

ელექტროგადამცემი ხაზის განაწილებულპარამეტრებიანი მოდელის დეტალიზაციის ხარისხის გავლენა მის სიხშირულ მახასიათებლებზე

გიორგი არზიანი, გიორგი ჩხაიძე

g.arziani@gtu.ge , giorgichkhaidze1313@gmail.com

რეზიუმე

ელექტრული ენერგიის ხარისხის შეფასების ერთ-ერთი ფართოდ გავრცელებული მეთოდი ემყარება ელექტრული სისტემის რეჟიმების მოდელირებასა და სიმულაციას, რაც საშუალებას გვაძლევს სისტემის მუშაობის დეტალური ანალიზი ჩავატაროთ რეალურ გარემოში ჩარევის გარეშე. ეს მიდგომა ეფექტურია, როგორც ქსელის ოპერირების, ასევე, მისი დაგეგმარებისა და განვითარების ეტაპებზე, როდესაც ჯერ კიდევ არ არსებობს რეალური მონაცემები, ან საჭიროა სხვადასხვა სცენარის გავლენის შეფასება სისტემაზე. სიმულაცია იძლევა შესაძლებლობას წინასწარ გავარკვიოთ თუ როგორ იმოქმედებს კონკრეტული არაწრფივი დატვირთვა, ინვერტორული ინტერფეისი ან ასიმეტრიული მოვლენები ქსელის სტაბილურობაზე და ენერგიის ხარისხის პარამეტრებზე.

თუმცა იმისათვის, რომ აღნიშნულ მეთოდს რეალური სარგებლობა ჰქონდეს, აუცილებელია სისტემის ელემენტების სწორად მოდელირება. თითოეული კომპონენტი უნდა იყოს წარმოდგენილი თავისი ელექტრული, დინამიკური და სიხშირეზე დამოკიდებული მახასიათებლებით. მაღალი სიზუსტის გარეშე მოდელი ვერ ასახავს იმ საფრთხეებს, რაც რეალურ პირობებში შეიძლება წარმოიშვას. უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ჰარმონიკების, ძაბვის სწრაფი ვარიაციებისა და ფაზური ასიმეტრიების ზეგავლენა სხვადასხვანაირად ვლინდება სხვადასხვა სიხშირის დიაპაზონში, ამიტომ სისტემის ელემენტთა მოდელებში აუცილებელია ამ დამოკიდებულების ინტეგრირება. არასწორად მოდელირებული სისტემა იძლევა მცდარ პროგნოზებს და იწვევს არასრულფასოვან ტექნიკურ ან ფინანსურ გადაწყვეტილებებს.

სტატიაში განხილულია მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზის განაწილებულპარამეტრებიანი მოდელის დეტალიზაციის ხარისხის გავლენა მის სიხშირულ მახასიათებლებზე, რაც წარმოადგენს მნიშვნელოვან საკითხს ელექტრული სისტემების სიმულაციის სიზუსტისა და სანდოობის უზრუნველსაყოფად მაღალსიხშირული პროცესების ანალიზისას. ხაზის მოდელის დეტალიზაციის სიღრმე პირდაპირ ახდენს გავლენას მოდელის

შესაძლებლობაზე ზუსტად ასახოს სხვადასხვა სიხშირული კომპონენტები, განსაკუთრებით ჰარმონიკული მდგენელები და მაბვის/დენის ზესწრაფი იმპულსები.

მოდელის გრანულარიზაციის მაღალი ხარისხი, ანუ ხაზის უფრო მცირე და მრავლად დაყოფილი სექციებით მოდელირება, საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად ახლოს მივიდეთ რეალურ ფიზიკურ ქცევასთან, განსაკუთრებით იმ პირობებში, როდესაც სისტემა ფუნქციონირებს არაწრფივი დატვირთვებისა და ინვერტორული გენერატორების დინამიკურად ცვალებად რეჟიმებში. ასეთი მიდგომით, უფრო ზუსტად აღიბეჭდება სიხშირული მახასიათებლები, როგორიცაა რეზონანსები, ჩახშობის ეფექტები და სიხშირეზე დამოკიდებული დანაკარგები. ამავდროულად, არსებობს კომპრომისი გამოთვლით რესურსებსა და სიზუსტეს შორის — ძალიან მაღალი გრანულარიზაცია ზრდის გამოთვლის დროსა და მოდელირების სირთულეს. შესაბამისად, კვლევის ერთ-ერთი მიზანი გრანულარიზაციის ოპტიმალური დონის იდენტიფიცირებაა, რაც თავის მხრივ არ არის ფიქსირებული პარამეტრი და მკვეთრად არის დამოკიდებული დასმული ამოცანის მიზნებზე და მოდელირებულ სცენარების ტექნიკურ მახასიათებლებზე. ზოგადად, ასეთი ტიპის ოპტიმიზაციაში მოიაზრება დეტალიზაციის ისეთი დონის განსაზღვრა, რომელიც ერთი მხრივ უზრუნველყოფს კონკრეტული ამოცანისთვის დამაკმაყოფილებელ სიზუსტეს, ხოლო, მეორე მხრივ, მოდელირებისა და სიმულაციის პროცესის ეფექტურ წარმართვას.

საძიებო სიტყვები: ჰარმონიკული ანალიზი, ხაზის განაწილებულპარამეტრებიანი მოდელები, რეზონანსი, ელექტრული სისტემა, სიხშირული სკანირება, ჰარმონიკული ნაკადგანაწილება.

შესავალი

თანამედროვე ელექტროენერგეტიკული სისტემების განვითარებასთან ერთად ელექტრული ენერგიის ხარისხის ანალიზი განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს. მაღალი ხარისხის ელექტროენერგია აუცილებელია ელექტრული მოწყობილობების, ავტომატიზებული სისტემებისა და ინფორმაციული ტექნოლოგიების უწყვეტი და ეფექტური ფუნქციონირებისთვის. ელექტრული ენერგიის ხარისხის გაუარესებამ, როგორიცაა მაბვის ცვალებადობა, ჰარმონიკული სპექტრების წარმოქმნა ან ფაზების ასიმეტრია, შეიძლება გამოიწვიოს საწარმოო პროცესების დარღვევა, მოწყობილობების დაზიანება, მონაცემთა დაკარგვა და ადამიანის ჯანმრთელობის გაუარესებაც კი. ენერგიის დაბალი ხარისხი ხშირად დიდ ეკონომიკურ ზარალთან არის დაკავშირებული.

ელექტრული ენერგიის ხარისხს განსაკუთრებით დიდი ყურადღება ექცევა განვითარებულ ქვეყნებში, სადაც სტაბილური და სანდო ენერგომომარაგება ეკონომიკური განვითარების ერთ-ერთ საფუძვლად მიიჩნევა. ეს ტენდენცია არ არის შემოფარგლული მხოლოდ ტექნოლოგიურად მოწინავე რეგიონებით. მსგავსი მიდგომა აქტიურად ვრცელდება სამხრეთ-აღმოსავლეთ ევროპის ქვეყნებშიც [1]. ამ რეგიონში გაიზარდა ინტერესი ენერგიის ხარისხის ანალიზისა და მონიტორინგის მიმართ, რაც აისახება არაერთი სპეციალიზებული კვლევითი ჯგუფისა და ინიციატივის შექმნით, რომელთა მიზანია თანამედროვე მეთოდებისა და

ინსტრუმენტების გამოყენებით პრობლემების იდენტიფიკაცია და მათი გადაჭრა. ამგვარ ჯგუფებს მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვთ ენერგეტიკული სისტემების გაუმჯობესებაში, ხელს უწყობენ რეგიონულ ენერგეტიკულ ინტეგრაციას და საერთო სტანდარტების ჩამოყალიბებას.

ელექტრული ენერგიის ხარისხი ანალიზი საშუალებას იძლევა, დროულად იქნეს აღმოჩენილი და აღმოფხვრილი მოწყობილობებისა და სისტემების გაუმართაობები, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს ენერგიის დანაკარგებს, ავარიების ალბათობას და აუმჯობესებს ელექტრული სისტემის ეფექტურ მუშაობას. ამასთან, ანალიზი ხელს უწყობს ენერგიის მიწოდების სტაბილურობის შენარჩუნებას, ენერგიის ოპტიმალურ გამოყენებასა და გარემოზე ზემოქმედების შემცირებას. შედეგად, ენერგიის ხარისხის მონიტორინგი და ანალიზი კრიტიკულ როლს თამაშობს ელექტროენერგეტიკული ინფრასტრუქტურის ოპერირებისა და მდგრადი განვითარების პროცესში.

ელექტრული ენერგიის ხარისხის ანალიზის ერთ-ერთი ეფექტური მეთოდია სცენარების მოდელირება და სიმულაცია, რაც გვაძლევს საშუალებას მოდელირებული გარემოს დახმარებით მოხდეს შესაძლო დარღვევების პროგნოზირება და მათი შედეგების შეფასება. თუმცა, ანალიზის სიზუსტე დიდად არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რამდენად რეალისტურად და ფიზიკურად სწორად არის აგებული მოდელი. სწორედ ამიტომ, აუცილებელია, რომ მოდელები ასახავდნენ სისტემის რეალურ თვისებებსა და დინამიკას. სისტემის კომპონენტების რეალური ფიზიკური პარამეტრების მაღალი სიზუსტით გათვალისწინება, აუცილებელია მათში მიმდინარე პროცესების სიღრმისეულად და ზუსტად გასაანალიზებლად.

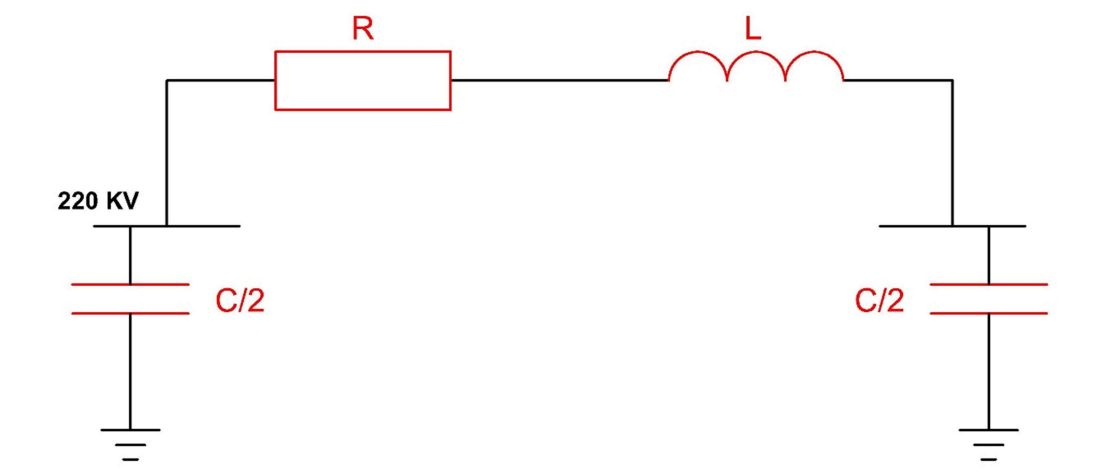
ამ კონტექსტში, განსაკუთრებით აღსანიშნავია ელექტროგადამცემი ხაზის მოდელირების სპეციფიკა. იმისათვის, რომ სწორად აისახოს გადამცემი ხაზის ფიზიკური ქცევა მაღალსიხშირულ მდგენელებთან მიმართებაში, აუცილებელია მისი განაწილებულპარამეტრებიანი მოდელით წარმოდგენა [2]. ასეთი მოდელი ითვალისწინებს ხაზის პარამეტრების სივრცულ განაწილებას და საშუალებას იძლევა სწორად იქნას ასახული მაღალსიხშირული პროცესებით გამოწვეული ეფექტები. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გრძელი ხაზებისთვის, სადაც კონცენტრირებული პარამეტრებით გამარტივებული მიდგომები არ იძლევა საკმარის სიზუსტეს. შესაბამისად, განაწილებულპარამეტრებიანი მოდელი წარმოადგენს აუცილებელ საფუძველს იმ რეალური ფიზიკური პროცესების ასახვისთვის, რომელთა ანალიზიც ენერგიის ხარისხის სრულყოფილი მართვისთვის კრიტიკულად მნიშვნელოვანია.

მოდელირებისა და სიმულაციის შედეგები

ელექტროგადამცემი ხაზის უმარტივესი მოდელი, რომელიც ყველაზე ხშირად გამოიყენება გამარტივებულ ანგარიშებში, ნახაზ 1-ზეა ნაჩვენები. მოდელის მთავარი უპირატესობა მისი სიმარტივეა, რაც საბოლოო ჯამში უზრუნველყოფს მინიმალურ მოთხოვნას გამოთვლით რესურსებზე. ამგვარი სიმარტივე განსაკუთრებით გამოსადეგია სიმძლავრის ნაკადგანაწილების სიმულაციებში, სადაც გათვლების ძირითადი მიზანი სისტემის

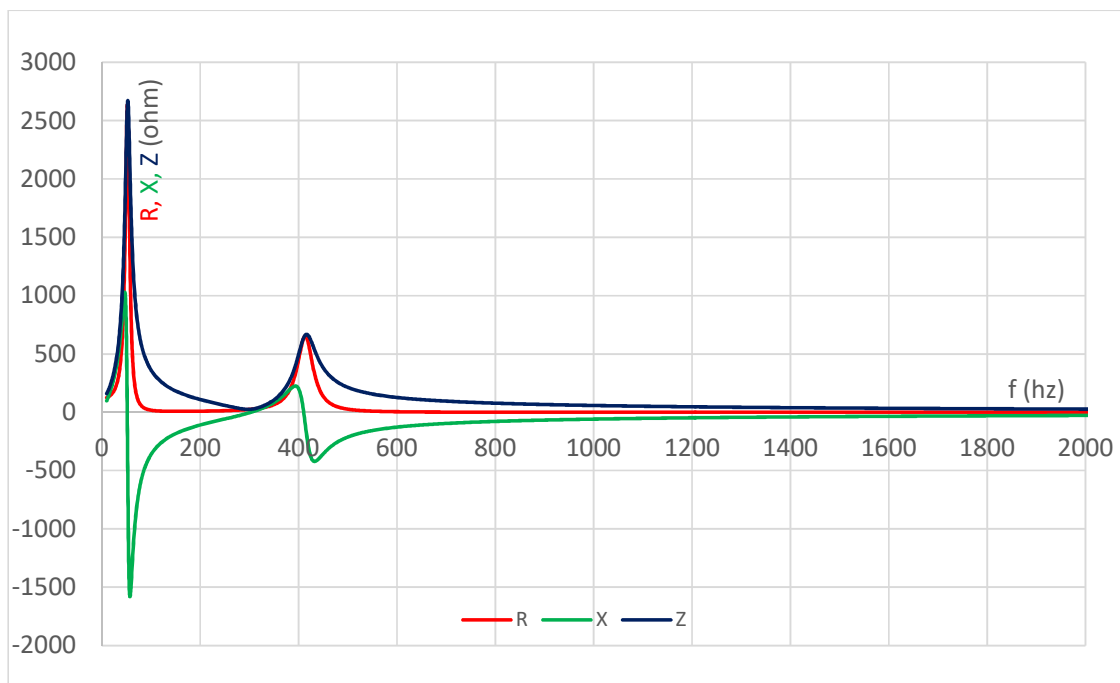
დამყარებული რეჟიმების შეფასება [2]. ასეთ ანგარიშში ვიგებთ თუ როგორ ნაწილდება სიმძლავრე გენერატორებსა და დატვირთვებს შორის, როგორია ძაბვები კვანძებში, როგორია ხაზებში გამავალი დენები, ძაბვისა და სიმძლავრის დანაკარგები და სხვა [3]. ასეთ დროს ნაკლებია მოთხოვნა დროში ცვალებად, დინამიკურ კომპონენტებზე, ამიტომაც მარტივი მოდელი იძლევა საკმარისად ზუსტ და სწრაფ შედეგებს.

ხაზის უმარტივესი მოდელის სიხშირული სკანირებით მიღებული სიხშირული მახასიათებელი ნახაზ 2-ზეა ნაჩვენები. როგორც ამ მახასიათებელიდან ჩანს, ამ კონკრეტულ ხაზს სიხშირულ დერძზე გააჩნია ორი რეზონანსული წერტილი, ერთი 60 ჰერცის, ხოლო მეორე, 415 ჰერცის მახლობლად.



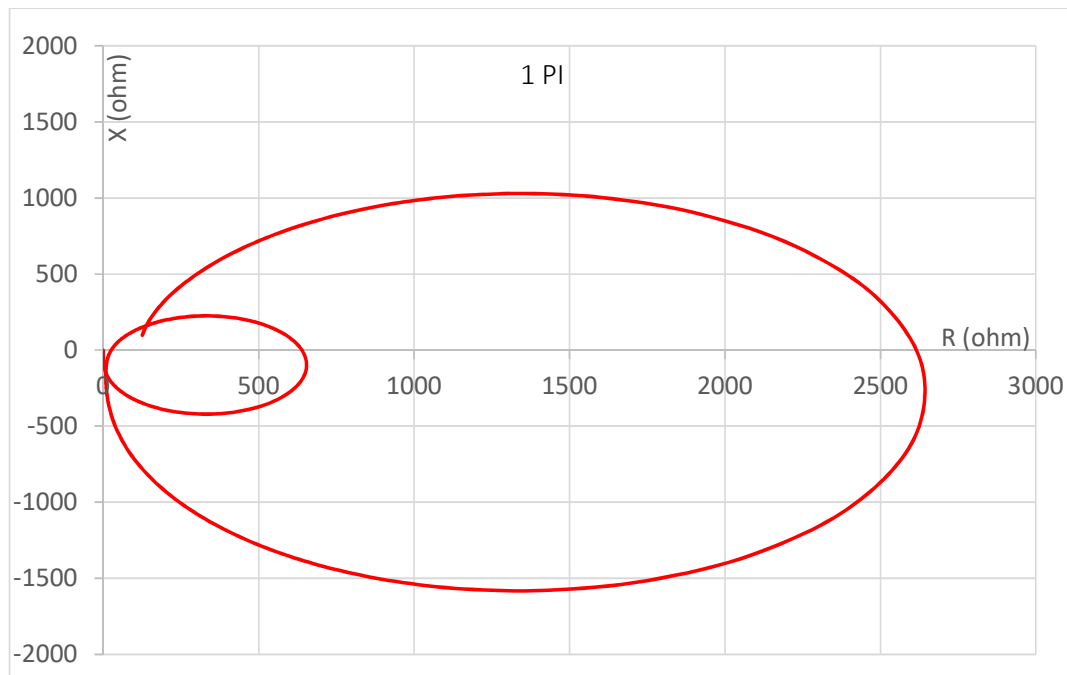
ნახაზი 1 - ელექტროგადამცემი ხაზის უმარტივესი მოდელი

სიხშირულ მახასიათებლებზე გამოყვანილია აქტიური, რეაქტიული და სრული წინაღობები.



ნახაზი 2 - ხაზის უმარტივესი მოდელის სიხშირული მახასიათებელი

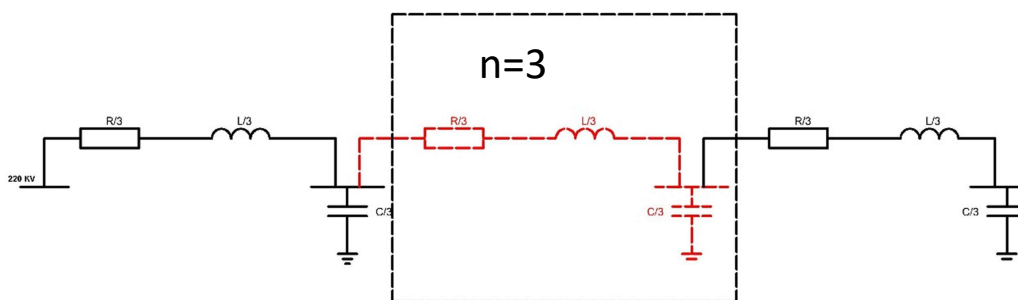
ნახაზ 3 -ზე ნაჩვენებია ელექტროგადამცემი ხაზის უმარტივესი მოდელის R-X დამოკიდებულება.



ნახაზი 3 - ხაზის უმარტივესი მოდელის R-X დამოკიდებულება

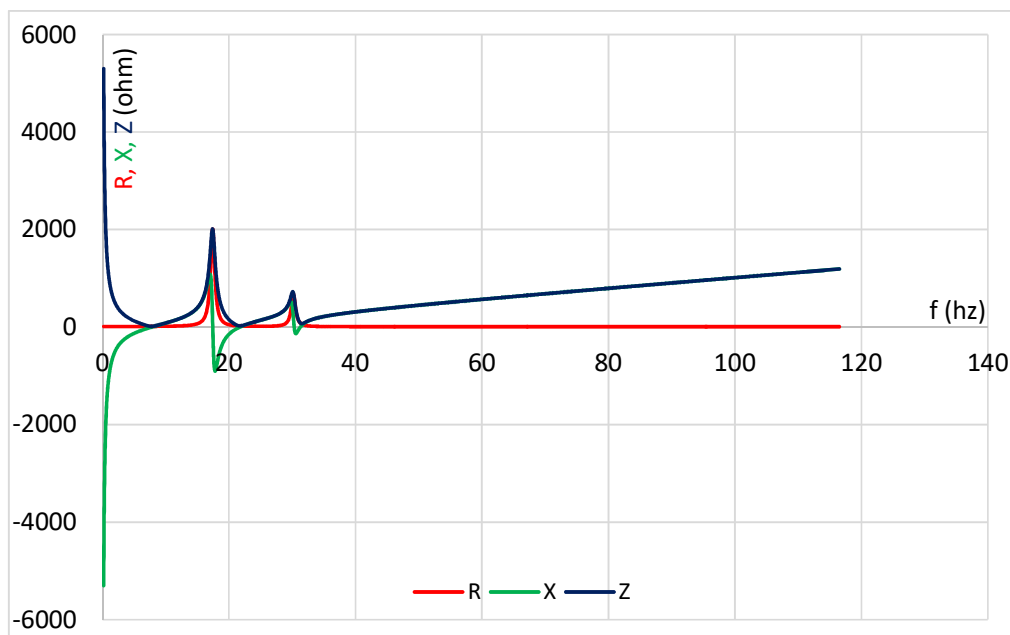
ნახაზ 3 - დან შესაძლებელია დავადგინოთ თუ აქტიური და რეაქტიული წინაღობების რა კომბინაციები გვხვდება სკანირების სრული სიხშირული დიაპაზონის გასწვრივ. ადვილი შესაძენეია, რომ რგოლების რაოდენობა ემთხვევა რეზონანსული კონტურების რაოდენობას.

ნახაზ 4 - ზე წარმოდგენილია 3 სეგმენტური ხაზის მოდელი, რომლის სიხშირული და წინააღობების მახასიათებლები ნახაზ 5-ზე და ნახაზ 6 - ზეა ნაჩვენები შესაბამისად.



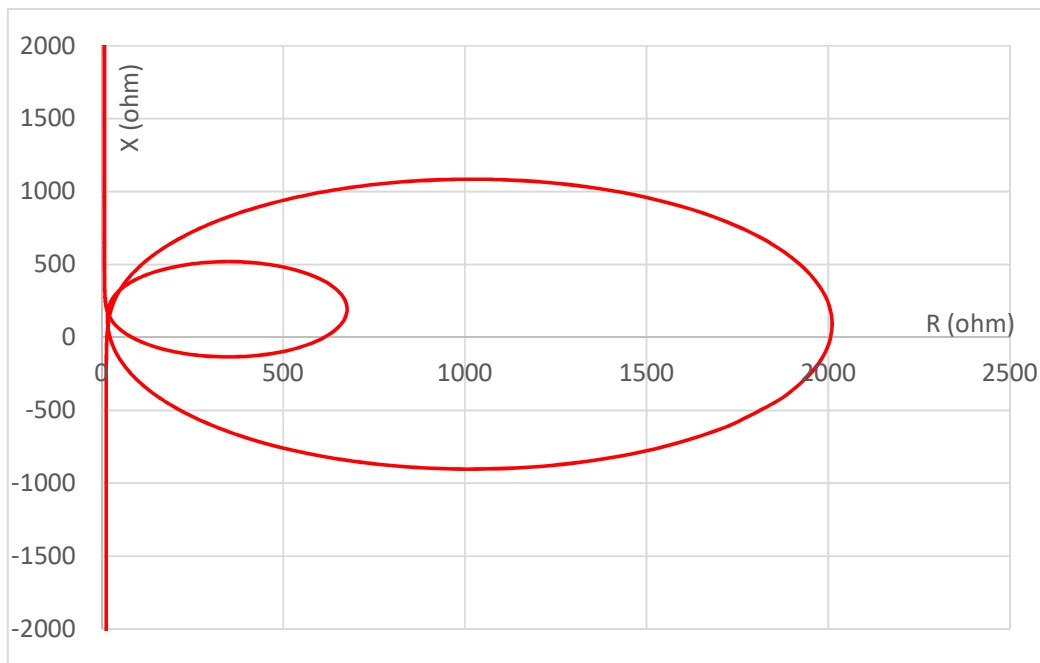
ნახაზი 4 - ელექტროგადამცემი ხაზის სამსეგმენტური მოდელი

ამ დიაგრამების ანალიზით შესაძლოა დავასკვნათ, რომ უმარტივეს მოდელსა და სამსეგმენტურ მოდელს შორის უმნიშვნელო სხვაობაა რეზონანსული კონტურების რაოდენობის კუთხით, მაგრამ საკმაოდ დიდი სხვაობაა თავად რეზონანსული კონტურების საკუთარი სიხშირეების თვალსაზრისით. ამ კონკრეტულ შემთხვევაში, სიხშირულ მახასიათებელზე თავს იჩენს რეზონანსები 17 ჰერცის მახლობლად და 32 ჰერცის მახლობლად.



ნახაზი 5 - ხაზის სამსეგმენტოანი მოდელის სიხშირული მახასიათებელი

დაბალ სიხშირეებზე შეიმჩნევა რეაქტიული და სრული წინაღობების მაღალი სიდიდეები რაც აიხსნება შემდეგნაირად. რეაქტიული წინაღობის უარყოფითი ნიშანი გამოწვეულია ამ სიხშირეებზე მისი ტევადური ბუნებით. სრული წინაღობა კი, მისი გამოსახულებიდან გამომდინარე ტევადური რეაქტიულის პროპორციულია (რადგან ინდუქციური მდგენელი უმნიშვნელოა) და ნიშნით განსხვავდება მისგან. რაც შეეხება დიაპაზონს, რომელიც იწყება დაახლოებით 40 ჰერციდან, აქ რეაქტიული და სრული წინაღობები პრაქტიკულად თანხვდება ერთმანეთს. ამ ფენომენის ახნა შემდეგნაირად არის შესაძლებელი. როგორც ჩანს ეკვივალენტური წრედის აქტიური წინაღობა საკმაოდ მცირეა (ამის დამტკიცება მარტივია, კომლექსურ რიცხვებზე მათემატიკური ოპერაციების ჩატარებით). ამასთან მაღალ სიხშირეებზე თავს იჩენს წრედის ინდუქციური რეაქტიული წინაღობა, რადგან იგი სიხშირის პირდაპირპროპორციულია. მეორე მხრივ, ტევადური კომპონენტი მიიღევა და პრაქტიკულად ქრება ამ დიაპაზონში. შესაბამისად, სქემის სრული წინაღობა ძირითადად განპირობებულია ინდუქციური რეაქტიული მდგენელით და სწორედ ამიტომ იმეორებს მის მახასიათებელს.

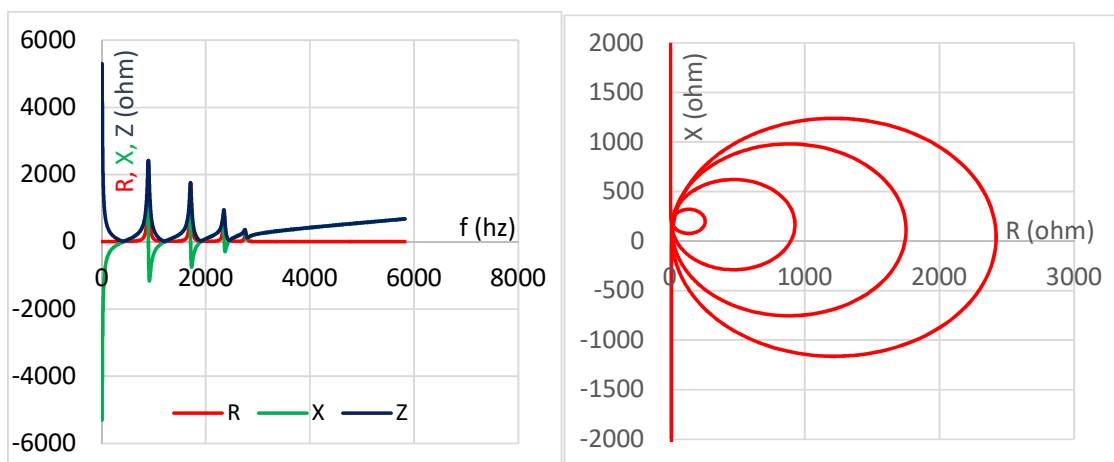


ნახაზი 6 - ხაზის სამსეგმენტოანი მოდელის R - X დამოკიდებულება

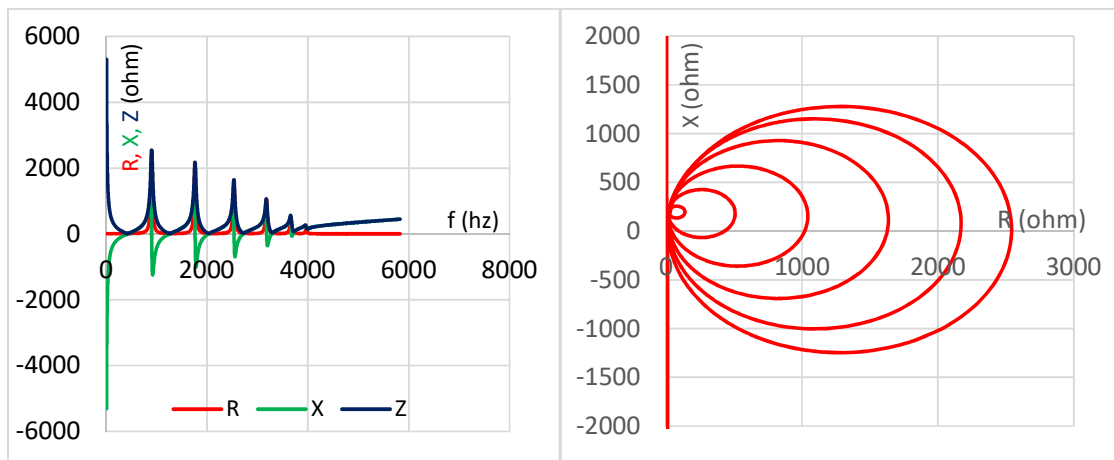
ზემოთ აღწერილი პრინციპით დავამოდელორეთ ხუთ, შვიდ და ცხრასეგმენტოანი ვარიანტები რომელთა სიმულაციის შედეგებიც ნაჩვენებია ნახაზ 7 - ზე, ნახაზ 8-ზე და ნახაზ 9-ზე შესაბამისად.

თითოეული ამ ნახაზთაგანი შედგება წყვილი დიაგრამისგან, რომელთაგან მარცხენა არის სიხშირული მახასიათებელი, ხოლო მარჯვენა აქტიური და რეაქტიული წინაღობების დამოკიდებულება, რაზეც ზემოთაც გვქონდა საუბარი.

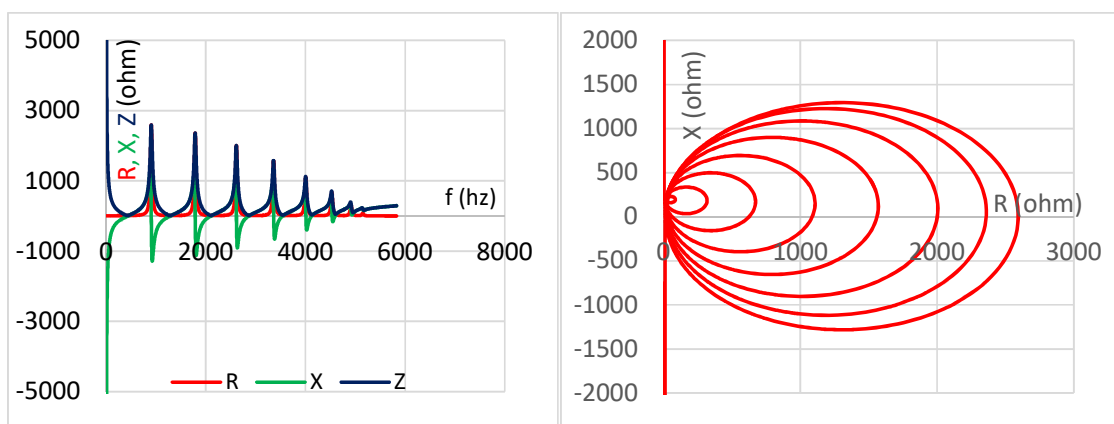
შედეგებზე დაკვირვება და ანალიზი გვამძღვრს საფუძველს დავასკვნათ, რომ სეგმენტების გრანულარიზაციის ხარისხი პირდაპირ აისახება რეზონანსული კონტურების რაოდენობაზე.



ნახაზი 7 - ხაზის ხუთსეგმენტოანი მოდელის სიხშირული მახასიათებელი



ნახაზი 8 - ხაზის შვიდსეგმენტიანი მოდელის სიხშირული მახასიათებელი და RX დამოკიდებულება



ნახაზი 9 - ხაზის ცხრასეგმენტიანი მოდელის სიხშირული მახასიათებელი და RX დამოკიდებულება

ამას თავისი ფიზიკური ახსნაც აქვს: რაც უფრო მეტი დამოუკიდებელი ინდუქციური

და ტევადური ელემენტი ჩნდება წრედში, მით უფრო იზრდება ალბათობა შემთხვევით აღებულ რეაქტიული ბუნების მქონე ელემენტთა წყვილებში რეზონანსული მოვლენის გაჩენისა.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა ზემოთ განხილული შემთხვევა მოდელირებულია ხაზის უქმ სვლაზე მუშაობისას. აქტიური დატვირთვის გაჩენა როგორც სკანირების წერტილში, ასევე, ხაზის ბოლოში, რადიკალურად ცვლის შედეგებს. კერძოდ დატვირთვის ჩართვა სქემის ბოლოში იწვევს ტევადური კომპონენტის დომინაციის შესუსტებას რაც მადემპფერირებელ ეფექტს ქმნის კონკრეტული სიხშირული დიაპაზონებისთვის.

დასკვნა

სიხშირულ დომეინში მოდელირებამ და სიმულაციამ აჩვენა, რომ რეზონანსული კონტურები, როგორც სიხშირით ისე წინაღობების ამპლიტუდებით მკვეთრად იცვლება ჩანაცვლების სქემის გრანულირების ცვლილებასთან ერთად. ეს ნიშნავს, რომ ჩანაცვლების სქემის

არასაკმარისად დეტალიზაციამ შესაძლოა გამოიწვიოს რეზონანსული კონტურების საკუთარი სიხშირეების მცდარი სიდიდეების იდენტიფიცირება. შესაბამისად ასეთ სქემაზე ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების გაშვებისას შესაძლოა ვიხილოთ სიხშირული კომპონენტები გაძლიერებული ამპლიტუდებით, რომლებიც არ შეესაბამება რეალობას და პირიქით, სიხშირული კომპონენტები ნორმალური ამპლიტუდებით, რომლებიც რეალობაში ძლიერდება ქსელის მაღალსიხშირული მარეზონირებელი ეფექტების გამო.

ასეთ შემთხვევაში, მოდელირების არასაკმარისი პრეციზიის დროს, ასევე ჩნდება რისკი ცვლადი ძაბვის ფილტრების არაეფექტური შერჩევისა. კერძოდ, ფაქტიური მნიშვნელობებიდან გადახრილ სიხშირეებზე ფილტრების გათვლა მკვეთრად ამცირებს მათ ეფექტურობას. ამასთან ინვერტორული ინტერფეისის მქონე განახლებადი რესურსების და არაწრფივი დატვირთვების სპექტრების შესწავლისას ჩნდება რისკი, რომ ჰარმონიკული მდგენელების გაძლიერების კოეფიციენტები არასათანადოდ იქნება შეფასებული. სწორედ ამიტომ, აუცილებელია ქსელთან მიერთების წერტილებში მისაერთებელი ობიექტის მოცემული ჰარმონიკული სპექტრების გათვალისწინებით მოხდეს ჩანაცვლების სქემის შესაბამისი გრანულირება/დეტალიზაცია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ობიექტებისთვის, რომლებიც გენერირებენ ჰარმონიკულ სპექტრებს შედარებით დაბალ და საშუალო სიხშირულ დიაპაზონებში, საკმარისია მათი მოდელების წარმოდგენა რამდენიმე ერთეული სეგმენტური ელემენტის სახით.

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.

The Impact of the Level of Detail in the Distributed Parameter Model of a Transmission Line on Its Frequency Characteristics

Abstract

One of the most widely used methods for assessing electric power quality is based on modeling and simulation of electrical system operating modes, which enables a detailed analysis of system behavior without interfering with real-world operation. This approach is effective both during the operational phase of the grid and in its planning and development stages—especially when real measurement data is unavailable, or when it is necessary to evaluate the impact of different scenarios on the system. Simulation makes it possible to predict how specific nonlinear loads, inverter-based interfaces, or asymmetric events will affect grid stability and power quality parameters.

However, for this method to yield meaningful and reliable results, it is essential to accurately model the system components. Each element must be represented with its electrical, dynamic, and frequency-dependent characteristics. Without high precision, the model fails to reflect the risks and behaviors that may arise under real-world conditions. It is particularly important to consider that the influence of harmonics, rapid voltage variations, and phase asymmetries manifests differently across various frequency ranges; thus, these dependencies must be integrated into the component models. An inadequately modeled system results in inaccurate predictions and leads to suboptimal technical or financial decisions.

This paper examines the impact of the level of detail in distributed-parameter modeling of high-voltage transmission lines on their frequency characteristics, which is a critical issue for ensuring accuracy and reliability in simulations of high-frequency phenomena. The depth of model granularity directly affects the model's ability to accurately reflect frequency-domain components, especially harmonic contents and fast transient voltage/current impulses.

A high degree of model granularity, which means modeling the transmission line using smaller and more numerous segments, allows the simulation to more accurately reflect real physical behavior. This is especially important in dynamic conditions involving nonlinear loads and inverter-based generation. Such detailed modeling captures frequency-dependent characteristics more precisely, including resonances, damping effects, and frequency-related losses. However, increased granularity also leads to higher computational demands and longer simulation times. As a result, one of the main objectives of this study is to determine the optimal level of model granularity. This level is not fixed and depends significantly on the purpose of the analysis and the technical characteristics of the simulated scenarios. In general, this type of optimization seeks to define a level of detail that provides sufficient accuracy for the specific task while maintaining an efficient simulation process.

Keywords: Harmonic Analysis, Distributed Parameter Line Models, Resonance, Power System, Frequency Scanning, Harmonic load flow.