



მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზების „PI“ ტიპის და „T“ ტიპის მოდელების ქცევის შესწავლა ჰარმონიკულ ნაკადგანაწილებაში

გიორგი არზიანი, ზაია ქვათაძე, ლუკა ბარამიძე

რეზიუმე

ელექტრულ სისტემებში ძალოვანი ელექტრონული ინტერფეისების მქონე მოწყობილობების რიცხვის ინტენსიურმა მატებასთან ერთად სულ უფრო დიდ მნიშვნელობას იძენს მაღალი ძაბვის ქსელში ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების სიღრმისეული შესწავლა. კლასიკური ნაკადგანაწილებისაგან განსხვავებით, ჰარმონიკულ ნაკადგანაწილებაში მონაწილეობს სხვადასხვა სიხშირის დენებისა და ძაბვების მთელი სპექტრი, რის გამოც დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ელექტრული სისტემის ელემენტების ჩანაცვლების სქემებისა და მოდელების სწორად შერჩევას. ფუნდამენტური სიხშირის დენებისა და ძაბვებისთვის დამყარებული რეჟიმების კალკულაციისას, გამარტივებული მოდელებით შესაძლებელია საკმაოდ მაღალი სიზუსტის მიღწევა. თუმცა, ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების შემთხვევაში სიტუაცია ბევრად უფრო რთულია. ამის მიზეზი კი, ქსელის ტოპოლოგიური ელემენტების რეაქტიული კომპონენტების მაღალი მგრძობიარობაა სიხშირის მიმართ.

კლასიკურ ნაკადგანაწილებაში მაღალი ძაბვის ხაზების გამარტივებული, ეგრედწოდებული შეყურსულპარამეტრებიანი მოდელების გამოყენება დასაშვებია, რადგან ხაზის თავსა და ბოლოში მიიღება ელექტრული რეჟიმის ძირითადი პარამეტრების საკმაოდ მაღალი სიზუსტე, ხაზის გასწვრივ მიმდინარე პროცესები კი დამყარებული რეჟიმის ძირითადი ამოცანა არ არის. მიუხედავად იმისა, რომ პრაქტიკულად ყველა თანამედროვე პროგრამული უზრუნველყოფა (რომელსაც გააჩნია ჰარმონიკული დომენი) გამარტივებულ მოდელებზე ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარების საშუალებას იძლევა, დიდი ყურადღება უნდა დაეთმოს მოდელების ვალიდაციას. ამ დროს, შესაძლებელია მივიღოთ შედეგები, რომელიც არა თუ დაბალი სიზუსტის, არამედ საერთოდ აცდენილია რეალობას და ამის შედეგად, გაიზარდოს შეცდომების დაშვების რისკი, როგორც ჰარმონიკული ფილტრების შერევისას, ასევე ჰარმონიკული მდგენელების ჩასახშობად სხვადასხვა ღონისძიების გატარებისას.

სტატიაში განხილულია მაღალი ძაბვის ხაზების ორი მათემატიკური მოდელის, კერძოდ კი „PI“ ტიპის და „T“ ტიპის მოდელების ქცევა მაღალსიხშირულ, ჰარმონიკულ

ნაკადგანაწილებაში. სიტუაციის ანალიზი ჩატარებულია მცირე მასშტაბის მაღალი ძაბვის სისტემის მაგალითზე, რომელიც შეიცავს 500 და 200 კვ ძაბვის კვანძებს. ჰარმონიკული დენების წყაროდ გამოყენებულია სტატიკური გენერატორი, რომელიც მიერთების წერტილში ძაბვის რეგულირების ფუნქციასაც ითავსებს. ქსელის სიხშირული მახასიათებლები გადაღებულია ორი კერძო შემთხვევისთვის. პირველ შემთხვევაში მაღალი ძაბვის მთლიანი ქსელი მოდელირებულია კლასიკური, შეყურსულპარამეტრებიანი ჩანაცვლების სქემით - „PI“ ტიპის მოდელით, ხოლო მეორე შემთხვევაში, მის ნაცვლად გამოყენებულია განაწილებულპარამეტრებიანი „T“ ტიპის მოდელი. ქსელში არსებული დანარჩენი ელემენტების მოდელები სცენარების მიხედვით არ იცვლება. ორივე შემთხვევისთვის მოდელირებულ იდენტური სცენარებში ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების შედეგები შედარებულია ერთმანეთთან, შემოთავაზებულია გაკეთებულია შესაბამისი რეკომენდაცია ჰარმონიკულ ნაკადგანაწილებაში ვალიდური მოდელების გამოყენების შესახებ.

საძიებო სიტყვები: ჰარმონიკები, ელექტრული სისტემა, მოდელირება, სიმულაცია, სიხშირული სკანირება, ჰარმონიკული ნაკადგანაწილება.

შესავალი

თანამედროვე ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში ყოველწლიურად იზრდება ძალოვანი ელექტრონული ინტერფეისის ბაზაზე აგებული ელექტრული სისტემების რიცხვი. ასეთი სისტემები გამოიყენება, როგორც ელექტრული ენერჯის გენერაციისა და მოხმარების ობიექტებზე, ასევე, უშუალოდ, დაბალი, საშუალო და მაღალი ძაბვის ხაზებსა და ქვესადგურებში. გენერაციის ობიექტების შემთხვევაში, ძალოვანი ელექტრონიკა ძირითადად გვხვდება ქარისა და მზის ელექტრულ სადგურებზე. დატვირთვის ობიექტებზე ძალოვანი ელექტრონიკას წამყვანი როლი აქვს პრაქტიკულად ყველგან, სადაც ადგილი აქვს ცვლადი ძაბვის გარდაქმნას, ძრავების ელექტრონულ გაშვებასა და მართვას, სხვადასხვა სახის საწარმოო ციკლების მართვას, ნედლეულის გადამამუშავებას, და სხვა. მაღალი ძაბვის გადამცემ და სადისტრიბუციო ქსელებში, ძალოვანი ელექტრონიკა ძირითად ელექტრული რეჟიმების ოპტიმიზაციის, საიმედოობისა და დინამიკური მდგრადობის ამალგების მიზნით გამოიყენება. მიუხედავად იმისა, რომ ძალოვანი ელექტრონული ინტერფეისების როლი სხვადასხვა ობიექტზე შეიძლება განსხვავებული იყოს, ყველა აღნიშნულ შემთხვევაში მის მიერ შექმნილ მთელ რიგ სიკეთებთან ერთად, ვაწყდებით გარკვეული ხასიათის პრობლემებსაც. ელექტრული სისტემის ოპერირების პერსპექტივიდან, ამ პრობლემათაგან ყველაზე კრიტიკული ელექტრული ენერჯის ხარისხია. ელექტრული ენერჯის ხარისხის პრობლემის მოგვარება არ არის ერთჯერადი ხასიათის, რამდენადაც მას საკმაოდ კომპლექსური ბუნება აქვს და მუდმივ მონიტორინგს და ანალიზს საჭიროებს. აქაც, შესაძლებელია გამოიყოს რამდენიმე ძირითადი კომპონენტი, თუმცა ამ სტატიის მიზანია ფოკუსირდეს ხარისხის განმსაზღვრელ ერთ-ერთ კონკრეტულ კომპონენტზე, რომელიც ელექტრული დენისა და ძაბვის ჰარმონიკული დამახინჯების სახელით არის ცნობილი.

მოდელირებული ქსელის აღწერა და ძირითადი დაშვებები

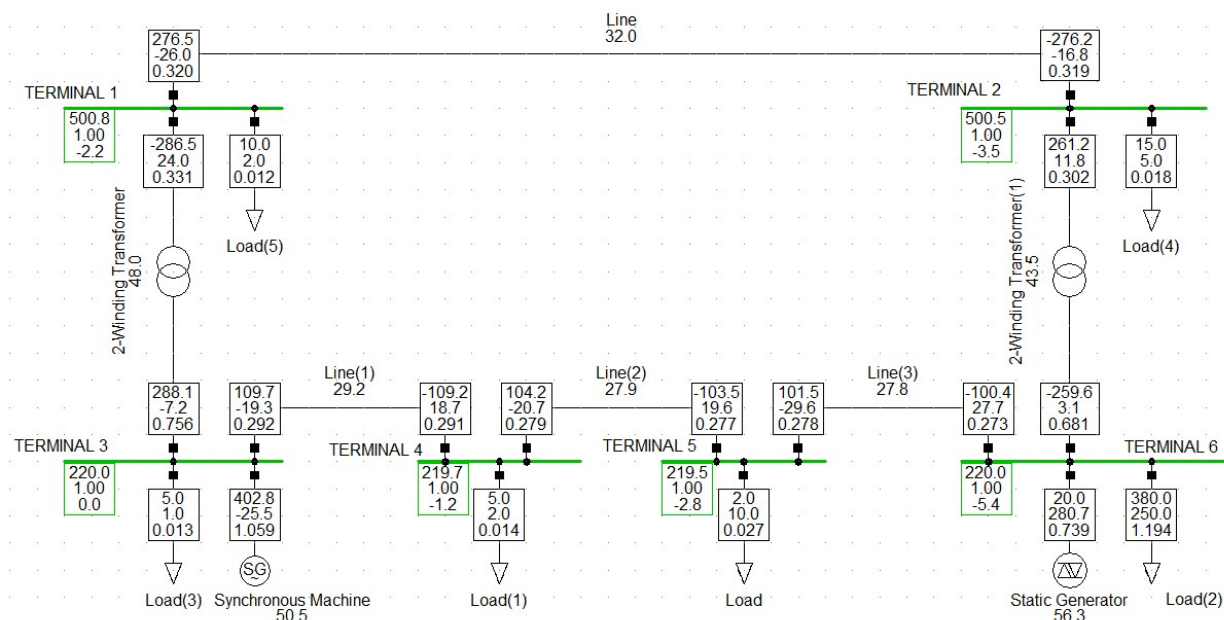
ჰარმონიკული დენებისა და ძაბვების ქსელზე გავლენის შესასწავლად ვიყენებთ ქსელის ჰარმონიკული ანალიზის მეთოდს. ეს მეთოდი სიმძლავრის კლასიკური ნაკადგანაწილებისაგან განსხვავდება იმით, რომ ნაცვლად ფუნდამენტური სიხშირის დენებისა და ძაბვებისა, ვიკვლევთ თუ როგორ ნაწილდება ქსელში სხვადასხვა სიხშირის მქონე ჰარმონიკული კომპონენტები, რომელთა რიგებშიც გვხვდება როგორც ჯერადი რიგის ჰარმონიკები, ასევე არაჯერადი (ინტერჰარმონიკები) და მაღალი სიხშირის ჰარმონიკები (სუპრაჰარმონიკები).

ქსელში წარმოქმნილი დენისა და ძაბვის თითოეული რიგის ჰარმონიკა ხასიათდება როგორც ამპლიტუდით ასევე ფაზით. ეს პარამეტრები მნიშვნელოვან ცვლილებას განიცდიან ჰარმონიკების ქსელში გავრცელებისას. კერძოდ, გამომდინარე ქსელის სპექტრული წინაღობების მახასიათებლებიდან, ზოგიერთი ჰარმონიკის ამპლიტუდა შესაძლებელია გაიზარდოს, ხოლო ზოგიერთის — შემცირდეს. იგივე ლოგიკა მოქმედებს თითოეული ჰარმონიკის ფაზაზეც. შესაბამისად, ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება ქვესადგურიდან ქვესადგურამდე შესაძლებელია იცვლებოდეს და არ ექვემდებარებოდეს ელექტრული სიშორის ლოგიკას, რასაც ვიყენებთ ფუნდამენტური სიხშირის პარამეტრების კლასიკური ანალიზისთვის.

ამასთან, მაღალი ძაბვის ქსელის სიხშირული მახასიათებლები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ქსელის ტოპოლოგიურ სურათზე და მიერთებული ელემენტების აქტიურ, ინდუქციურ და ტევადურ კომპონენტებზე.

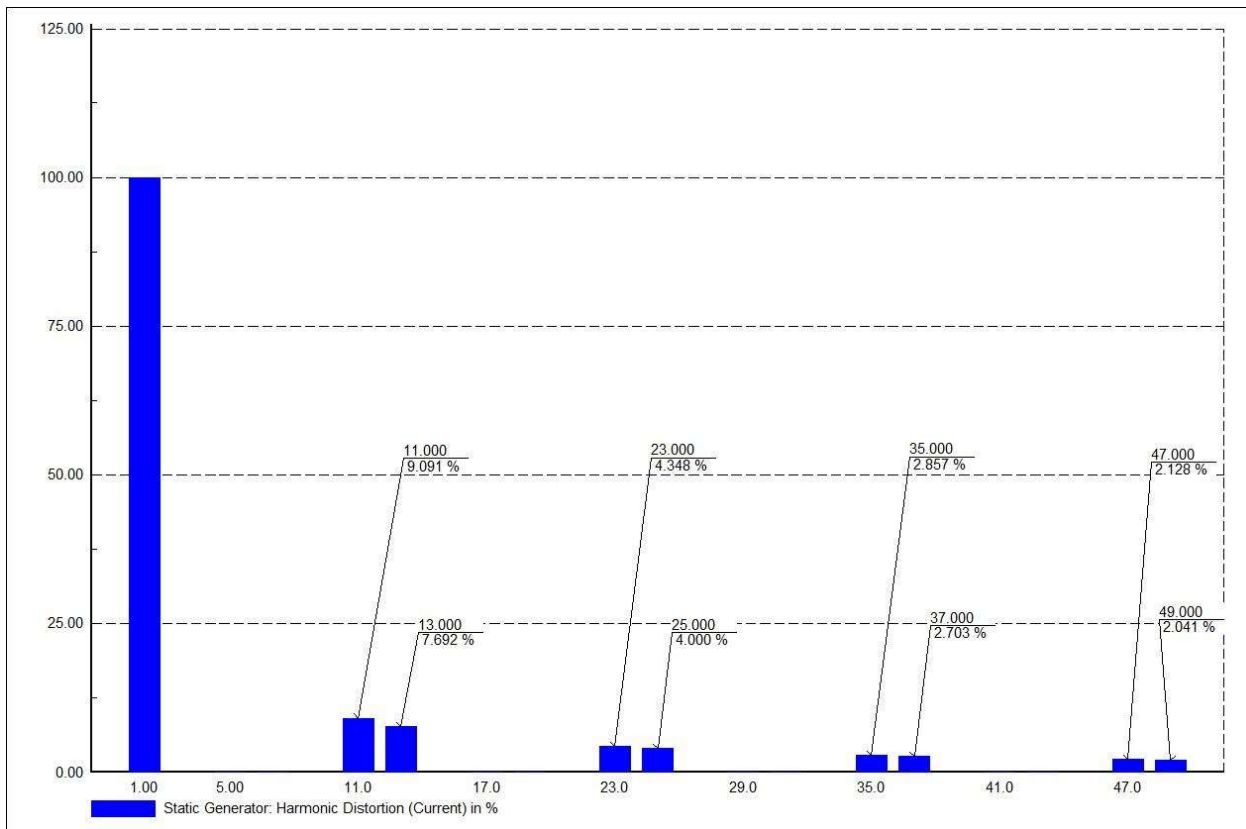
საუკეთესო პრაქტიკის მიხედვით, კლასიკური ნაკადგანაწილების შესწავლისას, მაღალი ძაბვების ხაზები წარმოდგენილია ეგრედწოდებული „PI“ ტიპის, შეყურსულპარამეტრებიანი მოდელებით, რაც გულისხმობს ხაზის მთლიანი ტევადური კომპონენტის ორ ნაწილად დაშლას და მათ მიერთებას ხაზის თავსა და ბოლოში. „PI“ ტიპის მოდელში გრძივი აქტიური და ინდუქციური წინაღობები წარმოდგენილია მიმდევრობით შეერთებული R-L წრედის სახით. ხაზის ასეთი მოდელით წარმოდგენა მისაღებია დამყარებული რეჟიმების ანალიზის ჩასატარებლად, მაგრამ ამჟღავნებს დიდ უზუსტობას როგორც კი გადავდივართ ჰარმონიკული ანალიზის დომენში.

სურათ 1-ზე ნაჩვენებია მარტივი, ფიქტიური ელექტრული სისტემა, რომელიც შეიცავს ორ 500 კვ ძაბვის კვანძს (TERMINAL 1, TERMINAL 2) და ოთხ 220 კვ ძაბვის კვანძს (TERMINAL 3, TERMINAL 4, TERMINAL 5 და TERMINAL 6). TERMINAL 3 ზე მიერთებულია სინქრონული გენერატორი, ხოლო TERMINAL 6 -ზე სტატიკური გენერატორი, რომელიც პრაქტიკულად წარმოადგენს სტატიკური კომპენსატორისა და ენერჯის შემნახველი სისტემის კომბინირებულ მოდელს. სტატიკურ გენერატორს აქტიური სიმძლავრის გენერაციასთან ერთად შეთავსებული აქვს სალტეზე ძაბვის მდორე რეგულირების ფუნქციაც.



სურათი 1. სიმპლავრის ნაკადგანაწილება მოდელირებულ, მარტივ ელექტრულ სისტემაში

სტატიკური გენერატორი აგებულია ძალოვანი ელექტრონული ინტერფეისის ბაზაზე, რაც ნიშნავს რომ სინქრონული გენერატორისაგან განსხვავებით იგი ქსელთან მიერთებულია არა უშუალოდ სტატორის გრაფილით, არამედ ინვერტორის საშუალებით. შესაბამისად, ელექტრონული ვენტის კომუტაციიდან და ინვერტორის არაწრფივი მახასიათებლიდან გამომდინარე, მისი მუშაობის პროცესში ფუნდამენტური 50 ჰერციანი ტალღების გარდა, ადგილი აქვს მაღალი სიხშირის ჰარმონიკული მდგენელების წარმოქმნასაც. სიმარტივისთვის, სტატიკური გენერატორის გამოსასვლელი წარმოდგენილია 12 პულსიანი სამფაზა, დაბალანსებული ინვერტორის სახით. შესაბამისად ჰარმონიკული სპექტრში პრაქტიკულად მიღებულია მე-5, მე-7, მე-17, და მე-19 ჰარმონიკები და ძირითადად დომინირებს მე-11, მე-13, 23-ე და 25-ე რიგის ჰარმონიკები, როგორც ეს სურათ 2-ზეა ნაჩვენები.



სურათი 2. სტატიკური გენერატორის ინვერტორის დენის ჰარმონიკული სპექტრი

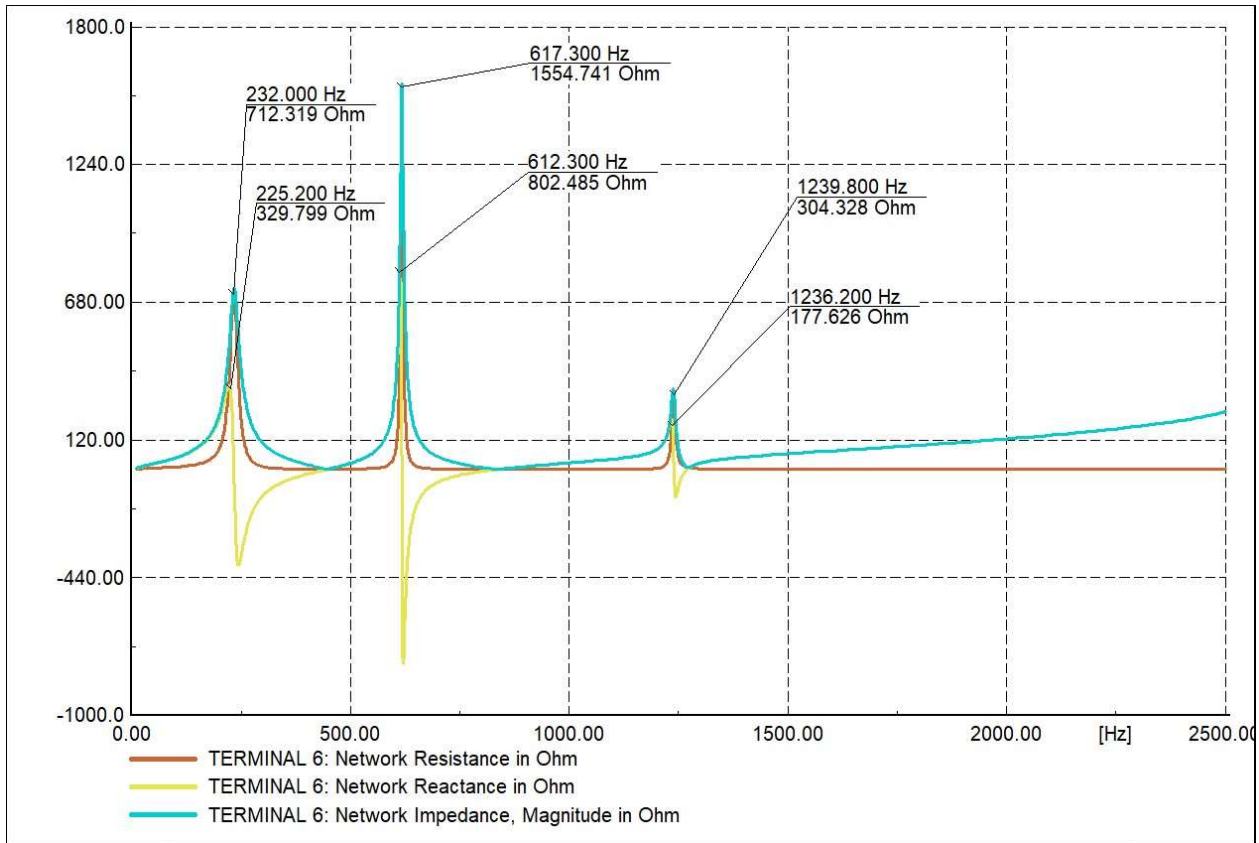
მოდელირების პროცესის გამარტივების მიზნით, კვლევის ამ ეტაპზე არ ვითვალისწინებთ ინტერჰარმონიკებისა და სუპრაჰარმონიკების წარმოქმნას და შესაბამისად, ქსელში მათი გავრცელების ფენომენიც უგულებელყოფილია. ძირითადი აქცენტი კი, გადატანილია ფუნდამენტური სიხშირის ჯერადი ჰარმონიკების ნაკადგანაწილებაზე.

ჰარმონიკული ანალიზის შედეგები PI ტიპის მოდელების გამოყენებისას

ამ სცენარში მოდელირებული ელექტრული სისტემის ყველა მაღალი ძაბვის ხაზი წარმოდგენილია PI ტიპის მოდელების საშუალებით. აქვე უნდა აღიშნოს, რომ ნორმალური რეჟიმის პარამეტრებს სცენარების მიხედვით არ ვცვლით. მცირე ცვლილება, რომელიც შესაძლებელია დაფიქსირდეს ნაკადგანაწილების შედეგებში გამოწვეული იქნება მხოლოდ და მხოლოდ მოდელების ცვლილების გამო, რადგან დატვირთვისა და გენერაციის პარამეტრებს ვტოვებთ ხელუხლებელს.

სტატიკური გენერატორის ქსელთან მიერთების წერტილში სიხშირული მახასიათებლის გადასაღებად TERMINAL 6 - ში მოვახდინეთ ქსელის სიხშირული სკანირება. ქსელში ინექცირდა 0-დან 2500 ჰც დიაპაზონის მქონე სიხშირული სპექტრი, 0.1 ჰერციანი ბიჯით.

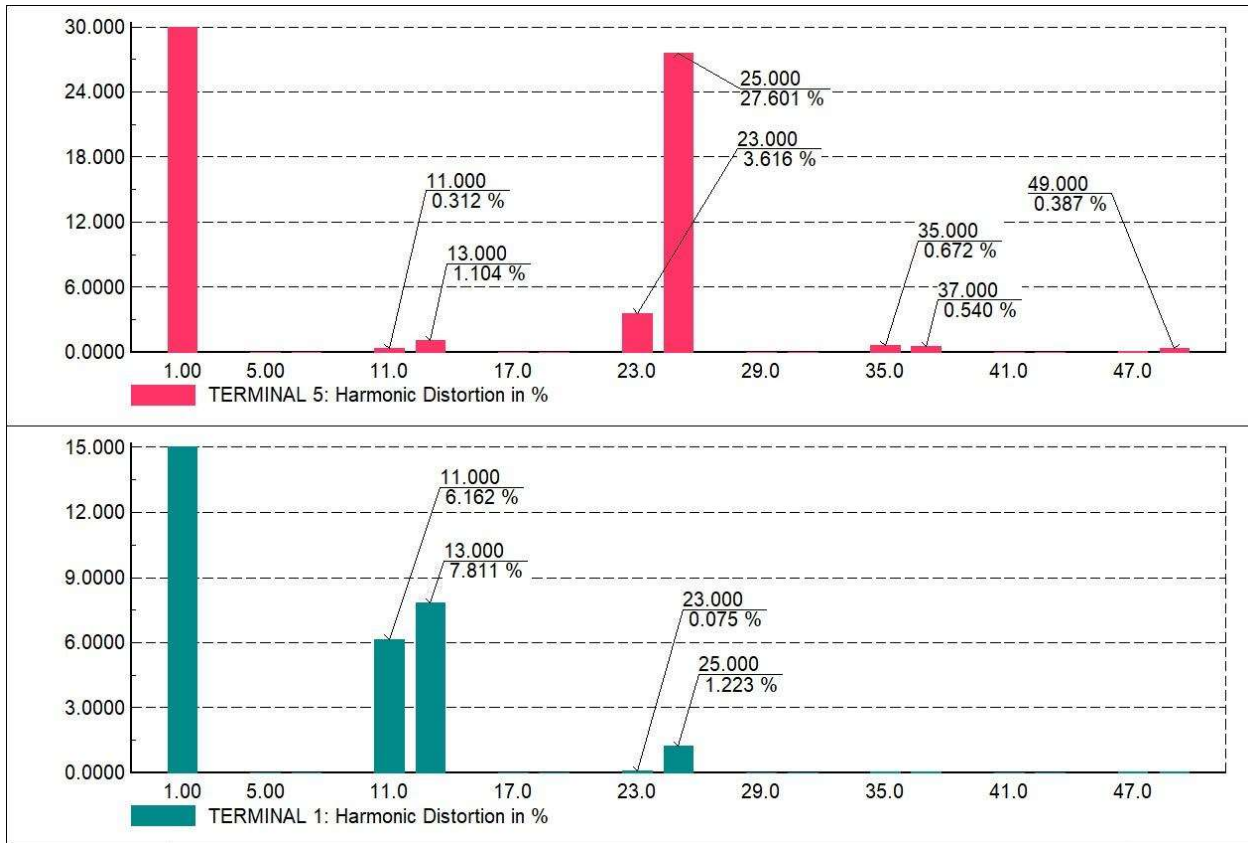
სიხშირული სკანირების შედეგები ასახულია სურათ 3-ზე. როგორც ამ მრუდებიდან აშკარად იკვეთება, სიხშირის ამ დიაპაზონში ქსელი ამჟღავნებს სამ რეზონანსულ წერტილს, აქედან ერთი დაახლოებით 230 ჰერცის, მეორე 610 ჰერცის, ხოლო მესამე 1230 ჰერცის მიდამოებში.



სურათი 3. სტატიკური გენერატორის მიერთების წერტილში ქსელის წინააღობების სიხშირული მახასიათებლები ხაზების PI ტიპის მოდელების გამოყენებისას

თითოეულ ასეთ წერტილში ადგილი აქვს მიერთების წერტილის მიმართ ქსელის რეაქტიული წინააღობის ბუნების მკვეთრ ცვლილებას სიხშირის საკმაოდ ვიწრო დიაპაზონებში. კერძოდ, ადგილი აქვს წინააღობის ტევადურიდან ინდუქციურში და ინდუქციურიდან ისევ ტევადურში გადასვლას. ასევე აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ სიხშირეზე დამოკიდებული ქსელის ეკვივალენტური აქტიური წინააღობაც, რაც გამოწვეულია არა სადენების ზედაპირული ეფექტით, არამედ ქსელის ელემენტების წინააღობების კომპლექსური ბუნებით. ქსელის ეკვივალენტური წინააღობა სურათ 3-ზე წითელი მრუდის საშუალებით არის გამოსახული. მოდელირებული სისტემის რეაქტიული წინააღობის ასეთი ვარიაციები გამოწვეულია მისი გრძივი და განივი რეაქტიული კომპონენტების შემთხვევითი რეზონანსებიდან, რაც პრაქტიკაში ნაკლებად პროგნოზირებადია და შესაბამისად აუცილებელია მათი წინასწარი კალკულაცია სხვადასხვა ტოპოლოგიური სცენარებისთვის (მათ შორის ყველა N-1 სცენარისთვის).

სიხშირული მახასიათებლის გადაღების შემდეგ ჩავატარეთ ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების კალკულაცია, რომლის შედეგებიც TERMINAL 5 -სთვის და TERMINAL 1-სთვის ნაჩვენებია სურათ 4-ზე.



სურათი 4. ჰარმონიკული დამახინჯებები 1-ელ და მე-5 ტერმინალებში, ხაზების PI ტიპის მოდელების გამოყენებისას

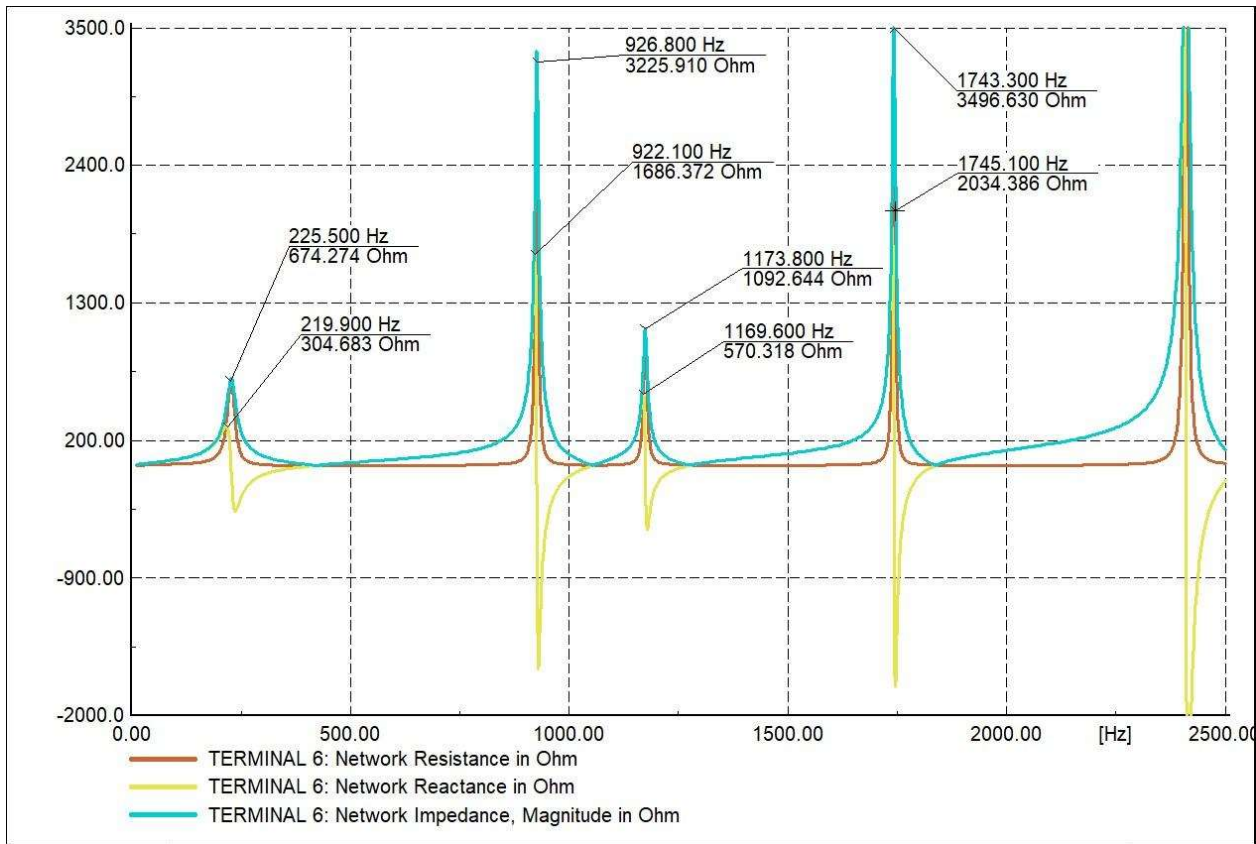
როგორც ჰარმონიკული დამახინჯებების ამსახველი დიაგრამიდან ჩანს Terminal 5-ში მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები შედარებით მილეული, თუმცა ადგილი აქვს 23 - ე და 25 - ე ჰარმონიკების გაძლიერებას. განსაკუთრებული აღნიშვნის ღირსია 25-ე რიგის ჰარმონიკა, რომლის სიდიდე ძირითადი მდგენელის დაახლოებით 28 %-ს აღწევს, რაც ყოვლად დაუშვებელია მაღალი ძაბვის ქსელში. ეს ნიშნავს, რომ სინუოსიდას პრაქტიკულად დაკარგული აქვს თავისი ფორმა.

Terminal 1-ში განსხვავებული სურათი გვაქვს. კერძოდ, აქ დომინანტი ჰარმონიკებია მე-11 და მე-13, ხოლო 25-ზე მაღალი რიგის ჰარმონიკები პრაქტიკულად გამქრალია.

ცხადია, ჰარმონიკული დამახინჯების ასეთი მაღალი დონეები რეალურ ქსელში არ შეგვხვდება, რადგან დამახინჯების ყველა ძირითადი წყარო როგორც წესი ქსელთან ერთდება ცვლადი ძაბვის ფილტრებთან ერთად. ასეთ შემთხვევაში ფილტრები ხელოვნურად ქმნიან დაბალი წინაღობების შუნტურ არხებს ყველა იმ ჰარმონიკისთვის, რომელთა დონეც ლოკალური ქსელის წესების ან ელექტრული ენერჯის ხარისხის შესაბამის სტანდარტებით დასაშვებ ზღვრებს სცილდება. ჩვენი სცენარები ნაანგარიშებია ჰარმონიკული ფილტრების გარეშე, რათა მკაფიოდ გამოჩნდეს ქსელის გავლენა თითოეულ ჰარმონიკაზე.

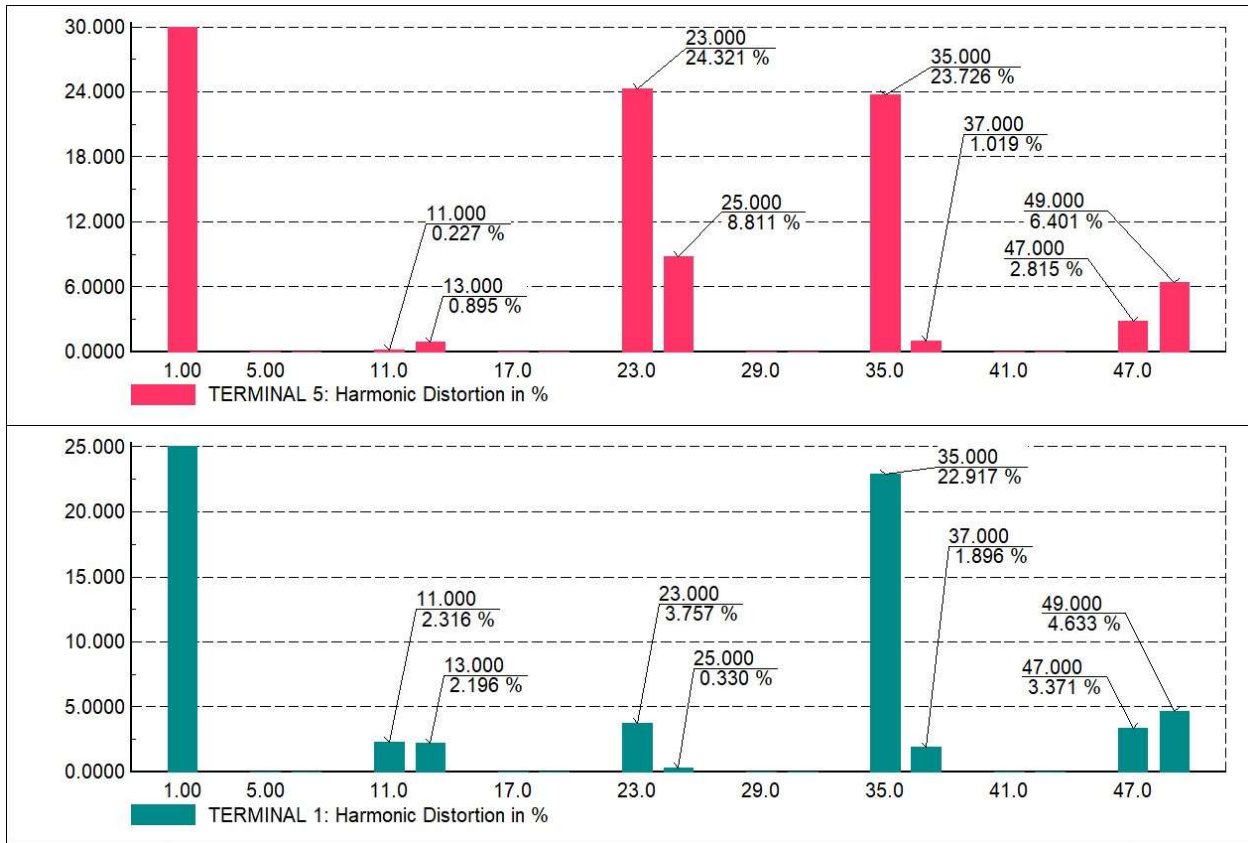
ჰარმონიკული ანალიზის შედეგები T ტიპის მოდელების გამოყენებისას

ამ სცენარში, მოდელირებული ელექტრული სისტემის ყველა მაღალი ძაბვის ხაზის PI ტიპის მოდელები ჩავანაცვლეთ განაწილებულპარამეტრებიანი T ტიპის მოდელებით. როგორც ზემოთ აღინიშნა რეჟიმის სხვა პარამეტრები, ქსელის ტოპოლოგია და კვანძებში მიერთებული ელემენტები დავტოვეთ უცვლელი.



სურათი 5. სტატიკური გენერატორის მიერთების წერტილში ქსელის წინააღმდეგობის სიხშირული მახასიათებლები ხაზების T ტიპის მოდელების გამოყენებისას

ახალი მოდელისთვის სიხშირული მახასიათებლის გადასაღებად, TERMINAL 6-ში კვლავ მოვახდინეთ ქსელის სიხშირული სკანირება. მიღებული შედეგი სურათ 5-ზეა ნაჩვენები. აქ წარმოდგენილი ახალი სიხშირული მახასიათებლიდან ნათლად ჩანს, რომ სიტუაცია დრამატულად შეიცვალა. კერძოდ, დაიძრა პრაქტიკულად ყველა არსებული რეზონანსული წერტილი, შეიცვალა კომპლექსური წინააღმდეგობის სიდიდეები და გაჩნდა ახალი რეზონანსული წერტილები, რომლის შესახებაც პირველ სცენარში საერთოდ არ გვქონდა ინფორმაცია.



სურათი 6. ძაბვის ჰარმონიკული დამახინჯებები 1-ელ და მე-5 ტერმინალებში, ხაზების T ტიპის მოდელების გამოყენებისას

დაკვირვებული თვალი ადვილად შენიშნავს, რომ სიხშირის ზრდასთან ერთად სულ უფრო მკვეთრად იზრდება განსხვავება მახასიათებლებს შორის.

ასევე აბსოლუტურად განსხვავებული შედეგები მივიღეთ ჰარმონიკული ნაკადგანაწილების ანგარიშისას. სურათ 6 - ზე ნაჩვენებია ძაბვების მაღალსიხშირული კომპონენტები TERMINAL 5 - ისთვის და TERMINAL 1 - ისთვის. ადვილი შესამჩნევია, რომ წინა სცენარისაგან განსხვავებით, TERMINAL 5 -ში მკვეთრად არის გაზრდილი 23-ე, 35-ე, 47-ე და 49-ე რიგის ჰარმონიკები. განსხვავებული სურათი მივიღეთ TERMINAL 1-შიც. აქ მკვეთრად არის შემცირებული მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკები, ხოლო მნიშვნელოვნად არის გაზრდილი 35-ე რიგის ჰარმონიკა. 47-ე და 49-ე ჰარმონიკები წინა სცენარში პრაქტიკულად არ არსებობდა, აქ კი მათი ამპლიტუდები აღემატება 3%-სა 4%-ს, შესაბამისად.

დასკვნა

ჰარმონიკული მოდელირების დომენში მაღალი ძაბვის ხაზების PI ტიპისა T ტიპის მოდელებზე დაყრდნობით გამოკვლეული სცენარების შედეგებში შეინიშნება დრამატული განსხვავება. ეს განსხვავება განპირობებულია იმ ფაქტით, რომ PI ტიპის შემთხვევაში, ხაზის თავსა ბოლოში განაწილებული ტევადური კომპონენტები მოქმედებენ როგორც მამუნტებელი

არხები მაღალი რიგის ჰარმონიკებისთვის. სწორედ ამიტომ, მაღალი რიგის ჰარმონიკები, ცალკეული გამონაკლისის გარდა, ან სრულად ჩახშობილია ან თავს იჩენს უმნიშვნელო ამპლიტუდებით. ეს შეგვიძლია გავაიგივოთ შემთხვევასთან, როდესაც ჰარმონიკულ წყაროს ინექციის კვანძშივე ვახვედრებთ მაღალი სიხშირის მამუტებელი ფილტრს, რომელიც არ აძლევს ჰარმონიკულ მდგენელებს ქსელში გავრცელების საშუალებას.

ამასთან, რადიკალურად განსხვავებულ შედეგებს ვიღებთ ქსელის სიხშირული სკანირებისას. როგორც აღმოჩნდა, PI ტიპის მოდელების გამოყენებისას, შესაძლებელია დაიმალოს და ვერ შევნიშნოთ არაერთი რეზონანსული კონტური, რომელიც რეალურ ქსელში არსებობს და შესაძლებელია იწვევდეს რიგ პრობლემებს ზოგიერთი ჰარმონიკული მდგენელის გაძლიერების კუთხით. ასეთი კონტურების გამოვლენა შესაძლებელი ხდება მხოლოდ განაწილებულპარამეტრებიანი T ტიპის მოდელების გამოყენების შემთხვევაში.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ყოვლად მიუღებელია ქსელის ჰარმონიკული ანალიზის ჩატარება შეყურსულპარამეტრებიან სქემაზე. მითუმეტეს, როდესაც საქმე ეხება ცვლადი ძაბვის ფილტრების შერჩევას. მოდელირებაში დაშვებული შეცდომა ნეგატიურად აისახება ფილტრების დიზაინზე, რაც საბოლოო ჯამში გამოიწვევს მათი მუშაობის ხარისხის გაუარესებას და ეფექტურობის მნიშვნელოვან შემცირებას. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ფილტრების შერჩევისას დიდი ყურადღება უნდა დაეთმოს არა მხოლოდ გენერირებული ჰარმონიკების სპექტრს, არამედ ამ სპექტრის მიმართ მიერთების წერტილის კომპლექსური წინაღობების სიხშირულ მახასიათებლებსაც.

T ტიპის მოდელების გამოყენება იძლევა ბევრად უფრო ზუსტ შედეგებს, რამდენადაც განაწილებული პარამეტრები უფრო მეტად ასახავს რეალური ხაზის თვისებებს და შესაბამისად, მნიშვნელოვნად ზრდის ელექტრული ქსელის მახასიათებლების ხილვადობას მაღალსიხშირული ანალიზის ჩატარებისას.

Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow

Summary

The considerable increase in the number of devices equipped with power electronic interfaces in electrical power systems highlights the escalating importance of conducting detailed studies on harmonic load flow in high voltage networks. This area of study diverges from classical power flow analysis as it encompasses the analysis of a full spectrum of currents and voltages of different frequencies. This complex scenario necessitates the accurate representation of the electrical system's components, making the selection of suitable equivalent models critical. When calculating steady state scenarios for fundamental frequency currents and voltages, simplified models can yield relatively high

accuracy. However, the scenario becomes significantly more complex with harmonic load flow analysis. This increased complexity is due to the capacitive and inductive components of the network's topological elements being highly sensitive to frequency variations.

In conventional load flow scenarios, employing simplified models with lumped parameters for high-voltage lines is generally acceptable. This approach works because the critical parameters at both ends of the line can be accurately determined, and the electromagnetic processes occurring along the line are not the main focus in steady state conditions.

However, even though most modern modeling and simulation software capable of harmonic domain analysis can perform harmonic analysis using these simplified models, meticulous validation of these models is crucial. Inaccurate models can lead to results that are not just imprecise but also grossly disconnected from reality, increasing the risk of errors. This caution is especially important when designing harmonic filters and implementing various strategies to mitigate harmonic injections into the network.

The article examines how two types of models for high-voltage lines, specifically the "PI" and "T" type models, behave in scenarios involving high-frequency harmonic load flow. This analysis uses a small-scale high-voltage system with 500 and 200 kV nodes as an example. A static generator, providing both harmonic current injections and voltage regulation at the connection point, is used as a source. The network's frequency characteristics are assessed in two scenarios. In the first, the high-voltage network is represented using a classical, lumped-parameter "PI" type model, while in the second, a distributed-parameter "T" type model is applied. The models for other network elements remain unchanged across the scenarios. The outcomes of the harmonic flow distribution in identical scenarios modeled for both cases are compared, leading to a conclusion and recommendation on choosing the appropriate high voltage line model for harmonic load flow calculations.

Keywords: Harmonics, Power System, Modeling, Simulation, Frequency Scanning, Harmonic load flow.