

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Висвітлено дослідження, спрямовані на пошук оптимальної потужності силових трансформаторів шляхом аналізу техніко-економічних показників, які відображають витрати на трансформацію електричної енергії. Під час досліджень використовувалися характеристики, які відповідають наявним параметричним інтервалам силових трансформаторів електричної мережі 110 кВ. Рішення щодо необхідності пошуку оптимальної потужності силових трансформаторів приймається шляхом оцінювання співвідношень складових в техніко-економічній моделі витрат на трансформацію електричної енергії, зміна яких обумовлена відхиленням експлуатаційних характеристик силового трансформатора від економічно доцільних значень. Під час визначення економічно доцільної потужності за базові приймаються показники вдосконаленої техніко-економічної моделі застосованих в електричній мережі 110 кВ силових трансформаторів. За таких умов економічно доцільні значення є співвідношеннями в техніко-економічній моделі витрат на трансформацію електричної енергії, визначені за допомогою критеріального методу і відображені критеріями подібності цільової функції. Для пошуку економічно доцільної потужності силового трансформатора техніко-економічна модель вдосконалюється і формується в спрощеній формі. Критерії подібності, знайдені із застосуванням сформованої техніко-економічної моделі, відображають співвідношення складових витрат за критерієм мінімуму дисконтованих витрат. В процесі пошуку оптимальної потужності трансформаторів запропоновано вирази для розрахунку економічно доцільної потужності і відповідної величини витрат на трансформацію електричної енергії. За цими виразами отримано та наведено залежність економічно доцільної потужності від завантаженості силового трансформатора в умовних одиницях. Отримана залежність дає змогу визначити оптимальну величину потужності з урахуванням зміни показника завантаженості силового трансформатора, що й показано на прикладі.

Ключові слова: електрична енергія, критеріальний метод, критерії подібності, параметричний інтервал, потужність, силовий трансформатор, техніко-економічна модель, оптимальна потужність, оптимізація.

Вступ

Стратегія розвитку української електроенергетики спрямована на формування та функціонування енергоефективних та надійних електричних мереж (ЕМ). На основі цього український оператор системи передачі електричної енергії повинен відповідати вимогам щодо забезпечення відповідного рівня розподілу, передачі та споживання електричної енергії, які орієнтовані на економічність, прозорість, енергоефективність та надійність ЕМ [1], [2]. Для відповідності наведеним в [1], [2] вимогам доцільно покращити показники передачі електричної енергії шляхом зменшення витрат на трансформацію електричної енергії, яка виконується силовими трансформаторами, встановленими на підстанціях. Номінальна потужність працюючих на підстанціях трансформаторів вибиралася, виходячи зі стратегії розвитку ЕМ, яка була спрямована на збільшення споживання електричної енергії в промисловості. Натепер в ЕМ України спостерігається зменшення споживання електричної енергії у промисловості та зростання споживання серед побутових споживачів. Свідченням цього є дані Державної служби статистики України [3]. Зміна тенденцій в електроспоживанні дає підстави для аналізу техніко-економічних показників в ЕМ.

Метою роботи є формування критеріальної залежності дисконтованих витрат від потужності трансформатора з використанням результатів досліджень техніко-економічних показників силових

трансформаторів електричних мереж 110 кВ для пошуку оптимальної потужності трансформаторів з урахуванням умов експлуатації, що дозволить поліпшити показники передачі електричної енергії шляхом оптимізації складових витрат на трансформацію електричної енергії.

Результати досліджень

Пошук оптимальної потужності силового трансформатора відноситься до розв'язання задач техніко-економічного характеру. Дослідження виконуються з використанням загальноприйнятих англомовних скорочень в техніко-економічній моделі за критерієм мінімуму дисконтованих витрат $TC \rightarrow \min$ [4]. Аналіз техніко-економічних показників силових трансформаторів виконується із застосуванням техніко-економічної моделі витрат на трансформацію електричної енергії шляхом її поділу на складові частини. Витрати на трансформацію електричної енергії (TC), згідно з техніко-економічною моделлю становлять [4]

$$TC = (I + R)C_{tr} + \sigma \Delta P_0 \cdot WT \cdot COE_{WT} + \sigma \cdot \Delta P_K \cdot COE_{LT} \cdot LT \left(\frac{S_{\max}}{S_r} \right)^2, \quad (1)$$

де I — коефіцієнт ефективності; R — сумарний коефіцієнт щорічних відрахувань на амортизацію, ремонт і обслуговування; C_{tr} — вартість трансформатора; σ — коефіцієнт, що враховує збільшення вартості електроенергії в залежності від відстані мережі до джерела живлення; ΔP_0 — втрати потужності холостого ходу трансформатора; WT — час експлуатації за рік; COE_{WT} — приведена вартість витрат холостого ходу; ΔP_K — втрати потужності під навантаженням; COE_{LT} — приведена вартість витрат короткого замикання; LT — час максимальних витрат; S_{\max} — максимальна завантаженість силового трансформатора; S_r — номінальна потужність силового трансформатора.

Частки складових в моделі (1), в загальному обсягу витрат, формують конкуруючий ефект. Це зумовлено тим, що втрати холостого ходу трансформатора залишаються незмінними в розрізі однієї потужності, на відміну від витрат короткого замикання, які залежать від завантаженості силового трансформатора. Умови експлуатації силового трансформатора в моделі (1) враховуються часом експлуатації трансформатора, його завантаженістю, а саме, максимальним завантаженням, і часом максимальних витрат. Отже, з огляду на вищевикладене, складові витрат матимуть вигляд

$$C_1 = ((I + R) \cdot C_{tr} + \sigma \cdot \Delta P_0 \cdot WT \cdot COE_{WT}) / TC; \quad (2)$$

$$C_2 = \sigma \cdot \Delta P_K \cdot COE_{LT} \cdot LT \cdot S_{\max}^2 / TC \cdot S_r^2. \quad (3)$$

Для пошуку економічно доцільних співвідношень в моделі (1) доцільно застосовувати критеріальний метод [5]. Техніко-економічна модель (1) в критеріальній формі має вигляд

$$TC = \pi_1 \cdot S^{b_1} + \pi_2 \cdot S^{-b_2}, \quad (4)$$

де π_1, π_2 — критерії подібності; S — номінальна потужність силового трансформатора у відносних одиницях; b_1, b_2 — коефіцієнти апроксимації ступеневої функції, отримані методом найменших квадратів.

Для пошуку економічно доцільних значень (π_{1ec}, π_{2ec}) модель (1) запишеться у вигляді

$$TC = A_1 \cdot S^{b_1} + A_2 \cdot S^{-b_2}, \quad (5)$$

де A_1 — апроксимований коефіцієнт, який залежить від вартості обладнання, коефіцієнта дисконту, витрат на ремонт, обслуговування та втрати холостого ходу: $A_1 = a$; A_2 — узагальнений коефіцієнт, який залежить від параметрів експлуатаційних характеристик та коефіцієнта апроксимації витрат трансформатора під навантаженням: $A_2 = \sigma \cdot a_1 \cdot COE_{LT} \cdot LT \cdot S_{\max}^2$.

Пошук економічно доцільних показників силових трансформаторів виконується на основі моделі (1) в формі (5), для низки найзастосовуваніших трансформаторів [4]

$$TC = A_1 \cdot S^{0,65} + A_2 \cdot S^{-1,25}. \quad (6)$$

Оскільки до складу моделі (1) входять показники більші нуля, економічно доцільну потужність можна знайти з рівняння

$$\frac{dTC}{dS} = 0,65 \cdot A_1 \cdot S^{-0,35} - 1,25 \cdot A_2 \cdot S^{-2,25} = 0. \quad (7)$$

Враховуючи властивості пропорцій, вираз (7) набуде вигляду

$$0,65 \cdot A_1 \cdot S^{1,9} - 1,25 \cdot A_2 = 0. \quad (8)$$

З виразу (8) визначається значення економічно доцільної потужності силового трансформатора

$$S_{ec} = \sqrt[1,9]{\frac{1,25 \cdot A_2}{0,65 \cdot A_1}} = \left(\frac{1,25 \cdot A_2}{0,65 \cdot A_1} \right)^{0,526}. \quad (9)$$

Для знаходження значення витрат, які будуть відповідати економічній потужності (TC_{ec}) у вираз (6) записується значення економічно доцільної потужності (9) і виконуються математичні дії, в результаті яких TC_{ec} становитиме

$$TC_{ec} = \frac{1,9 A_2}{0,65} \left(\frac{1,25 A_2}{0,65 A_1} \right)^{-0,66}. \quad (10)$$

Використовуючи методику критеріального методу [5] і вирази (9) і (10), розраховуються критерії подібності, які в умовних одиницях відображають економічно доцільне співвідношення складових в техніко-економічній моделі (1)

$$\pi_{1ec} = (A_1 / TC_{ec}) S_{ec}^{0,65}; \quad (11)$$

$$\pi_{2ec} = (A_2 / TC_{ec}) S_{ec}^{-1,25}. \quad (12)$$

Відповідно до результатів розрахунків за виразами (11), (12) економічно доцільне співвідношення витрат на трансформацію електричної енергії становитиме $\pi_{1ec} = 0,66$; $\pi_{2ec} = 0,34$, тобто 0,66/0,34.

В подальших дослідженнях, використовуються параметри діючої підстанції з встановленим силовим трансформатором ТМН 6300/110, потужність якого беремо за базове значення, тобто $S_b = 6300$ кВА. Показники співвідношень складових витрат на трансформацію електричної енергії знаходяться за виразами (2), (3). Експлуатаційні показники, необхідні для розрахунку, становлять: $WT = 8760$ год, $LT = 3535$ год, $S_{max} = 1590$ кВА [6]. Величини необхідних параметрів беруться такими: $I = 0,1$; $R = 0,01$; $\sigma = 1,1$; $COE_{WT} = 8,03$ грн/кВт; $COE_{LT} = 9,9$ грн/кВт [7], [8]. Параметри силових трансформаторів подані в [9]. Підставивши ці дані до виразів (2), (3), отримуємо співвідношення, які будуть становити: $C_1 = 0,92$; $C_2 = 0,08$, тобто 0,92/0,08.

Рішення щодо необхідності пошуку оптимальної потужності силового трансформатора ухвалюються на основі порівняння отриманих співвідношень 0,92/0,08 з економічно доцільними співвідношеннями 0,66/0,34. Значення отриманих співвідношень свідчить про те, що частка витрат, яка залежить від вартості втрат холостого ходу та амортизаційних відрахувань значно перевищує частку витрат, яка залежить від вартості втрат короткого замикання, що обумовлено умовами експлуатації, це дає основу для пошуку оптимальної потужності силового трансформатора ЕМ 110 кВ.

Пошук оптимальної потужності виконується згідно з виразом (9) в умовних одиницях. Для знаходження потужності силового трансформатора, близької до оптимальної, ступені апроксимації повинні залишатися незмінними. Параметри сталих A_1 , A_2 беруться в умовних одиницях аналогічних параметрів, які використовувались для побудови техніко-економічної моделі (5) [4] та становлять: $a = 0,99$, $a_1 = 1,13$, $\delta = 1$, $C_\tau = 1$, $\tau = 1,18$, $S_{max}^2 = 0,078$. За таких умов значення економічно доцільної потужності силового трансформатора становить: $S_{ec} = 0,3$.

Перехід від умовних одиниць до іменованих виконується за виразом [5]

$$S_{ec} = S_{ec} \cdot S_b. \quad (13)$$

Відповідно до результатів розрахунку і наявних параметричних інтервалів силових трансформаторів ЕМ 110 кВ для подальших досліджень береться силовий трансформатор з номінальною потужністю 2500 кВА тому, що $S_{ec} = 1890$ кВА. Розрахунок величини складових витрат на трансформацію електричної енергії для діючої підстанції з використанням силового трансформатора ТМН 2500/110 виконується за виразами (2), (3) за умови, що експлуатаційні параметри залишаються незмінними. За результатами розрахунку співвідношення складових витрат на трансформацію електричної енергії в умовних одиницях становлять $C_{1ec} = 0,62$; $C_{2ec} = 0,38$, тобто 0,62/0,38. Отримані співвідношення витрат на трансформацію електроенергії близькі до отриманих критері-

альним методом економічно доцільних співвідношень — 0,66/0,34. Перерозподіл складових витрат виконується завдяки зниженню рівня витрат на втрати холостого ходу та збільшенню рівня витрат на втрати короткого замикання, що викликано умовами експлуатації силового трансформатора.

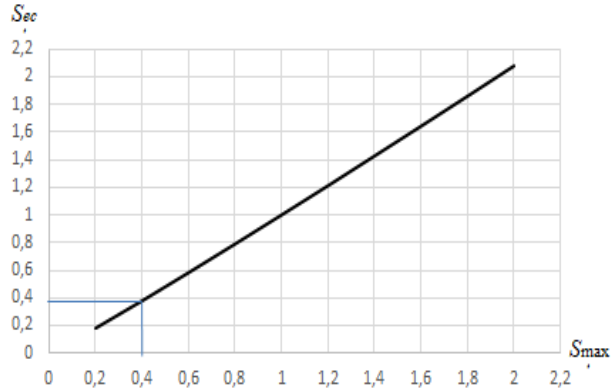
Оскільки завантаженість підстанції — це один з ключових параметрів, за яким вибирається номінальна потужність трансформатора, далі встановлюється залежність економічно доцільної потужності (S_{ec}) від завантаженості силового трансформатора EM 110кВ за виразом (9)

$$S_{ec} = \left(\frac{\pi_1 A_2}{\pi_2 A_1} \right)^{0,526} = S_{\max}^{1,052}. \quad (14)$$

Результати розрахунку за формулою (14) наведено на рисунку. Отримана залежність дає змогу визначити величину оптимальної потужності з урахуванням зміни показника завантаженості силового трансформатора.

Приклад. Використовуючи отриману залежність (рис.), продемонструємо як змінюється значення оптимальної потужності в залежності від зміни початкових умов.

Для цього виконаємо пошук оптимальної потужності, враховуючи вищевказану завантаженість трансформатора ТМН 6300/110, шляхом визначення економічно доцільної завантаженості силового трансформатора на основі виразу (14), записаного у вигляді



Залежність економічно доцільної потужності (S_{ec}) від завантаженості силового трансформатора (S_{\max}) електричної мережі 110 кВ

$$S_{\max.ec} = 1,052 \sqrt{S_r}. \quad (16)$$

В результаті розрахунку за виразом (16) економічно доцільна завантаженість силового трансформатора повинна становити не більше $S_{\max.ec} = 4080$ кВА. Тоді, як наявна його завантаженість становить $S_{\max} = 1590$ кВА. Далі виконуємо дослідження в умовних одиницях

$$S_{\max} = S_{\max} / S_{\max.ec}. \quad (17)$$

Значення наявної завантаженості (17) становить $S_{\max} = 0,4$, що є близьким за значенням до номінальної потужності $S_{ec} = 0,38$. Перехід від умовних одиниць до іменованих виконуємо за виразом (13), де за базову береться потужність силового трансформатора ТМН 6300/110. За результатами розрахунку (13) значення економічно доцільної потужності становить $S_{ec} = 2394$ кВА, що близько за значенням до розрахованої вище економічно доцільної потужності $S_{ec} = 1890$ кВА.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють визначити оптимальне значення потужності (S_{ec}) з урахуванням зміни завантаженості силового трансформатора (S_{\max}).

Висновок

Сформовано критеріальну залежність дисконтованих витрат від потужності трансформаторів на основі вдосконаленої техніко-економічної моделі трансформації електричної енергії, що дає змогу визначити оптимальну потужність трансформаторів з урахуванням умов експлуатації. На прикладі завантаженості силового трансформатора відображено процес коригування величини оптимальної потужності зі зміною початкових умов. Пошук оптимальної потужності згідно зі сформованою залежністю вирішує проблему нерационального розподілу витрат на трансформацію електричної енергії, що покращує показники передачі електричної енергії.

З урахуванням результатів дослідження, слід зауважити, що подані залежності не враховують варіювання сталих параметрів, які входять до складу вдосконаленої техніко-економічної моделі. Тому, для подальших досліджень варто виконати оцінку впливу варіювання параметрів на значення оптимальної потужності та на значення коефіцієнта наростання параметричних інтервалів силових трансформаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] *European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E)*, [Electronic resource]. Available: <https://www.entsoe.eu/publications/position-papers/>.

- [2] Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13 квітня 2017 року № 2019-VIII (зі змінами та доповненнями), веб-портал, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.
- [3] ДП «Державна служба статистики України». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
- [4] В. В. Черкашина, і В. М. Бакицький, «Формування і аналіз техніко-економічної моделі трансформації електричної енергії із застосуванням критеріального методу», *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*, вип. 1 (4), с. 73-78, Лип. 2022.
- [5] С. О. Тимчук, М. М. Черемісін, і В. В. Черкашина, *Вдосконалення методів достовірності вихідної інформації на прикладах прогнозних задач в електроенергетиці*, моногр. Харків, Україна: Факт, 2020, 190 с.
- [6] АТ «Вінницяобленерго» [Електронний ресурс]. Режим доступу: plan-rozvytku-vinnycyaoblenergo-period-2021-2025-rokiv.pdf (voe.com.ua).
- [7] ГКД 340.000.002-97, *Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі*, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Київ, 2011.
- [8] ДП «Оператор ринку», [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.oree.com.ua/>.
- [9] ДСТУ 2104-92 «Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови». Чинний від 25.12.1992. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://dnaop.com/html/61450/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2104-92.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.01.2024

Черкашина Вероніка Вікторівна — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Бакицький Владислав Миколайович — аспірант кафедри передачі електричної енергії, e-mail: baklytskyi.vladyslav@gmail.com.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

V. V. Cherkashyna¹
V. M. Baklytskyi¹

Study of Technical and Economic Indicators of Power Transformers Taking into Account the Conditions of Operation

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

The article presents research, aimed at finding the optimal power of transformers through the analysis of technical and economic indicators that reflect the cost of electrical energy transformation. During the research, the characteristics corresponding to the existing parametric intervals of power transformers of 110 kV electric grid were used. The decision regarding the need to find the optimal power of transformers is made by evaluating the ratios of the components in the techno-economic model of costs for the transformation of electrical energy, the change of which is due to the deviation of the operational characteristics of the power transformer from economically feasible values. When determining the economically feasible rated power, the indicators of the improved technical and economic model of the 110 kV transformers used in the electric network are taken as the basic ones. In the paper, the economically feasible values are the ratios in the techno-economic model of costs for the transformation of electrical energy determined using the criterion method and reflected by the criteria of the similarity of the objective function. In order to find the economically feasible power of the transformer, the techno-economic model is improved and formed in a simplified form. Similarity criteria, which were found using the developed techno-economic model, reflect the ratio of component costs according to the criterion of minimum discounted costs. In the process of finding the optimal power of transformers, expressions were developed for calculating the economically feasible power and the corresponding amount of costs for the transformation of electrical energy. According to the developed expressions, the dependence of economically reasonable power on the load of the transformer in conventional units is obtained and given. The resulting dependence makes it possible to determine the optimal amount of power, taking into account the change in the load factor of the transformer, which is shown in the example.

Keywords: electric energy, criterion method, similarity criteria, parametric interval, power, power transformer, techno-economic model, optimal power, optimization.

Cherkashyna Veronika V. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electric Power Transmission, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Baklytskyi Vladyslav M. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Energy Transmission, e-mail: baklytskyi.vladyslav@gmail.com