

С.І. ДОЛИНЮК, В.А. БАЖЕНОВ

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНФІГУРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ МЕТОДОМ ПО КОНТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

В роботі розглядається питання вибору оптимальної мережі методом поконтурної оптимізації та розрахунок режимів роботи мережі. Розроблено проект підстанції 110/35/10 кВ. Обрано основний та резервний захист силового трансформатора. Розроблено стартап-проект оптимальної схеми електропостачання споживачів мережею 110 кВ. Обрано заходи і засоби для забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації мережі 110 кВ. Сформовано функцію дисконтованих затрат для повітряної лінії номінальною напругою 110 кВ. Актуальність теми. Під час проектування одним із основних завдань є оптимізація конфігурації електромережі, щоб досягти максимально можливого економічного ефекту, не порушуючи при цьому технічні вимоги. Метою роботи є оптимізація мережі методом поконтурної оптимізації та розрахунок режимів роботи мережі. Об'єкт дослідження: розподільча електрична мережа 110 кВ. Предмет досліджень: оптимізація конфігурації мережі. Методи дослідження. Методи теоретичних основ електротехніки та електричних мереж, математичне моделювання, чисельні методи рішення нелінійних систем рівнянь.

Ключові слова: режим роботи; оптимізація; електрична мережа; підстанція; дисконтовані витрати; трансформатор; енергосистема; потужність.

С.И. ДОЛЫНЮК, В.А. БАЖЕНОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТИ МЕТОДОМ ПО КОНТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе рассматривается вопрос выбора оптимальной сети методом поконтурной оптимизации и расчет режимов работы сети. Разработан проект подстанции 110/35/10 кВ. Избран основной и резервный защиты силового трансформатора. Разработан стартап-проект оптимальной схемы электроснабжения потребителей сетью 110 кВ. Избран мероприятия и средства для обеспечения безопасных условий труда при эксплуатации сети 110 кВ. Сформирован функцию дисконтированных затрат для воздушной линии номинальным напряжением 110 кВ. Актуальность темы. При проектировании одной из основных задач является оптимизация конфигурации электросети, чтобы достичь максимально возможного экономического эффекта, не нарушая при этом технические требования. Целью работы является оптимизация сети методом поконтурной оптимизации и расчет режимов работы сети. Объект исследования: распределительная электрическая сеть 110 кВ. Предмет исследования: оптимизация конфигурации сети. Методы исследования. Методы теоретических основ электротехники и электрических сетей, математическое моделирование, численные методы решения нелинейных систем уравнений.

Ключевые слова: режим работы; оптимизация; электрические сети; подстанции; дисконтированных затрат; трансформатор; энергосистема; мощность.

S.I. DOLYNYUK, V.A. BAGENOV

OPTIMIZATION OF THE GRID CONFIGURATION BY THE METHOD OF CONTOUR OPTIMIZATION

In the article the question of a choice of an optimum network by a method of contour optimization and calculation of operating modes of a network is considered. A 110/35/10 kV substation project has been developed. The basic and reserve protection of the power transformer is chosen. A startup project of the optimal scheme of power supply of consumers with 110 kV network has been developed. Measures and means have been selected to ensure safe working conditions during the operation of the 110 kV network. The function of discounted costs for an overhead line with a nominal voltage of 110 kV is formed. Actuality of theme. When designing one of the main tasks is to optimize the configuration of power grids to achieve the maximum possible economic-nominal effect, without violating these technical requirements. The purpose of work is to optimize the network by the method of contour optimization and calculation of network modes. Object of research: 110 kV electrical distribution network. Subject of research: network configuration optimization. Research methods. Methods of theoretical bases of electrical engineering and electric networks, mathematical modeling, numerical methods of solving nonlinear systems of equations.

Key words: operation mode; optimization; electric network; substation; discount costs; transformer; energy system; power.

Оптимізацію конфігурації електромережі здійснено з використанням методу поконтурної оптимізації.

У вихідній електромережі виділяємо дерево, яке представляє собою зв'язану розімкнену мережу. Всі гілки, які належать мережі називаються дугами. Дуги з, яких складається дерево позначаємо індексами $l = 1, 2, \dots, L$. Інші дуги називаються хордами і позначаються індексами $k = 1, 2, \dots, K$. У випадку додавання будь-якої хорди до дерева електромережі утворюється контур. За незалежні змінні приймаємо навантаження хорд електромережі, як залежні – навантаження дуг, що утворюють дерево.

Приймаємо, що навантаження всіх хорд рівне нулю. Потім, в результаті зміни потужності, будь-якої K -ї хорди можна знайти мінімум функції затрат необхідних для спорудження і експлуатації цього контуру:

$$V_k^*(P_k) = V_k(P_k) \sum_{l \in M_k} V_l(P_l),$$

де P_k та $V_k(P_k)$ - відповідно, навантаження і затрати k -ї хорди;

M_k - множина усіх дуг контуру, який виникає після включення k -ї хорди;

P_l - навантаження l -ї дуги, що залежить від навантаження k -ї хорди.

Для здійснення оптимізації кусково-лінійної функції досить розглянути її критичні точки. Це точки в окрузі, яких значення функції не зменшується. В нашому випадку критичні точки будуть відповідати нульовому значенню навантаження хорди або дуг контуру. Тому для здійснення оптимізації контуру досить виконати порівняння дисконтованих затрат для режимів роботи, в яких навантаження однієї із дуг або хорди рівне нулю. Якщо розглянуті контури є невзає-

мозв'язаними, то процес оптимізації завершується після виконання k кроків. Але в реальних умовах деякі дуги належать до кількох контурів. Тому при виконанні оптимізації одного контуру змінюються умови для оптимізації інших контурів, що приводить до необхідності здійснення ітераційного процесу пошуку екстремуму.

Якщо найменші дисконтовані затрати відповідають режиму, в якому нульове навантаження має дуга, то виконується зміна системи незалежних змінних. Хорду включають в склад дерева, а дугу відносять до хорд. В іншому випадку одна й та сама дуга для одного контуру може бути розімкненою, а для іншого – замкненою.

Далі приведемо алгоритм виконання методу поконтурної оптимізації:

1. У вихідній мережі виділяємо дерево. Дуги, з яких складається дерево, позначаються індексами $l = 1, 2, \dots, L$, а хорди – індексами $k = 1, 2, \dots, K$. Прирівнюємо до нуля навантаження всіх хорд: $P_k = 0, k = 1, 2, \dots, K$. Задають $k = 1$.

2. Оптимізуємо k -й контур. Визначаємо:

$$V_k^*(P_l = 0) = \min \{V_k^*(P_l = 0) / l \in M_k\}.$$

Якщо $V_k^*(P_l = 0) < V_k^*(P_k = 0)$, то для виконання наступного кроку процесу оптимізації дугу l приймаємо, як хорду, а k -у хорду відносимо до складу дерева. Для інших випадків система незалежних змінних залишається без зміни. Приймаємо $P_k = 0$.

3. Якщо розглянуто всі контури електромережі $k=K$, то виконують п.4. Якщо розглянуто не всі контури, то змінюють поточний індекс контуру на $k=k+1$ та переходять до п.2.

4. У випадку зміни в складі дерева та хорд на циклі оптимізації, приймають $k=1$ і переходять до п.2, якщо ні, то – до п.5.

5. Кінець.

Критерієм закінчення виконання алгоритму є постійність складу дерева та хорд після здійснення циклу процесу оптимізації. Для загального випадку, ітераційний процес оптимізації закінчують, коли виконується умова:

$$|V^{(V-1)} - V^V| \leq \varepsilon,$$

де V - номер циклу процесу оптимізації.

На рис. 1 приведена вихідна надлишкова схема електромережі.

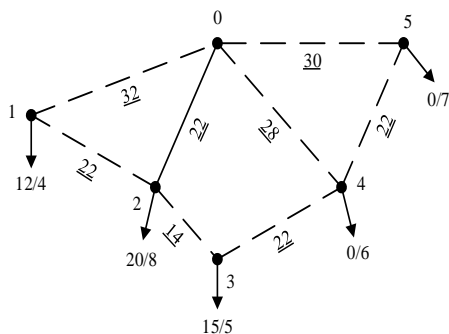


Рис. 1 – Надлишкова схема електромережі

Для знаходження значення дисконтованих зведених затрат скористаємося знайденими у п'ятому розділі виразами:

$$Z_{\text{сн}} = 0,079 \cdot P.$$

$$Z_{\text{н}} = 1,59 + 0,054 \cdot P.$$

Здійснюємо ітераційний процес оптимізації конфігурації електромережі.

В надлишковій мережі хордами обираємо гілки 1-2, 3-4 та 4-5. Таким чином будемо мати три контури. Для першого контуру гілки 0-1 та 0-2 є дугами, а гілка 1-2 хордою; для другого контуру гілки 0-2, 2-3 та 0-4 є дугами, а гілка 3-4 хорда; для третього контуру гілки 0-4 та 0-5 є дугами, а гілка 4-5 хордою.

Спочатку розглянемо перший контур. В процесі оптимізації навантаження кожної гілки по чергово приймаємо рівним нуля. Після чого в одержаній таким чином розімкненій мережі знаходимо поторозподіл і дисконтовані затрати необхідні для будівництва та експлуатації ділянок електромережі. Різноманітні варіанти потокорозподілу в першому контурі показані на рис. 2.

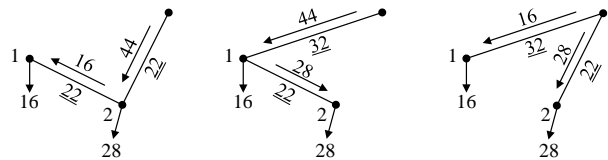


Рис. 2. Різноманітні варіанти потокорозподілу в першому контурі

Знаходимо значення дисконтованих затрат:

$$3(0-1) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{21}) \cdot l_{12} + 0,079 \cdot P_{02} \cdot l_{02} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 16) \cdot 22 + 0,079 \cdot 44 \cdot 22 = 130,83 \text{ млн.грн}$$

$$3(0-2) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{12}) \cdot l_{12} + (1,59 + 0,054 \cdot P_{01}) \cdot l_{01} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 28) \cdot 22 + (1,59 + 0,054 \cdot 44) \cdot 32 = 194,42 \text{ млн.грн}$$

$$3(1-2) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{01}) \cdot l_{12} + 0,079 \cdot P_{02} \cdot l_{02} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 16) \cdot 32 + 0,079 \cdot 28 \cdot 22 = 127,33 \text{ млн.грн}$$

Одержані значення дисконтованих затрат для першого контуру заносимо до табл. 1.

Таблиця 1 – Оптимізація першого контуру

Гілка	Потужність, яка передається, МВт		
	I-й режим	II-й режим	III-й режим
0-1	0	44	16
0-2	44	0	28
1-2	16	28	0
3, млн. грн	130.83	194.42	127.33

Аналіз даних табл. 1 показує, що мінімальні дисконтовані затрати в першому контурі будуть після відключення гілки 1-2. Отже, даний контур своєї конфігурації не змінює.

Процес оптимізації інших контурів наведений в табл. 2-3.

Таблиця 2 – Оптимізація другого контуру

Гілка	Потужність, яка передається через ПЛ, МВт			
	I-й режим	II-й режим	III-й режим	IV-й режим
0-2	0	54	28	48
0-4	54	0	26	6
2-3	28	26	0	20
3-4	48	6	20	0
3, млн. грн.	260.5	178.31	191.14	174.79

Таблиця 3 – Оптимізація третього контуру

Гілка	Потужність, яка передається, МВт		
	I-й режим	II-й режим	III-й режим
0-4	0	13	6
0-5	13	0	7
4-5	6	7	0
3, млн. грн.	110.73	107.33	112.56

Аналіз даних табл. 3 дає мінімальні дисконтовані затрати в третьому контурі після відключення гілки 0-5. Отже, третій контур має таку конфігурацію: гілки 0-4 та 4-5 дуги, а гілка 0-5 хорда.

Оскільки склад контурів залишився без змін оптимізацію конфігурації електромережі закінчуємо. На рис. 3 приведена оптимальна конфігурація мережі.

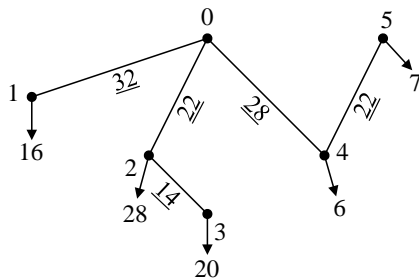


Рис. 3 – Оптимальна конфігурація електромережі

Список літератури

1. Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1-20014. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. 08.04.2014.
2. Про затвердження Норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів. Наказ Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 13.10.2007.
3. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Встановлює вимоги до потрібного переліку електрозахисних засобів, до зберігання, випробування, перевірки стану та користування залежно від умов праці.

4. НПАОП 40.1-1.01-97 (ДНАОП 1.1.10-1.01-97). Правила безпечної експлуатації електроустановок.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2017). Введені 21.07.2017.
6. ДНАОП 0.00-1.03-02. Правила будови і безпечної експлуатації вантажо-підіймальних кранів.
7. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті.
8. Модели оптимального развития энергосистем / В.А. Баженов. Учеб. пособие. – Киев: КПИ, 1984. – 100 с.
9. Електричні системи та мережі. Районні електричні мережі [Текст]: метод. вказівки до викон. курсового проекту з дисципліни для студ. усіх форм навчання та студ.-іноземців напрямку підготов. 6050707 «Електротехніка та електротехнології» / Уклад.: В.М. Сулейманов, В.В. Чижевський, О.М. Янковська. – К., НТУУ «КПІ», 2009. – 92 с.
10. Математичні моделі електричних систем [Текст]: Метод. Вказівки до викон. Модульної контрольної роботи з дисципліни для студ. денної форми та студ.-іноземців напрямку підготовки «Електротехніка та електротехнології» програми професійного спрямування «Електричні системи і мережі» / Уклад. Т.Л. Качадзе, О.М. Паненко. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 59 с.

References (transliterated)

1. Hygienic standards GN 3.3.5-8-6.6.1-20014. Hygienic classification of labor according to the indicators of harmfulness and danger of factors of the production environment, the severity and intensity of the labor process. 04/08/2014
2. On approval of the Norms of free issuance of special clothing, special footwear and other means. Order of the State Committee of Ukraine for Labor Protection Supervision dated 13.10.2007.
3. DNAOP 1.1.10-1.07-01. Rules of operation of electroprotective means. Sets requirements for the required list of electrical protective equipment, storage, testing, inspection and use depending on working conditions.
4. NPAOP 40.1-1.01-97 (DNAOP 1.1.10-1.01-97). Rules for safe operation of electrical installations.
5. Rules of arrangement of electrical installations (PUE-2017). Introduced on 07/21/2017.
6. DNAOP 0.00-1.03-02. Rules of construction and safe operation of cranes.
7. NPAOP 0.00-1.15-07. Rules of labor protection during work at height.
8. Models of optimal development of power systems. VA Bazhenov. Textbook. allowance. - Kiev: KPI, 1984. - 100 p.
9. Electrical systems and networks. District electric networks [Text]: method. instructions for execution. course project in the discipline for students. all forms of education and foreign students in the direction of training. 6050707 "Electrical Engineering and Electrical Technology". Compiled by: V.M. Suleymanov, VV Chigevskiy, O.M. Yankovska. - K, NTUU "KPI", 2009. - 92 p.
10. Mathematical models of electrical systems [Text]: Method. Instructions for performance. Modular test work on the discipline for students. full-time and foreign students in the direction of training "Electrical Engineering and Electrical Technology" professional program "Electrical Systems and Networks". Uklad. T.L. Kacadze, O.M. Panenko. - K: NTUU "KPI", 2016. - 59 p.

Надійшла (received) 02.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Долинюк Станіслав Ігорович (Долынюк Станислав Игоревич, Dolinyuk Stanislav Igorovich) магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; e-mail: stas.dol96@gmail.com.

Баженов Володимир Андрійович (Баженов Владимир Андреевич, Bagenov Volodimir Andreyovich) кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»