UDC 621.311

SCOPUS CODE 2208

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-123-129>

სისტემაწარმომქნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ოპტიმალური გადანაწილება მანაწილებელ ქსელში

- ომარ ზივზივაძე** ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საქართველო, 4600, ქუთაისი, ახალგაზრდობის 98
E-mail: omarzivzivadze@yahoo.com
- დავით ჯაფარიძე** ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საქართველო, 4600, ქუთაისი, ახალგაზრდობის 98
E-mail: datojaparidze1995@gmail.com

რეცენზენტები:

ფ. ახალაძე, აწსუ-ის საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: pridon.akhaladze@atsu.edu.ge

ქ. ცხაკაია, აწსუ-ის საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: ketevan.tskhakaia@gmail.com

ანოტაცია. ელექტროსისტემის სისტემაწარმომქნელი ქსელის ($U_{\Sigma} \geq 220$ კვ) კვანძში, რომელსაც გააჩნია დიდი რეაქტიული დატვირთვა შესაძლოა საჭირო გახდეს რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი (გენერაციის) წყაროს დადგმა. აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტისას ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით მიზანშეწონილია, რომ მოცემული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო განთავსდეს არა სისტემაწარმომქნელი ქსელის აღნიშნულ კვანძში, არამედ ამ კვანძთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის ($U_{\Sigma} \leq 110$ კვ) კვანძებში.

ამოცანა კონკრეტულად გულისხმობს: სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძში ძაბვის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ჯამური სიმძლავრის ოპტიმალურ გადანაწილებას ამ კვანძთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის.

სტატიაში შედგენილი შესაბამისი ოპტიმიზაციის განტოლებები და მიღებული მათემატიკური მოდელი საშუალებას გვაძლევს ეს მნიშვნელოვანი საკითხი და წარმატებით გადავჭრათ. აქ ოპტიმალურობის პირობა გულისხმობს მაქსიმალურ ეკონომიკურ სარგებლიანობას, მიზნის ფუნქცია კი გახლავთ კვანძური რეაქტიული სიმძლავრეებით

გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაცია. აქედან გამომდინარე, ამოცანის გადაწყვეტისას ძირითად კრიტერიუმად გამოვიყენეთ ეკონომიკურობის კრიტერიუმი.

საკვანძო სიტყვები: მანაწილებელი ქსელი; ოპტიმიზაცია; რეაქტიული სიმძლავრე; რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო; სისტემაწარმომქმნელი ქსელი.

შესავალი

ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრე არათანაბრადაა გადანაწილებული, კერძოდ მაღალი და ზემაღალი ძაბვის ქსელში ($U_{\text{ფ}} \geq 220$ კვ), როგორც წესი, გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის სიჭარბე, ხოლო მანაწილებელ ქსელში კი მისი დეფიციტი. სისტემაწარმომქმნელი ქსელიდან ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის გადადინება მანაწილებელ ქსელში ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით არამიზანშეწონილია, რამეთუ ის ქსელში იწვევს აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დიდ დანაკარგებს. ამიტომ საჭირო ხდება რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია როგორც ზემაღალი ძაბვის ასევე საშუალო და დაბალი ძაბვის ქსელებში.

ელექტროსისტემის მაქსიმალურ და მასთან მიახლოებულ რეჟიმებში სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ზოგიერთ კვანძში, სადაც მიერთებულია შედარებით დიდი ჯამური დატვირთვის მქონე მანაწილებელი ქსელი, მუშა ძაბვა მნიშვნელოვნად დაბალია და, შესაბამისად, დაბალია ძაბვები აქ მიერთებული დაბალი დონის მანაწილებელი ქსელის კვანძებშიც.

სისტემაწარმომქმნელი გადაცემის ქსელის აღნიშნულ კვანძში მუშა ძაბვის ამაღლების მიზნით რეკომენდებულია ამ კვანძში დაიდგას რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყარო, რომლის Q_c სიმძლავრე განისაზღვრა ამ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით [1].

მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების მიზნით უფრო ეფექტურია რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს ჯამური Q_c სიმძლავრე გადანაწილდეს უფრო დაბალი დონის მანაწილებელი ქსელის დატვირთვის კვანძებში. ეს გადანაწილება მიზანშეწონილია განხორციელდეს ისე, რომ მანაწილებელ ქსელში ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების ეფექტი იყოს მაქსიმალური.

ძირითადი ნაწილი

ამრიგად, გვაქვს ამოცანა: „მკვებავი ქსელის მოცემული კვანძის Q_j რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური გადანაწილება მასთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის დატვირთვის კვანძებს შორის“.

ამ ამოცანის საწყისი მონაცემებია:

- ✓ Q_j გადასანაწილებელი რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ;
- ✓ მანაწილებელი ქსელის კვანძური სიმძლავრეები Q_i , მგვარ; $i = 1, 2, \dots, n$ სისტემაწარმომქნელი ქსელის კვანძთან მიერთებული მანაწილებელი ქსელის კვანძებია;
- ✓ მანაწილებელი ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ აქტიური წინაღობები R_{ij} ;

ამ ამოცანის ოპტიმიზაციის განტოლებებია:

- ❖ მიზნის ფუნქცია - განსახილველ მანაწილებელ ქსელში რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმიზაცია:

$$\Delta P_Q \Rightarrow \min;$$

- ❖ შეზღუდვის განტოლება:

$$W = (Q_{j1} + Q_{j2} + \dots + Q_{ji} + \dots + Q_{jn}) - Q_j = 0;$$

- ❖ შეზღუდვის უტოლობა დატვირთვის კვანძების მიმართ:

$$0 \leq Q_{ji} \leq -Q_i \quad (1)$$

ქსელში რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამოითვლება გამოსახულებით [2]:

$$\Delta P_Q = \frac{1}{U_b^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_i Q_j R_{ij}$$

კვანძებში Q_j სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დაყენების შემთხვევაში დასმული ამოცანის მიზნის ფუნქცია ჩაიწერება შემდეგ სახეში:

$$\Delta P'_Q = \frac{1}{U_b^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Q_i + Q_{ji}) (Q_j + Q_{ji}) R_{ij}$$

- ❖ ოპტიმიზაციის განტოლება, შევადგინოთ ლაგრანჟის ფუნქცია [3]:

$$L = \Delta P'_Q + \lambda W \Rightarrow \min.$$

სადაც λ არის ლაგრანჟის განუსაზღვრელი მამრავლი.

დატვირთვის კვანძებში საძიებელი Q_{ji} სიმძლავრეები განისაზღვრება შემდეგი პირობიდან [4]:

$$\frac{\partial}{\partial Q_{ji}} \Delta P'_Q + \lambda \frac{\partial}{\partial Q_{ji}} W = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ანუ

$$\frac{2}{U_b^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{ji}) R_{ij} + \lambda = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

მივიღეთ n რაოდენობის განტოლება n საძიებელი Q_{ji} ცვლადებით და ერთი λ განუსაზღვრელი მამრავლით.

განტოლებათა ამ სისტემასთან ერთად განვიხილოთ კავშირის განტოლება და მივიღებთ $n + 1$ განტოლებათა სისტემას $n + 1$ საძიებელი სიდიდით:

$$\begin{cases} \frac{2}{U_b^2} \sum_{j=1}^n (Q_j + Q_{ji}) R_{ij} + \lambda = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2) \\ (Q_{j1} + Q_{j2} + \dots + Q_{ji} + \dots + Q_{jn}) - Q_j = 0 \end{cases}$$

ზემოთ მიღებულ (2) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლება შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად:

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} Q_{ji} + \lambda \cdot \frac{U_b^2}{2} = - \sum_{j=1}^n R_{ij} Q_j, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ეს გამოსახულება შესაძლებელია ჩავწეროთ მატრიცულ ფორმაში:

$$|R| \cdot |Q_{ji}| + \frac{U_b^2}{2} |\lambda| = -|R| \cdot |Q_j|, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

სადაც $|R| = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}$ - კვანძთა საკუთარ და ურთიერთაქტიურ წინაღობათა მატრიცა;

$|Q_{ji}| = \begin{vmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ \vdots \\ Q_{jn} \end{vmatrix}$ - საძიებელი ცვლადების სვეტ-მატრიცა; $|\lambda| = \begin{vmatrix} \lambda \\ \lambda \\ \vdots \\ \lambda \end{vmatrix}$ - $n \times 1$ -ზე ლაგრანჟის განუსაზღვრელ

მამრავლთა სვეტ-მატრიცა;

$|Q_j| = \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{vmatrix}$ - მანაწილებელი ქსელის კვანძთა რეაქტიული კვანძური სიმძლავრეების სვეტ-მატრიცა;

ამრიგად, მიღებული მათემატიკური მოდელი (2) მატრიცულ ფორმაში გახლავთ:

$$\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & \frac{U_b^2}{2} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & \frac{U_b^2}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & \frac{U_b^2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Q_{j1} \\ Q_{j2} \\ \vdots \\ Q_{jn} \\ \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ \vdots \\ -Q_n \\ Q_j \end{vmatrix} \quad (3)$$

გავითვალისწინოთ, რომ როცა მანაწილებელ ქსელში გვაქვს გენერაციის m კვანძი Q_m გენერაციით, მაშინ (2) განტოლებათა განსახილველ სისტემაში მივიღოთ საძიებელი ცვლადი $Q_m = 0$ და განტოლებათა სისტემიდან ამოვიღოთ m ნომრის შესაბამისი სტრიქონი და სვეტი.

განტოლებათა ამ სისტემის ეტაპობრივი ამოხსნა უნდა გაგრძელდეს მანამ, სანამ დატვირთვის კვანძების მიმართ ყველა ცვლადი არ დააკმაყოფილებს შეზღუდვის (1) უტოლობებს.

დასკვნა

მიღებული მათემატიკური მოდელი ((2) სახის განტოლებათა სისტემა) საშუალებას გვაძლევს სისტემაწარმომქმნელი ქსელის განსახილველ კვანძში ძაბვის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი (გენერაციის) წყაროს ჯამური სიმძლავრე ოპტიმალურად

გადავანაწილოთ ამ კვანძთან მიერთებულ მანაწილებელი ქსელის კვანძებს შორის. აღნიშნული მათემატიკური მოდელის გამოყენებით მანაწილებელ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები იქნება მინიმალური, რაც მოუთხოვს მიღებული მათემატიკური მოდელის ეფექტურობაზე.

ლიტერატურა

1. Makharadze, G., Japaridze, D. Selection criteria and a mathematical model for the additional source of reactive power in a backbone network. Georgia, Tbilisi: *Collection of academic works of Georgian Technical University*, 4(518), p. 105-112. (in Georgian);
2. Makharadze, G. (2015). Electroenergetical (electrical) systems. Georgia, Tbilisi: *Universal*. (in Georgian);
3. Makharadze, G. (2005). Management and optimization of energy regimes. Georgia, Tbilisi: *Technical University*. (in Georgian);
4. Venikov, V., Gorushkin, I., Markovich, M., Melnikov, A., Fedorov, A. (1973). Electrical systems. Electrical calculations, programming and optimization regimes. Russia: *High School*, (4th ed.). (in Russian).

UDC 621.311

SCOPUS CODE 2208

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-123-129>

Optimal Rescheduling of the Additional Reactive Power Source Selected in a Backbone Network to a Distribution Network

Omar Zivzivadze

Department of Energy and Telecommunications, Akaki Tsereteli State University, Georgia, 4600, Kutaisi, 98 Youth str.

E-mail: omarzivzivadze@yahoo.com

David Japaridze

Department of Energy and Telecommunications, Akaki Tsereteli State University, Georgia, 4600, Kutaisi, 98 Youth str.

E-mail: datojaparidze1995@gmail.com

Reviewers:

P. Akhaladze, Associate Professor, Faculty of Technical Engineering, ATSU

E-mail: pridon.akhaladze@atsu.edu.ge

K. Tskhakaia, Associate Professor, Faculty of Technical Engineering, ATSU

E-mail: ketevan.tskhakaia@gmail.com

Abstract. An additional (generation) source of reactive power may be required in a backbone network node ($U_n \geq 220 \text{ kv}$) which has a heavy reactive load. When solving this problem, in a technical-economic sense, it is advisable to place this additional source of reactive power not in the mentioned node of a backbone network, but in the nodes of a distribution network ($U_n \leq 110 \text{ kv}$) connected to this node.

This problem specifically involves: optimal rescheduling of total power of the additional reactive power source selected according to a voltage criterion in a backbone network node between the distribution network nodes connected to this node.

The relevant optimization equations created in the article and the obtained mathematical model allow us to solve this problem effectively and successfully. The condition for optimality here implies the best economic returns, while the objective function is to minimize active power losses caused by nodal reactive powers. That was why we used the economic criterion as the main criterion in solving this problem.

Key words: additional source of reactive power; backbone network; distribution network; optimization; reactive power.

UDC 621.311

SCOPUS CODE 2208

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-123-129>

Оптимальное перераспределение дополнительного источника реактивной мощности, выбранного в системообразующей сети, в распределительную сеть

Омар Зивзивაძე Департамент энергетики и телекоммуникаций, Государственный университет им. Акакия Церетели, Грузия, 4600, Кутаиси, ул. Молодежи, 98
E-mail: omarzivzivadze@yahoo.com

Давид Джапаридзе Департамент энергетики и телекоммуникаций, Государственный университет им. Акакия Церетели, Грузия, 4600, Кутаиси, ул. Молодежи, №98
E-mail: datojaparidze1995@gmail.com

Рецензенты:

Ф. Ахаладзе, ассоциированный профессор инженерно-технического факультета ГУАЦ
E-mail: pridon.akhaladze@atsu.edu.ge

К. Цхакая, ассоциированный профессор инженерно-технического факультета ГУАЦ
E-mail: ketevan.tskhakaia@gmail.com

Аннотация. В узле системообразующей сети ($U_n \geq 220$ кв), имеющей большую реактивную нагрузку, иногда требуется установка дополнительного (генерирующего) источника реактивной мощности. При решении этой задачи с технико-экономической точки зрения дополнительный источник заданной реактивной мощности целесообразно размещать не в указанном узле системообразующей сети, а в узлах распределительной сети ($U_n \leq 110$ кв), подключенных к этому узлу.

Эта задача конкретно означает: оптимальное распределение суммарной мощности дополнительного источника реактивной мощности, выбранного по критерию напряжения в системообразующем сетевом узле, между узлами распределительной сети, подключенными к этому узлу.

Составленные в статье соответствующие уравнения оптимизации и принятая математическая модель, позволяет эффективно и успешно решать этот вопрос. Условие оптимальности здесь подразумевает максимальный экономический эффект, а целевая функция – минимизировать потери активной мощности. Исходя из этого, при решении поставленной задачи, мы использовали критерий экономии как основной критерий.

Ключевые слова: дополнительный источник реактивной мощности (ИРМ); оптимизация; распределительная сеть; реактивная мощность; системообразующая сеть.

განხილვის თარიღი 10.03.2021

შემოსვლის თარიღი 08.03.2021

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 29.09.2021