

ელექტრული ქსელების დამყარებული რეჟიმების კომპიუტერული მოდელირება

ნ.თურქია, თ.ბახტაძე, ვ.ახალაძე

წარმოდგენილია ერთიანი მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას იძლევა მოახდინოთ დამყარებული ნორმალური და ავარიული რეჟიმების კომპიუტერული მოდელირება მონაცემთა ბაზების მართვის სისტემებში.

ნორმალური და ავარიული რეჟიმების აქტიური პარამეტრების განსაზღვრის ორივე ამოცანა ეფუძნება ერთსა და იმავე განტოლებებს, მაგრამ თვისობრივად მკვეთრად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრის დროს გადაწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ენერგიის ხარისხს. ამიტომ ნებისმიერი ამონახსნი არ არის დამაკმაყოფილებელი და აუცილებელია ამონახსნის პროცესზე ზემოქმედების შესაძლებლობის უზრუნველყოფა, რაც გათვალისწინებულია წარმოდგენილ მოდელში. შემოთავაზებული განტოლებების საფუძველზე, სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის გამოყენებით, შესაძლებელია ალგორითმის დაშუშავება ნებისმიერი სახის არასიმეტრიული ავარიული რეჟიმის გასაანგარიშებლად.

საკვანძო სიტყვები: დამყარებული რეჟიმი, კვანძური ძაბვები, კვანძური დენები, ვექტორ-მატრიცები, ელექტრომომძრავებელი ძალა

ნორმალური და სიმეტრიული ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება წარმოებს ჩანაცვლების სქემის მიხედვით, რომელსაც აღგენენ ერთი ფაზისათვის, რადგანაც სიმეტრიული ელექტრორეჟიმის პირობებში, ერთი და იგივე უბნის სამივე ფაზის აქტიური პარამეტრები მხოლოდ 120° -ით არის ერთმანეთისგან დადრული. ერთი ფაზისათვის ელექტროპარამეტრების განსაზღვრის შემდეგ, დანარჩენი ფაზებისათვის იგივე პარამეტრებს ვპოულობთ მიღებული შედეგებისა და ვექტორების ძვრის ოპერატორის $\alpha = e^{j120}$ საშუალებით.

არასიმეტრიული რეჟიმების დროს დენებისა და ძაბვების სიმეტრიულობა ირღვევა და რეჟიმის აქტიური პარამეტრების განსაზღვრის ამოცანის გადაწყვეტა შესაძლებელი ხდება ქსელის არასიმეტრიული რეჟიმის სიმეტრიულ რეჟიმებად დაშლის შედეგად, რომლებიც რეალიზებული იქნებიან პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებში და აქტიური პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულების ყველა კანონი, დადგენილი სიმეტრიული ქსელებისათვის, სამართლიანი იქნება თითოეული მიმდევრობის სქემისათვის. ამგვარად, ჩვენი პირველადი ამოცანაა დამყარებული, სიმეტრიული (ნორმალური და ავარიული) რეჟიმების კომპიუტერული მოდელირება მონაცემთა ბაზების მართვის სისტემებში.

ეს ორი ამოცანა: ნორმალური და ავარიული რეჟიმების აქტიური პარამეტრების განსაზღვრა ეფუძნება ერთსა და იმავე განტოლებებს, მაგრამ თვისობრივად მკვეთრად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრის დროს გადაწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ენერგიის ხარისხს. აქედან გამომდინარე ნებისმიერი ამონახსნი არ არის დამაკმაყოფილებელი და საჭირო ხდება სისტემური ავტომატიკის მოქმედების იმიტირება და საწყის მონაცემებზე ზემოქმედების განხორციელება, როგორცაა, მაგალითად, ძაბვის რეგულირება, გრძივი და განივი კომპენსაციის განხორციელება, დატვირთვის ძაბვაზე დამოკიდებულების გათვალისწინება და სხვ. ყველაფერი ეს მოითხოვს, კვანძური ძაბვების განტოლებებში თავისუფალი წევრები წარმოდგენილი იყოს არა დენების, არამედ გენერაციისა და მომხმარებლის დატვირთვის სიმძლავრეების სახით. მიღებული

არაწრფივი განტოლებების ამოხსნა წარმოებს რომელიმე იტერაციული მეთოდით და შესაძლებელი ხდება ამოხსნის პროცესზე ზემოქმედების განხორციელება რეაქტიული სიმძლავრეების ნაკადების მართვის საშუალებით.

ავარიული რეჟიმების გაანგარიშების დროს სხვა პრობლემებთან გვაქვს საქმე, განსაკუთრებით არასიმეტრიული რეჟიმების ანალიზის შემთხვევაში, რადგანაც სამივე ფაზის პარამეტრები განსხვავებულია და მხოლოდ ერთი ფაზის შესაბამისი ჩანაცვლების სქემის შედგენა და ამ ფაზის პარამეტრებით ოპერირება შეუძლებელია. ამ შემთხვევაში, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ვიყენებთ სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდს, რაც ფაქტობრივად წარმოადგენს არასიმეტრიული რეჟიმის სამ სიმეტრიულ რეჟიმად წარმოდგენას. თითოეული მიმდევრობის სქემაში აქტიური პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება კი აღიწერება წრფივი განტოლებებით. სიმეტრიულ მდგენელებად დაშლა იწვევს უცნობების რიცხვის გაზრდას. გარდა ამისა, რთულდება აქტიური პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულების განსაზღვრა. აქედან გამომდინარე, საჭიროა შესაბამისი ალგორითმების დამუშავება, სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის ეფექტურად გამოყენებისათვის.

ნორმალური რეჟიმის აქტიური პარამეტრებისა და დენების ავარიული მდგენელების ჯამი იძლევა ავარიული დენებისა და ძაბვების მნიშვნელობებს ქსელში. გარდა აღნიშნულისა, ნორმალური რეჟიმის პარამეტრები წარმოადგენენ საწყის ინფორმაციას ავარიული მდგენელების გასაანგარიშებლად.

აქედან ავარიული მდგენელების განსაზღვრამდე საჭიროა ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება სისტემის მდგომარეობის აღმწერი რომელიმე განტოლებით. უნიფიცირებულ განტოლებებს, რომლებიც აკავშირებენ ერთმანეთთან ელექტრორეჟიმის ოთხ ძირითად პარამეტრს - $\vec{U}_{uz}, \vec{I}_{uz}, \vec{I}_{vec}, \vec{E}_{vec}$, აქვს სახე [1]:

$$\begin{bmatrix} M Y_d M^T & M Y_d \\ Y_d M^T & Y_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_{uz} \\ \vec{E}_{vec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}_{uz} \\ \vec{I}_{vec} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

ანუ

$$\begin{aligned} M Y_d M^T \vec{U}_{uz} + M Y_d \vec{E}_{vec} &= \vec{I}_{uz} \\ Y_d M^T \vec{U}_{uz} + Y_d \vec{E}_{vec} &= \vec{I}_{vec} \end{aligned} \quad (2)$$

სადაც $\vec{U}_{uz}, \vec{I}_{uz}$ - კვანძური ძაბვებისა და კვანძური დენების ვექტორ-მატრიცები; $\vec{I}_{vec}, \vec{E}_{vec}$ - შტოებში გამავალი დენებისა და ძაბვების ვექტორ-მატრიცები; Y_d - შტოების გამტარობების დიაგონალური მატრიცა; M - ინციდენციის I მატრიცა, რომელშიც ასახულია სქემის ტოპოლოგია.

იმის მიხედვით, თუ რომელი რეჟიმის აქტიური პარამეტრებია საანგარიშო და რა საწყის ინფორმაციას ვფლობთ განისაზღვრება (1) განტოლების უცნობები და თავისუფალი წევრები. თუ მოცემულია როგორც კვანძური დენები $\vec{I}_{uz}$, ისე შტოებში ჩართული ემპ-ები $\vec{E}_{vec}$, (2)-დან ვღებულობთ:

$$\vec{U}_{uz} = [M Y_d M^T]^{-1} \vec{I}_{uz} - [M Y_d M^T]^{-1} M Y_d \vec{E}_{vec}. \quad (3)$$

თუ მოცემულია $\vec{I}_{uz}$, ხოლო $\vec{E}_{vec} = 0$, ვღებულობთ კვანძური ძაბვების განტოლებას [2]:

$$M Y_d M^T \vec{U}_{uz} = \vec{I}_{uz}, \quad (4)$$

ანუ

$$\dot{U}_{ux} = [M \ Y_d \ M^T]^{-1} \dot{I}_{ux},$$

სადაც

$$Z_{ux} = [M \ Y_d \ M^T]^{-1} \quad (5)$$

კვანძური წინაღობების მატრიცაა.

(2)-დან ვღებულობთ განტოლებას, რომელიც აკავშირებს შტოებში ჩართულ ემპ-ს შტოებში გამავალ დენებთან:

$$[Y_d - [Y_d M^T][M Y_d M^T]^{-1} [M Y_d]] \dot{E}_{ux} = \dot{I}_{ux}. \quad (6)$$

აქ

$$Y_d - [Y_d M^T][M Y_d M^T]^{-1} [M Y_d] = Y_{ux}. \quad (7)$$

წარმოადგენს შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცას.

აღნიშნული განტოლებებით ვპოულობთ ნორმალური რეჟიმის აქტიურ პარამეტრებს. ჩვენს მიერ რეალიზებული მათემატიკური მოდელი ეფუძნება განტოლება (4)-ს:

$$Y_{ux} \dot{U}_{ux} = \dot{I}_{ux} -$$

სადაც

$$Y_{ux} = M Y_d M^T. \quad (8)$$

კვანძური სიმძლავრეებისა და ბაზისური ძაბვის გათვალისწინებით აღნიშნული განტოლება ხდება არაწრფივი და იძენს სახეს [2]:

$$Y_{ux}(U_{ux} - U_B) = [S_i^*/U_i^*]. \quad (9)$$

ანუ

$$Y_{ux} U_{ux} = [S_i^*/U_i^*] + Y_{ux} U_B, \quad (10)$$

აქ U_B – ბაზისურ ძაბვათა ვექტორ- მატრიცა; S_i^*, U_i^* – კვანძური სიმძლავრეებისა და ძაბვების ვექტორ-მატრიცების i -ური ელემენტების შეუღლებული კომპლექსები.

განტოლება (10)-დან მისი ორივე მხარის Y_{ux}^{-1} -ზე გამრავლებით ვღებულობთ საიტერაციო ფორმას, რომელიც რეალიზებულია ჩვენს პროგრამაში.

$$U_{ux} = Y_{ux}^{-1} [S_i^*/U_i^*] + U_B \quad (11)$$

აღნიშნული პროგრამით წარმოებს ნორმალური რეჟიმის აქტიური პარამეტრების-კვანძური ძაბვებისა და ხაზებში სიმძლავრეების (დენების) ნაკადების განსაზღვრა, რაც წარმოადგენს ელექტროსისტემის ნორმალურად ფუნქციონირების უზრუნველყოფის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას. პროგრამაში რეალიზებულია ძაბვის რეგულატორის მუშაობის იმიტაცია, განივი და გრძივი კომპენსაციის განხორციელების საშუალება და სხვ.

ამგვარად, გარდა იმ სირთულეებისა, რომლებიც დაკავშირებულია ფიზიკური პროცესების აღმწერი მათემატიკური მოდელის შექმნასთან, ადგილი აქვს სირთულეებს, დაკავშირებულს დიდი განზომილების მქონე ქსელური ამოცანების ამოხსნასთან. პირველ რიგში, ეს ეხება გენერატორულ საღებებზე ძაბვის რეგულირების პრობლემას, დატვირთვების სტატიკური მახასიათებლების გათვალისწინებას, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის განხორციელების შესაძლებლობას. ეფექტური ალგორითმის შესაქმნელად საჭიროა ასევე კომპლექსურ რიცხვებიანი განტოლებების ამოხსნის მეთოდის შერჩევა.

ზეიდელის მეთოდთან შედარებით, უკეთესი შედეგი მივიღეთ მარტივი იტერაციის მეთოდის გამოყენებისას, ვინაიდან ამ დროს საშუალება მოგვეცა ყოველი შემდგომი იტერაციული ბიჯი დაგვეკავშირებინა გარდამავალი პროცესის შესაბამის ელექტრორეჟიმთან, რასაც წარმატება არ ჰქონდა ზეიდელის მეთოდის გამოყენებისას. ამგვარი მათემატიკური მოდელის მიღება მართებული გამოდგა Z_{uz} მატრიცის გამოყენების შემთხვევაში, რასაც ვერ მივალწიეთ კვანძური გამტარებლობის, ანუ განტოლების საწყისი ფორმის (4) გამოყენებისას, ვინაიდან Z_{uz} მატრიცის გამოყენების შემთხვევაში (Y_{uz} მატრიცის გამოყენებასთან შედარებით) თითოეულ ბიჯზე მიღებული კვანძური ძაბვები ახლოს არიან საძიებელთან და სწრაფი კრებადობაც უზრუნველყოფილია.

იტერაციული პროცესის რეალიზებისათვის (4) კომპლექსურ სიდიდეებიანი განტოლება იშლება ორ განტოლებათა სისტემად - ნამდვილი და კომპლექსურ სიდიდეებიანად, და იტერაციული პროცესი გრძელდება რეაქტიული სიმძლავრის კორექტირების პირობებში. კვანძური ძაბვების განსაზღვრის შემდეგ განისაზღვრება დენები და სიმძლავრეების განაწილება ქსელში.

გარდა ამისა, მიღებული კვანძური ძაბვები და შტოებში გამავალი დენები წარმოადგენენ საწყის ინფორმაციას სხვადასხვა სახის სიმეტრიული და არასიმეტრიული ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გასაანგარიშებლად [3], რაც ასევე აუცილებელია ენერგოსისტემის ნორმალურად ფუნქციონირებისათვის.

ავარიული რეჟიმების (მოკლე შერთვებისა და ხაზების გაწყვეტების) პარამეტრების გაანგარიშებას ვაწარმოებთ იგივე უნიფიცირებული წრფივი განტოლებებით (2), სადაც ადგილი შეცვლილი ექნებათ საძიებელ ცვლადებსა და თავისუფალ წევრებს, ანუ უცნობებად წარმოგვიდგება კვანძური დენები და ემძ ხაზებში (I_{uz}, E_{ver}), მოცემულ სიდიდეებად კი, წინასწარ გაანგარიშებული, ავარიამდელი რეჟიმის კვანძური ძაბვები და შტოებში გამავალი დენები U_{uz}, I_{uz} .

შესაბამისი გარდასახვების შემდეგ (2)-დან ვღებულობთ:

$$[MY_d M^T]^{-1} I_{uz} - [MY_d M^T]^{-1} [MY_d] E_{ver} = U_{uz}; \quad (12)$$

$$[Y_d M^T][MY_d M^T]^{-1} I_{uz} + [Y_d - [Y_d M^T][MY_d M^T]^{-1} [MY_d]] E_{ver} = I_{ver},$$

(12) განტოლებების საშუალებით აღიწერება ელექტრორეჟიმი ე.წ. განივი და გრძივი დაზიანებების ნებისმიერი კომბინაციის შემთხვევაში.

მხოლოდ მოკლე შერთვის დენების ანგარიშის დროს, ანუ როდესაც ადგილი არ აქვს გაწყვეტებს და $E_{ver} = 0$, გვრჩება ერთი მატრიცული განტოლება ერთი უცნობით – კვანძური განტოლების შებრუნებული ფორმა:

$$[MY_d M^T]^{-1} I_{uz} = U_{uz}.$$

მხოლოდ გაწყვეტების შემთხვევაში ავარიული პარამეტრები გაიანგარიშება შემდეგი განტოლებებით:

$$[Y_d - [Y_d M^T][M Y_d M^T]^{-1} [M Y_d]] \dot{E}_{\text{уст}} = \dot{I}_{\text{уст}}.$$

როგორც ზემოთ აღნიშნეთ:

$$[M Y_d M^T]^{-1} = Z_{\text{уст}},$$

$$Y_d - [Y_d M^T][M Y_d M^T]^{-1} [M Y_d] = Y_{\text{уст}}.$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნებს:

$$-[M Y_d M^T]^{-1} [M Y_d] = H;$$

$$[Y_d M^T][M Y_d M^T]^{-1} = T,$$

გვექნება:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{уст}} \dot{I}_{\text{уст}} + H \dot{E}_{\text{уст}} &= \dot{U}_{\text{уст}} \\ T \dot{I}_{\text{уст}} + Y_{\text{уст}} \dot{E}_{\text{уст}} &= \dot{I}_{\text{уст}} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

მიღებული განტოლებებით შესაძლებელია გავიანგარიშოთ სიმეტრიული ავარიული რეჟიმის აქტიური პარამეტრები ნებისმიერი რაოდენობის ერთდროული სიმეტრიული მოკლე შერთვებისა და ხაზების გაწყვეტის შემთხვევაში. არასიმეტრიული დაზიანებების დროს სიმეტრიული სისტემებისათვის დამუშავებული მეთოდიკა განიხილება სიმეტრიულ მდგენელებთან მიმართებაში, ანუ აღნიშნული განტოლებების შედგენა წარმოებს პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის დენებისა და ძაბვებისათვის, ამ მიმდევრობების სქემების პასიური პარამეტრების საშუალებით, თითოეული ავარიისათვის დამახასიათებელი სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით.

ლიტერატურა

1. Туркия Н. Унифицированные уравнения состояния электросистем. www.energyonline.ge/ Электронный журнал EOL. 2010. Вып. 2. Апрель.
2. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. М.: Энергия. 1973.
3. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия. 1970.

ნ.თურქია, ტექნ. მეცნ. აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
E-mail: turkianana@yahoo.com