significantly more challenging.

It is worth noting that the present study is part of an ongoing, complex, and multidimensional analysis. Due to the technical complexity of the subject and the dynamic nature of the power system, the authors are continuing their work through expanded data collection, refinement of frequency-domain models, and detailed system simulations to achieve more accurate and applicable results. The continuation of the research aims to develop tools for the prevention of harmonic resonance, plan optimal filtering strategies, and validate these approaches within modeled environments. The ultimate goal of this study is to establish practical methods and approaches that enable the safe integration of renewable energy sources into the power system with minimal technical risk and maximum efficiency.

Keywords: Renewable Energy, Harmonics, Harmonic Resonance, Harmonic Analysis, Harmonic Distortion, Power System, Electrical Network, Frequency Scanning.