

ენერგეტიკა და ენერგეტიკული ტექნოლოგიები

სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის
მაკომპენსირებელი დანადგარების გავლენა აქტიური სიმძლავრის
დანაკარგებზე

დავით ჯაფარიძე

davit.japaridze@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

სტატიაში განხილულია სისტემაწარმომქნელ ქსელში შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა გავლენა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებზე. შედგენილია მოდელირებული 500 კვ მაბვის სისტემაწარმომქნელი ქსელი და გაანგარიშებულია აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები საკუთრივ ამ ქსელში. ანგარიში ჩატარებულია რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდგომ, დატვირთვის ორი ზღვრული (მაქსიმალური, მინიმალური) რეჟიმისათვის. ჩატარებულ ანგარიშთა შედეგად, როგორც მოსალოდნელი იყო, დადგინდა, რომ სისტემაწარმომქნელ ქსელში მაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები ერთისმხრივ კვანძთა მაბვის მუშა მნიშვნელობებს არეგულირებს დასაშვებ ფარგლებში, ხოლო მეორესმხრივ ამცირებს ქსელში აქტიური სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგებს.

საკვანძო სიტყვები: კრიტერიუმი, მაკომპენსირებელი დანადგარი, მუშა მაბვა, სიმძლავრის დანაკარგები, სისტემაწარმომქნელი ქსელი.

შისაჯალი. ადგილობრივ და რეგიონალურ მანაწილებელ ქსელებში ($U_{\Sigma} \leq 110$ კვ) რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და მათი განთავსების ადგილის ოპტიმალური შერჩევა წარმოებს, როგორც წესი ეკონომიკურობის კრიტერიუმის მიხედვით (Железко 1981: 19-32). შესაბამისად, მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების შემდეგ ამ ქსელებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებით მიღწეული ეკონომიკური ეფექტი (სარგებელი) მეტია, ვიდრე ამ დანადგარის საექსპლუატაციო ხარჯები. სისტემაწარმომქნელ ქსელში ($U_{\Sigma} \geq 220$ კვ) კი რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრისა და განთავსების ადგილის შერჩევისათვის შესაძლოა გამოვიყენოთ ელექტროენერჯის ხარისხის კრიტერიუმი, კერძოდ მაბვის მოთხოვნილი სიდიდე კვანძებში (მახარაძე, ჯაფარიძე 2020: 105-112). ამ სტატიაში ხაზგასმულია, რომ სისტემაწარმომქნელ

ქსელში აღნიშნული კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეულ მაკომპენსირებელ დანადგარს შეიძლება გააჩნდეს დადებითი ნიშანი (რეაქტიული სიმძლავრის მასიური მოხმარების კვანძებში), ან უარყოფითი ნიშანი (გენერაციის კვანძებში). ამ შემთხვევაში, ბუნებრივია, დაისმის კითხვა: სისტემაწარმომქმნელ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული მაკომპენსირებელი დანადგარები ხომ არ გამოიწვევს ამ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების გაზრდას? ამ კითხვაზე პასუხი ცალსახად უარყოფითია – „არა“.

დასმულ კითხვაზე ასეთი კატეგორიული პასუხი გამომდინარეობს იქედან, რომ:

- ❖ სისტემაწარმომქმნელ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული მაკომპენსირებელი დანადგარების მიზანია, ამ ქსელში დასაშვებ ზღვრებს გარეთ გასული მუშა ძაბვები დაუახლოვოს ერთმანეთს დასაშვებ ზღვრებში. როცა ორი კვანძის მუშა ძაბვა ერთმანეთს უახლოვდება, ეს ნიშნავს იმას, რომ ამ კვანძებს შორის არსებულ ელექტრულ კავშირზე სიმძლავრის გადადინება მცირდება და, აქედან გამომდინარე, მცირდება სიმძლავრის დანაკარგებიც;
- ❖ როგორც (მახარაძე, ჯაფარიძე 2020: 105-112) სტატიაშია აღნიშნული, როცა Q_{Σ} უარყოფითი ნიშნისაა, ეს ნიშნავს იმას, რომ i კვანძში გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის ჭარბი გენერაცია, რაც უნდა შევამოიხროთ მაშუნტებელი რეაქტორის დაყენებით. ხოლო როცა Q_{Σ} დადებითი ნიშნისაა, ეს ნიშნავს იმას, რომ j კვანძში გვაქვს დიდი რეაქტიული დატვირთვა, რაც უნდა შევამციროთ რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს დაყენების გზით. მაშასადამე, სისტემაწარმომქმნელ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების შემთხვევაში მცირდება, ერთი მხრივ, კვანძიდან გასაცემი და, მეორე მხრივ, კვანძში გადასაცემი რეაქტიული სიმძლავრე, რაც ცალსახად გამოიწვევს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებას ქსელში.

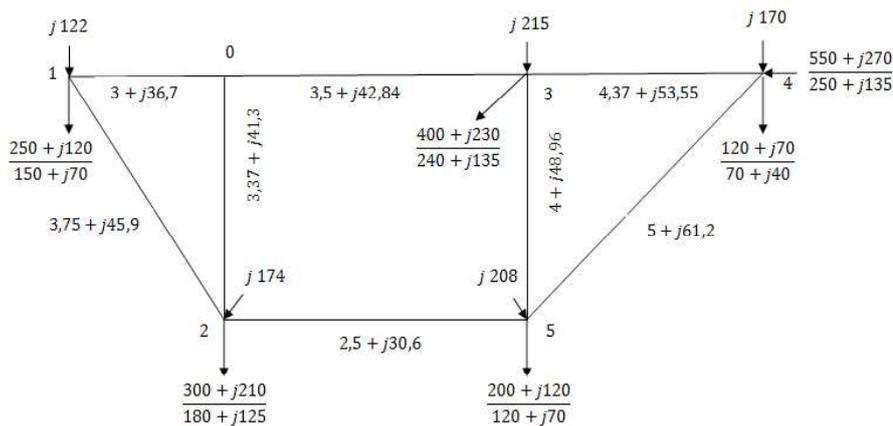
ძირითადი ნაწილი. განვიხილოთ 500 კვ ძაბვის მოდელირებული (ჩვენს მიერ შედგენილი) სისტემაწარმომქმნელი ელექტროგადაცემის ქსელი (ნახ.1), სადაც კვანძი „0“ წარმოადგენს მახალანსებელ კვანძს. ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვის დასაშვებ ფარგლებში უზრუნველყოფის მიზნით (ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით), შერჩეულ იქნა რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები. ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნამ აჩვენა, რომ მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში „4“ კვანძში

დ. ჯაფარიძე

(ნახ.1) მუშა ძაბვის მაღალი სიდიდის (ცხრ.1) დაწევის მიზნით უნდა დაეყენოთ მაშუნტებელი რეაქტორი, რომელიც მუშაობს ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების რეჟიმში, სიმძლავრით 261,18 მგვარ. ხოლო მინიმალურ დატვირთვის რეჟიმში კი ისევ ქსელის „4“ კვანძში განთავსებული რეგულირებადი მაშუნტებელი რეაქტორი უნდა მუშაობდეს 238,9 მგვარ სიმძლავრით.

ჩვენი მიზანია ვაჩვენოთ, როგორ შეიცვლება ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ელექტრული ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა განთავსების შემდეგ.

ჩვენი ამოცანისათვის აღნიშნული მაკომპენსირებელი დანადგარების სიმძლავრე და განთავსების ადგილი საწყის მოცემულობას წარმოადგენს.



ნახ.1. 500 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ქსელი.

1-ელ ცხრილში ნაჩვენებია კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ სრული კომპლექსური წინაღობები, კვანძური რეზულტატიური აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეები და ძაბვის მუშა მნიშვნელობები კვანძებში. ელექტრული ქსელის კვანძებში მაშუნტებელი რეაქტორების განთავსებამ ქსელის ყველა კვანძში მუშა ძაბვები ნორმის ფარგლებში მოაქცია.

ცხრილი 1. ქსელის კვანძების საკუთარი და ურთიერთ წინაღობები და ელექტრული რეჟიმის პარამეტრები

კვანძი	1	2	3	4	5	
1	2,04+j24,77	0,8+j9,74	0,32+j3,87	0,44+j5,32	0,57+j6,97	
2	0,8+j9,74	1,82+j21,96	0,73+j8,73	1+j11,99	1,31+j15,72	
3	0,32+j3,87	0,73+j8,73	2,42+j29,32	2,01+j24,24	1,53+j18,44	
4	0,44+j5,32	1+j11,99	2,01+j24,24	4,37+j53,41	2,09+j25,34	
5	0,57+j6,97	1,31+j15,72	1,53+j18,44	2,09+j25,34	2,73+j33,21	
მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი	P მგვტ	-250	-300	-400	430	-200
	Q ,მგვარ	2	-36	-15	370	88
	U, კვ	500,53	508,09	518,27	542,9	521,35
მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი	P მგვტ	-150	-180	-240	180	-120
	Q ,მგვარ	52	49	80	265	138
	U, კვ	507,86	514,05	522,72	540,52	526,53

დ. ჯაფარიძე

იმისათვის, რომ დავადგინოთ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმის შედეგად აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ცვლილება, ამისათვის საჭიროა გამოვთვალოთ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდეგ. ამ ორ შემთხვევათა გაანგარიშებებს შორის განხვავება არის ის, რომ კომპენსაციის შემდგომ გამოთვლებში შეიცვლება (შემცირდება) „4“ კვანძის კვანძური დატვირთვა მაქსიმალურ დატვირთვის რეჟიმში 261,18 მგვარ-ით, ხოლო მინიმალურის დროს 238,9 მგვარ-ით.

ელექტრულ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე – ელექტრული ქსელის ელექტროგადაცემ ხაზებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები დამოკიდებულია კვანძთა რეზულტატიურ კვანძურ აქტიურ და რეაქტიულ დატვირთვებსა და კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ წინააღმდეგობათა სიდიდეებზე. შესაბამისად აღნიშნული დანაკარგები გამოითვლება შემდეგი გამოსახულებით (მახარაძე 2005: 192-194):

$$\Delta P_P = \frac{1}{U_{\bar{5}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j R_{ij}; \quad \Delta P_Q = \frac{1}{U_{\bar{5}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_i Q_j R_{ij}; \quad \Delta P = \Delta P_P + \Delta P_Q;$$

სადაც: ΔP_P – არის ხაზთა აქტიურ წინააღმდეგობებში კვანძთა აქტიური დატვირთვებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, მგვტ;

ΔP_Q – წარმოადგენს ხაზთა აქტიურ წინააღმდეგობებში რეაქტიული დატვირთვებით გამოწვეულ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს, მგვტ.

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი „1“ კვანძი:

$$\Delta P_{P1} = \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-250) \cdot [(-250) \cdot 2,04 + (-300) \cdot 0,8 + (-400) \cdot 0,32 + 430 \cdot 0,44 + (-200) \cdot 0,57] = 0,8328 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P_{Q1} = \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 2 \cdot [2 \cdot 2,04 + (-36) \cdot 0,8 + (-15) \cdot 0,32 + 370 \cdot 0,44 + 88 \cdot 0,57] = 0,00146 \text{ მგვტ};$$

ამრიგად $\Delta P_1 = \Delta P_{P1} + \Delta P_{Q1} = 0,83426 \text{ მგვტ};$

ანალოგიური გამოთვლებით სხვა კვანძებისათვის მივიღეთ:

$$\Delta P_2 = 0,985 \text{ მგვტ}; \Delta P_3 = 1,0849 \text{ მგვტ}; \Delta P_4 = 2,9936 \text{ მგვტ}; \Delta P_5 = 0,9682 \text{ მგვტ};$$

შესაბამისად, მაქსიმალური დატვირთვის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე შეადგენს:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = 6,8659 \text{ მგვტ};$$

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმი

„1“ კვანძი:

$$\Delta P_{P1} = \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-150) \cdot [(-150) \cdot 2,04 + (-180) \cdot 0,8 + (-240) \cdot 0,32 + 180 \cdot 0,44 + (-120) \cdot 0,57] = 0,3096 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P_{Q1} = \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 52 \cdot [52 \cdot 2,04 + 49 \cdot 0,8 + 80 \cdot 0,32 + 265 \cdot 0,44 + 138 \cdot 0,57] = 0,076 \text{ მგვტ};$$

$$\text{ამრიგად } \Delta P_1 = \Delta P_{P1} + \Delta P_{Q1} = 0,3856 \text{ მგვტ};$$

ანალოგიური გამოთვლებით სხვა კვანძებისათვის მივიღეთ:

$$\Delta P_2 = 0,5564 \text{ მგვტ}; \Delta P_3 = 0,8754 \text{ მგვტ}; \Delta P_4 = 1,6412 \text{ მგვტ}; \Delta P_5 = 0,94 \text{ მგვტ};$$

შესაბამისად, მინიმალური დატვირთვის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციამდე არის:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = 4,3986 \text{ მგვტ};$$

ელექტრულ ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შემდგომ - კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენების შემთხვევაში (მახარაძე 2015: 439-440) :

$$\Delta P'_Q = \frac{1}{U_0^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Q_i + Q_{ji}) (Q_j + Q_{ij}) R_{ij}$$

სადაც: Q_{ji} და Q_{ij} - შესაბამისად i და j კვანძებში დადგმული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელ დანადგართა სიმძლავრე, მგვარ.

აქ ΔP_P გამოსახულება იგივეა რაც წინა შემთხვევაში, რადგან კვანძების რეზულტატიური აქტიური სიმძლავრეები და კვანძთა საკუთარ და ურთიერთ აქტიურ წინაღობები უცვლელია.

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი

დ. ჯაფარიძე

„1“ კვანძი:

$$\Delta P'_{P_1} = \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-250) \cdot [(-250) \cdot 2,04 + (-300) \cdot 0,8 + (-400) \cdot 0,32 + 430 \cdot 0,44 + (-200) \cdot 0,57] = 0,8328 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P'_{Q_1} = \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 2 \cdot [2 \cdot 2,04 + (-36) \cdot 0,8 + (-15) \cdot 0,32 + 108,82 \cdot 0,44 + 88 \cdot 0,57] = 0,00054 \text{ მგვტ};$$

ამრიგად $\Delta P'_1 = \Delta P'_{P_1} + \Delta P'_{Q_1} = 0,83334 \text{ მგვტ};$

ანალოგიური გამოთვლებით სხვა კვანძებისათვის მივიღეთ:

$$\Delta P'_2 = 1,023 \text{ მგვტ}; \Delta P'_3 = 1,1165 \text{ მგვტ}; \Delta P'_4 = 0,6836 \text{ მგვტ}; \Delta P'_5 = 0,7758 \text{ მგვტ};$$

შესაბამისად მაქსიმალური დატვირთვის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შემდეგ არის:

$$\Delta P' = \Delta P'_1 + \Delta P'_2 + \Delta P'_3 + \Delta P'_4 + \Delta P'_5 = 4,4322 \text{ მგვტ};$$

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში

„1“ კვანძი:

$$\Delta P'_{P_1} = \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-150) \cdot [(-150) \cdot 2,04 + (-180) \cdot 0,8 + (-240) \cdot 0,32 + 180 \cdot 0,44 + (-120) \cdot 0,57] = 0,3096 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P'_{Q_1} = \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 52 \cdot [52 \cdot 2,04 + 49 \cdot 0,8 + 80 \cdot 0,32 + 26,1 \cdot 0,44 + 138 \cdot 0,57] = 0,0542 \text{ მგვტ};$$

ამრიგად $\Delta P'_1 = \Delta P'_{P_1} + \Delta P'_{Q_1} = 0,3638 \text{ მგვტ};$

ანალოგიური გამოთვლებით სხვა კვანძებისათვის მივიღეთ:

$$\Delta P'_2 = 0,5096 \text{ მგვტ}; \Delta P'_3 = 0,7217 \text{ მგვტ}; \Delta P'_4 = -0,1386 \text{ მგვტ}; \Delta P'_5 = 0,6644 \text{ მგვტ};$$

შესაბამისად მინიმალური დატვირთვის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის შემდეგ არის:

$$\Delta P' = \Delta P'_1 + \Delta P'_2 + \Delta P'_3 + \Delta P'_4 + \Delta P'_5 = 2,1872 \text{ მგვტ};$$

ამრიგად, როგორც გამოთვლებმა გვიჩვენა სისტემაწარმომქნელ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეულმა რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელმა დანადგარებმა დატვირთვის როგორც მაქსიმალურ, ასევე მინიმალურ დატვირთვის

ეკონომიკური შედეგი, კერძოდ, როგორც მოსალოდნელი იყო, ქსელში შემცირდა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.

დასკვნა. სისტემაწარმომქნელ ქსელში ძაბვის ხარისხის კრიტერიუმის მიხედვით შერჩეული რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარების დადგმის შედეგად შემცირდა აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, კონკრეტულად:

1. მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში „4“ კვანძში მაშუნტებელი რეაქტორის განთავსების შედეგად ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები შემცირდა სიდიდით: $\Delta P = \Delta P - \Delta P' = 6,8659 - 4,4322 = 2,4337$ მგვტ.

2. მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში „4“ კვანძში მაშუნტებელი რეაქტორის განთავსების შედეგად ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები შემცირდა სიდიდით: $\Delta P = \Delta P - \Delta P' = 4,3986 - 2,1872 = 2,2114$ მგვტ.

ლიტერატურა

მახარაძე, გ., ჯაფარიძე, დ. 2020. სისტემაწარმომქნელ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროს შერჩევის კრიტერიუმი და მათემატიკური მოდელი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული. ISSN: 1512-0996, N4(518), დეკემბერი 2020: 105-112.

მახარაძე, გ. 2005. ენერგოსისტემების რეჟიმების მართვა და ოპტიმიზაცია. თბილისი: „ტექნიკური-უნივერსიტეტი“.

მახარაძე, გ. 2015. ელექტროენერგეტიკული (ელექტრული) სისტემები. თბილისი: „უნივერსალი“.

Железко, Ю.С. 1981. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат.

Energy Engineering and Power Technology

Impact of reactive power compensating equipment in a backbone network on active power losses

Davit Japaridze

davit.japaridze@atsu.edu.ge
Akaki Tsereteli State university
Kutaisi, Georgia

The article discusses impact of reactive power compensation equipment on active power losses in a backbone network. A modeled 500 kv backbone network is compiled and active power losses in this network are calculated. The calculation is conducted before reactive power compensation and after it for two (maximum, minimum) load modes. As a result of the reports, it was found out that, as expected, a reactive power compensating equipment, selected according to the voltage quality criteria in the backbone network regulates operating voltage values of the nodes within the allowable range and reduces active power and energy losses in the network.

Keywords: backbone network, compensating equipment, criterion, operating voltage, power losses.

Introduction. In radial and magistral distribution networks ($U_n \leq 110 \text{ kv}$) an optimal selection of reactive power compensating equipment is made, usually according to the criteria of economy (Zhelezko). Consequently, the economic effect (benefit) achieved by reducing active power losses in these networks after installation of the compensating equipment is bigger than operating costs of it. In a backbone network ($U_n \geq 220 \text{ kv}$) we can use criterion of power quality to select reactive power compensating equipment, in particular a required voltage value in nodes (Makharadze, Japaridze). This article emphasizes that a compensating equipment selected according to this criterion in the backbone network may have a positive sign (in reactive power consumption nodes) or a negative one (in generation nodes). In the case, naturally, a question arises: will the compensating equipment selected according to the voltage quality criteria in the backbone network lead to an increase in active power losses in this network? Answer to this question is unequivocally negative - "NO".

Such a categorical answer to the question arises from fact that:

- ❖ Purpose of the compensating equipment selected according to the voltage quality criteria in backbone network is to bring operating voltages outside

the permissible limits closer to each other. When operating voltages of two nodes approach each other, it means that a power flow across an electrical connection between these nodes is reduced and, consequently, power losses are also reduced;

- ❖ As mentioned in the article (Makharadze, Japaridze 2020: 105-112), when Q_{ci} is a negative, it means that we have an excess generation of reactive power in node i , which should be reduced by installing a shunt reactor. And when Q_{cj} is a positive, it means that we have a large reactive power load in the j node, which we must reduce by installing an additional source of reactive power. Therefore, in case of installation of compensating equipment selected according to the voltage quality criteria in the backbone network, a reactive power delivered from the node on the one hand and on the other hand reactive power transfer to the node will be reduced, which will definitely reduce active power losses in the network;

Main part. Consider a 500 kv modeled (compiled by us) backbone network (Fig. 1), where node “0” is a slack bus. Reactive power compensating equipment was selected (according to the voltage quality criterion) to ensure operating voltage values within the allowable limits (Makharadze, Japaridze). Solving an optimization problem showed, that in maximal load mode a shunt reactor must be installed in node “4”, which should operate at 261.18 MVar (see Fig. 1). And in the minimal load mode, the regulated shunt reactor located in the "4" node should operate with a power of 238.9 MVar.

Our goal is to show how active power losses will change in the network after the installation of reactive power compensating equipment.

For our task, the nodal power values and location of this compensating equipment are the initial data.

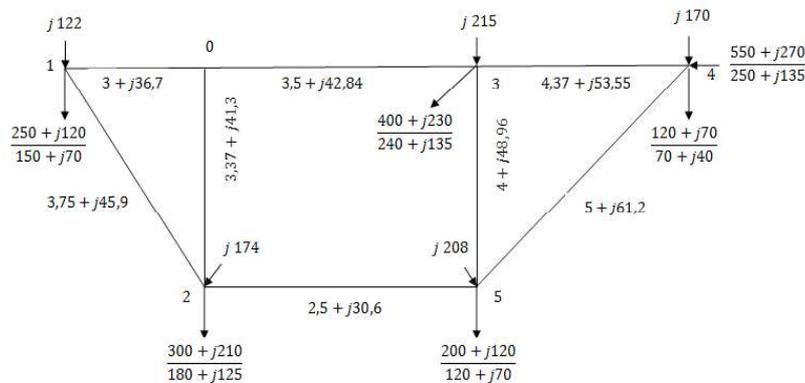


Fig.1. 500 kv voltage transmission network.

დ. ჯგუფარძე

In table 1 the nodes' own and mutual complex impedances, nodal resulting active and reactive powers, and operating voltage values in the nodes are shown. Installation of shunt reactors brought the operating voltages in all nodes of the network within the norm.

Table 1. Own and mutual impedances of network nodes and parameters of electrical mode

Node		1	2	3	4	5
1		2,04+j24,77	0,8+j9,74	0,32+j3,87	0,44+j5,32	0,57+j6,97
2		0,8+j9,74	1,82+j21,96	0,73+j8,73	1+j11,99	1,31+j15,72
3		0,32+j3,87	0,73+j8,73	2,42+j29,32	2,01+j24,24	1,53+j18,44
4		0,44+j5,32	1+j11,99	2,01+j24,24	4,37+j53,41	2,09+j25,34
5		0,57+j6,97	1,31+j15,72	1,53+j18,44	2,09+j25,34	2,73+j33,21
Maximal load mode	P, MW	-250	-300	-400	430	-200
	Q, MVar	2	-36	-15	370	88
	U, kv	500,53	508,09	518,27	542,9	521,35
Minimal load mode	P, MW	-150	-180	-240	180	-120
	Q, Mvar	52	49	80	265	138
	U, kv	507,86	514,05	522,72	540,52	526,53

In order to determine a change in active power losses as a result of the installation of reactive power compensating equipment, it is necessary to calculate active power losses in the network before and after reactive power compensation. Difference between calculations of these two cases is that in post-compensation calculations load of the "4" node will change (decrease) by 261.18 MVar at maximal load mode and by 238.9 MVar at minimal one.

Active power losses in the network before reactive power compensation.

Active power losses in network depend on resulting active and reactive nodal powers and magnitudes of the nodes' own and mutually active resistance. Accordingly, these losses are calculated with the following formulas (Makharadze):

$$\Delta P_P = \frac{1}{U_6^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j R_{ij}; \quad \Delta P_Q = \frac{1}{U_6^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_i Q_j R_{ij}; \quad \Delta P = \Delta P_P + \Delta P_Q;$$

Where: ΔP_P – active power losses caused by nodal active powers, MW;

ΔP_Q – active power losses caused by nodal reactive powers, MVar.

Maximal load mode:

Node “1”:

$$\begin{aligned} \Delta P_{P1} &= \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-250) \\ &\quad \cdot [(-250) \cdot 2,04 + (-300) \cdot 0,8 + (-400) \cdot 0,32 + 430 \cdot 0,44 \\ &\quad + (-200) \cdot 0,57] = 0,8328 \text{ MW}; \\ \Delta P_{Q1} &= \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 2 \\ &\quad \cdot [2 \cdot 2,04 + (-36) \cdot 0,8 + (-15) \cdot 0,32 + 370 \cdot 0,44 + 88 \cdot 0,57] \\ &= 0,00146 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Thus $\Delta P_1 = \Delta P_{P1} + \Delta P_{Q1} = 0,83426 \text{ MW}$;

We obtained similar calculations for other nodes, results are:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= 0,985 \text{ MW}; \quad \Delta P_3 = 1,0849 \text{ MW}; \quad \Delta P_4 = 2,9936 \text{ MW}; \quad \Delta P_5 \\ &= 0,9682 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Accordingly, active power losses in the network at maximal load mode before reactive power compensation are:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = 6,8659 \text{ MW};$$

Minimal load mode:

„Node “1”:

$$\begin{aligned} \Delta P_{P1} &= \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-150) \\ &\quad \cdot [(-150) \cdot 2,04 + (-180) \cdot 0,8 + (-240) \cdot 0,32 + 180 \cdot 0,44 \\ &\quad + (-120) \cdot 0,57] = 0,3096 \text{ MW}; \\ \Delta P_{Q1} &= \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 52 \\ &\quad \cdot [52 \cdot 2,04 + 49 \cdot 0,8 + 80 \cdot 0,32 + 265 \cdot 0,44 + 138 \cdot 0,57] \\ &= 0,076 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Thus $\Delta P_1 = \Delta P_{P1} + \Delta P_{Q1} = 0,3856 \text{ MW}$;

We obtained similar calculations for other nodes, results are:

$$\Delta P_2 = 0,5564 \text{ MW}; \quad \Delta P_3 = 0,8754 \text{ MW}; \quad \Delta P_4 = 1,6412 \text{ MW}; \quad \Delta P_5 = 0,94 \text{ MW};$$

Accordingly, active power losses in the network at minimal load mode before reactive power compensation are:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = 4,3986 \text{ MW};$$

დ. ჯგუფარძე

Active power losses in the network after reactive power compensation. In case of installation of reactive power compensating equipment in the nodes (Makharadze):

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

Where: Q_{ci} and Q_{cj} - the values of the reactive power compensating equipment are installed in nodes i and j , respectively.

Here ΔP_p is the same as in the previous case, because nodal active powers and the nodes' own and mutually active resistance are unchanged.

Maximal load mode:

Node "1":

$$\begin{aligned} \Delta P'_{P_1} &= \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-250) \\ &\cdot [(-250) \cdot 2,04 + (-300) \cdot 0,8 + (-400) \cdot 0,32 + 430 \cdot 0,44 \\ &+ (-200) \cdot 0,57] = 0,8328 \text{ MW}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P'_{Q_1} &= \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 2 \\ &\cdot [2 \cdot 2,04 + (-36) \cdot 0,8 + (-15) \cdot 0,32 + 108,82 \cdot 0,44 + 88 \\ &\cdot 0,57] = 0,00054 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Thus $\Delta P'_1 = \Delta P'_{P_1} + \Delta P'_{Q_1} = 0,83334 \text{ MW}$;

We obtained similar calculations for other nodes, results are:

$$\begin{aligned} \Delta P'_2 &= 1,023 \text{ MW}; \Delta P'_3 = 1,1165 \text{ MW}; \Delta P'_4 = 0,6836 \text{ MW}; \Delta P'_5 \\ &= 0,7758 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Accordingly, active power losses in the network at maximal load mode before reactive power compensation are:

$$\Delta P' = \Delta P'_1 + \Delta P'_2 + \Delta P'_3 + \Delta P'_4 + \Delta P'_5 = 4,4322 \text{ MW};$$

Minimal load mode:

„Node "1":

$$\begin{aligned} \Delta P'_{P_1} &= \frac{1}{500^2} \cdot P_1 \sum_{j=1}^n P_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot (-150) \\ &\cdot [(-150) \cdot 2,04 + (-180) \cdot 0,8 + (-240) \cdot 0,32 + 180 \cdot 0,44 \\ &+ (-120) \cdot 0,57] = 0,3096 \text{ MW}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P'_{Q_1} &= \frac{1}{500^2} \cdot Q_1 \sum_{j=1}^n Q_j R_{1j} = \frac{1}{500^2} \cdot 52 \\ &\cdot [52 \cdot 2,04 + 49 \cdot 0,8 + 80 \cdot 0,32 + 26,1 \cdot 0,44 + 138 \cdot 0,57] \\ &= 0,0542 \text{ MW}; \end{aligned}$$

Thus $\Delta P'_1 = \Delta P'_{P_1} + \Delta P'_{Q_1} = 0,3638 \text{ MW}$;

We obtained similar calculations for other nodes, results are:

$$\Delta P_2' = 0,5096 \text{ MW}; \Delta P_3' = 0,7217 \text{ MW}; \Delta P_4' = -0,1386 \text{ MW}; \Delta P_5' = 0,6644 \text{ MW};$$

Accordingly, active power losses in the network at minimal load mode before reactive power compensation are:

$$\Delta P' = \Delta P_1' + \Delta P_2' + \Delta P_3' + \Delta P_4' + \Delta P_5' = 2,1872 \text{ MW};$$

Thus, as the calculations showed, the compensating equipment selected according to the voltage quality criteria in the backbone network gave us an economic benefit/effect in both maximal and minimal load modes, in particular, as expected, active power losses in the network were reduced.

Conclusion. As a result of installation of reactive power compensating equipment selected according to the voltage quality criteria in a backbone network, active power losses were reduced, specifically:

1. As a result of installation of the shunt reactor in node “4” at maximal load mode, active power losses in the network are reduced by the following:

$$\delta P = \Delta P - \Delta P' = 6,8659 - 4,4322 = 2,4337 \text{ MW}.$$

2. As a result of installation of the shunt reactor in node “4” at minimal load mode, active power losses in the network are reduced by the following:

$$\delta P = \Delta P - \Delta P' = 4,3986 - 2,1872 = 2,2114 \text{ MW}.$$