

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЕС КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Запропоновано алгоритм розрахунку нормативного значення технічних втрат електроенергії критеріальним методом із застосуванням нейро-нечіткого моделювання. Цей алгоритм базується на представленні впливних факторів у вигляді нечітких множин і визначенні базисних критеріїв подібності за допомогою функцій належності членів нормативної характеристики технічних втрат потужності відповідним множинам, що дозволяє підвищити точність визначення планового значення технічних втрат потужності.

Вступ

Задача керування режимом ЕЕС може бути сформульована в такому вигляді [1]: мінімізувати

$$y(x) = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \cdot \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ji}} \quad (1)$$

за умов

$$g_k(x) = \sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} a_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ji}} \leq G_k, \quad k = \overline{1, p}; \quad x_j > 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де $y(x)$ — деякий узагальнений критерій оптимальності (загальносистемні втрати потужності, планові втрати потужності); a_i, α_{ji} — постійні коефіцієнти; x_j — змінні параметри; n — кількість змінних параметрів; m — сумарна кількість членів обмежень і цільової функції; m_1 — кількість членів цільової функції; k — номер обмеження; m_k — кількість членів k -го обмеження; p — кількість обмежень [1].

Відповідна їй двоїста задача може бути сформульована таким чином [1]: максимізувати

$$d(\pi_o) = \prod_{i=1}^m \left(\frac{a_i}{\pi_{io}} \right)^{\pi_{io}} \cdot \prod_{k=1}^p \left(\frac{\lambda_k}{G_k} \right)^{\lambda_k} \quad (3)$$

за умов ортогональності і нормування, які в матричній формі запису мають вигляд $\alpha \cdot \pi = b$,

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m_k} & \alpha_{1m_{k+1}} & \alpha_{1m_{k+2}} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m_k} & \alpha_{2m_{k+1}} & \alpha_{2m_{k+2}} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \alpha_{3m_{k+1}} & \alpha_{3m_{k+2}} & \dots & \alpha_{3m} \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nm_k} & \alpha_{4m_{k+1}} & \alpha_{4m_{k+2}} & \dots & \alpha_{nm} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \dots \\ \pi_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

де π_i — критерій подібності, а π — вектор критеріїв подібності; $\lambda_k = \sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} \pi_{io}$ — нормовані

множники Лагранжа; α — матриця показників; π — вектор критеріїв подібності.

Коли α — квадратна матриця, а це буде тільки тоді, коли сумарна кількість членів цільової функції і обмежень на одиницю більше, ніж кількість змінних, то система рівнянь (4) легко розв'язується будь-яким відомим методом і її міра складності $t = m - n - 1 = 0$. В усіх інших випадках система рівнянь не визначена $t < 0$ або має безліч розв'язків $t > 0$. Коли матриця α прямокутна, як показано в виразі (4), то згідно з [1] ця система рівнянь має безліч розв'язків, які обмежені певною областю, і її міра

складності $t > 0$. Проблема полягає в тому, що відомі методи розв'язання задач міри складності $t > 1$ мають обмежену область застосування [1—3]. Таким чином, постає задача розробки методу розв'язання задач високої міри складності в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС. Для розв'язання поставленої задачі необхідно проаналізувати можливість застосування нейро-нечіткого моделювання для розв'язання задач критеріального програмування, розробити алгоритм розв'язання задач високої міри складності критеріальним методом із застосуванням представлення членів цільової функції у вигляді нечітких множин, адаптація запропонованих алгоритмів при оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС.

Схожість функції належності і критерію подібності дозволяє використовувати функції належності під час визначення оптимізуючого вектора критеріїв подібності в задачах високої міри складності, тобто $\mu_i = \pi_i$. Функції належності μ за своїм змістом відповідають критеріям подібності π , які є безрозмірними співвідношеннями параметрів системи і в тому випадку, коли вони визначаються методом інтегральних аналогів, також є ваговими коефіцієнтами складових цільової функції (пронормовані до одиниці). Функція належності і критерій подібності змінюються від 0 до 1 [4]. Отже, можна провести аналогію між функцією належності та критерієм подібності.

В електричних мережах ЕЕС нормуються витрати електроенергії на її транспортування за певний період T (звітний період). Щоб не перевищити нормативне значення втрат електроенергії, необхідно контролювати і відповідним чином зменшувати втрати активної потужності, іншими словами нормативним втратам електроенергії слід поставити у відповідність нормативне значення втрат потужності. Таким чином, якщо під час оптимального керування нормальними режимами ЕЕС критерієм оптимальності прийняти відхилення поточних втрат потужності від їх планового значення, то це гарантує те, що в кінці звітної періоду T значення втрат електроенергії не перевищать нормативу.

Алгоритм розрахунку нормативного значення технічних втрат активної потужності критеріальним методом із застосуванням нейро-нечіткого моделювання

Розрахунок нормативного значення технічних втрат потужності відноситься до розв'язання задач високої міри складності. Для розрахунку нормативного значення технічних втрат потужності нами запропоновано алгоритм, показаний на рис. 1.

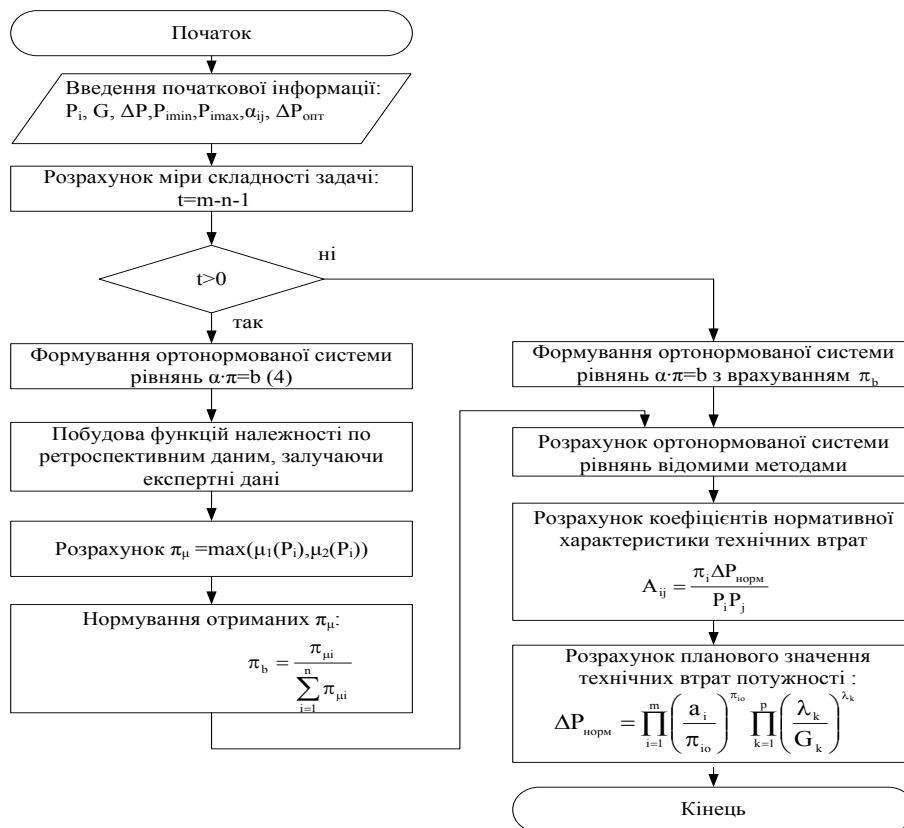


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розрахунку планового значення технічних втрат потужності

Розрахунок нормативного значення втрат електроенергії для мережі напругою 220...110 кВ тестової схеми IEEE на 14 вузлів

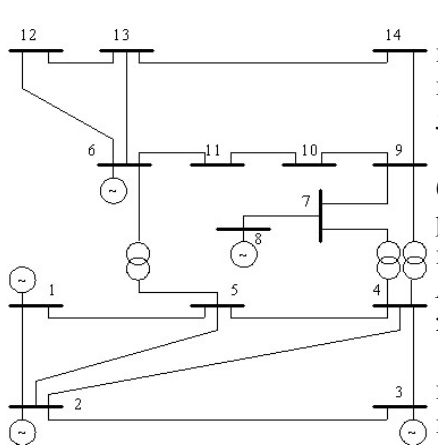


Рис. 2. Тестова схема IEEE

Застосуємо запропонований алгоритм розрахунку нормативного значення технічних втрат потужності (див. рис. 1) для мережі напругою 220...110 кВ тестової схеми IEEE на 14 вузлів, яка показана на рис. 2.

Для розрахунку нормативного значення технічних втрат виберемо форму залежності технічних втрат від впливних факторів, наведену в [5—6]. Для вибраної схеми оберемо чотири впливні фактори: P_0 — сумарне навантаження на шинах 110 кВ; P_1 — сумарне навантаження на шинах 220 кВ; P_2 — навантаження ЛМЗ₁; P_3 — сумарне навантаження ЛМЗ₂.

Для схеми чотирьох впливних факторів нормативна характеристика технічних втрат має такий вигляд: мінімізувати

$$\Delta P_{\text{норм}} = A_{00}P_0^2 + A_{11}P_1^2 + A_{22}P_2^2 + A_{33}P_3^2 + A_{01}P_0P_1 + A_{02}P_0P_2 + A_{03}P_0P_3 + A_{12}P_1P_2 + A_{13}P_1P_3 + A_{23}P_2P_3 + A_0P_0 + A_1P_1 + A_2P_2 + A_3P_3 \quad (5)$$

за умов $\frac{P_0}{P_0P_1} + \frac{P_1}{P_0P_1} + \frac{P_2}{P_0P_1} + \frac{P_3}{P_0P_1} \leq G; \quad P_{i \min} < P_1 < P_{i \max}; \quad P_{j \min} < P_2 < P_{j \max};$

$P_{k \min} < P_3 < P_{k \max}; \quad P_0, P_1, P_2, P_3 > 0, \quad \text{де } G = \frac{P_0}{\Delta P^2}.$

Запишемо ортонормовану систему рівнянь

$$\begin{cases} 2\pi_1 & & +\pi_5 & +\pi_6 & +\pi_7 & & +\pi_{11} & -\pi_{16} & & -\pi_{17} - \pi_{18} & & = 0; \\ & 2\pi_2 & & +\pi_5 & & +\pi_8 & +\pi_9 & & +\pi_{12} & -\pi_{15} + \pi_{16} - \pi_{17} - \pi_{18} - \pi_{16} & & = 0; \\ & & 2\pi_3 & & +\pi_6 & +\pi_8 & & +\pi_{10} & +\pi_{13} & & +\pi_{17} & = 0; \\ & & & 2\pi_4 & & +\pi_7 & +\pi_9 & +\pi_{10} & +\pi_{14} & & +\pi_{18} & = 0; \\ \pi_1 & +\pi_2 & +\pi_3 & +\pi_4 & +\pi_5 & +\pi_6 & +\pi_7 & +\pi_8 & +\pi_9 & +\pi_{10} & +\pi_{11} & +\pi_{12} & +\pi_{13} & +\pi_{14} & = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Міра складності задачі $t = 13$.

Застосуємо алгоритм для розв’язання задач високої міри складності. Розрахуємо базисні критерії подібності через функції належності. Для побудови функцій належності скористаємось моделлю нечіткого висновку Сугено, яка передбачає наявність вибірки початкових даних [4].

Сформуємо вибірки початкових даних, де входами будуть: $p_1 = P_0^2; \quad p_2 = P_1^2; \quad p_3 = P_2^2; \quad p_4 = P_3^2; \quad p_5 = P_0P_1; \quad p_6 = P_0P_2; \quad p_7 = P_0P_3; \quad p_8 = P_1P_2; \quad p_9 = P_1P_3; \quad p_{10} = P_2P_3; \quad p_{11} = P_0; \quad p_{12} = P_1; \quad p_{13} = P_2; \quad p_{14} = P_3$, а виходом — втрати активної потужності, розраховані в програмі ГрафСКАНЕР для різних значень впливних факторів.

Сформувавши навчальну вибірку у вигляді таблиці, будуємо функції належності за допомогою програмного комплексу MATLAB [4].

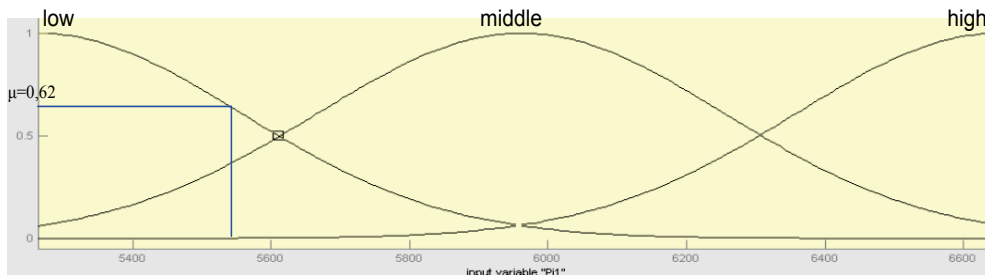


Рис. 3. Вигляд функцій належності

Якщо сумарне навантаження споживачів 110 кВ дорівнює 74,545 МВт, то значення складової нормативної характеристики технічних втрат дорівнює $P_1 + P_0^2 = 5556,96$. Функція належності за такого значення впливального фактора приймає значення 0,62. Так як функція належності і критерій подібності схожі поняття, то скористаємось значенням функції належності для розрахунку оптимальних критеріїв подібності. Знайдемо максимальні значення функцій належності для всіх складових характеристики нормативного значення технічних втрат. Результати визначення функцій належності зведені в таблицю. Пронормуємо значення функцій належності до одиниці і отримаємо оптимальні значення критеріїв подібності.

Параметри нормативної характеристики технічних втрат потужності

Номери членів цільової функції	Максимальне значення функції належності	Оптимальні значення критеріїв подібності	Уточнені значення коефіцієнтів нормативної характеристики
1	1	0,114	$2,346 \cdot 10^{-4}$
2	0,0125	0,001421	$4,791 \cdot 10^{-5}$
3	1	0,114	$2,26 \cdot 10^{-3}$
4	1	0,114	$1,201 \cdot 10^{-4}$
5	0,0125	0,001421	$1,185 \cdot 10^{-5}$
6	1	0,114	$7,282 \cdot 10^{-4}$
7	0,5	0,057	$2,428 \cdot 10^{-4}$
8	1	0,114	$3,728 \cdot 10^{-4}$
9	0,1	0,011	$2,943 \cdot 10^{-4}$
10	0,1	0,011	$2,099 \cdot 10^{-3}$
11	1	0,114	0,011
12	0,1	0,011	$8,483 \cdot 10^{-3}$
13	0,979	0,111	0,083
14	0,995	0,113	0,065

Розрахуємо уточнені значення коефіцієнтів A_{ij} і A_i за виразом

$$A_{ij} = \frac{\pi_i \cdot \Delta P_{\text{опт}}}{P_i P_j}. \quad (7)$$

Аналогічно розраховуємо для всіх коефіцієнтів A_{ij} і A_i . Розрахувавши базисні критерії подібності, розв'язуємо ортонормовану систему рівнянь (6) і знаходимо оптимальні значення критеріїв подібності: $\pi_{15} = 1,259$, $\pi_{16} = 2,518$, $\pi_{17} = -0,42$, $\pi_{18} = -0,4196$. Розрахуємо нормативне значення технічних втрат потужності, підставивши розраховані значення коефіцієнтів A_{ij} , A_i і π_i в вираз для розрахунку оптимального значення двоїстої функції:

$$d(\pi_{\square}) = \left(\frac{A_{00}}{\pi_1}\right)^{\pi_1} \left(\frac{A_{11}}{\pi_2}\right)^{\pi_2} \left(\frac{A_{22}}{\pi_3}\right)^{\pi_3} \left(\frac{A_{33}}{\pi_4}\right)^{\pi_4} \left(\frac{A_{01}}{\pi_5}\right)^{\pi_5} \left(\frac{A_{02}}{\pi_6}\right)^{\pi_6} \left(\frac{A_{03}}{\pi_7}\right)^{\pi_7} \left(\frac{A_{12}}{\pi_8}\right)^{\pi_8} \left(\frac{A_{13}}{\pi_9}\right)^{\pi_9} \times \\ \times \left(\frac{A_{23}}{\pi_{10}}\right)^{\pi_{10}} \left(\frac{A_0}{\pi_{11}}\right)^{\pi_{11}} \left(\frac{A_1}{\pi_{12}}\right)^{\pi_{12}} \left(\frac{A_2}{\pi_{13}}\right)^{\pi_{13}} \left(\frac{A_3}{\pi_{14}}\right)^{\pi_{14}} \left(\frac{\pi_{15} + \pi_{16} + \pi_{17} + \pi_{18}}{G}\right)^{(\pi_{15} + \pi_{16} + \pi_{17} + \pi_{18})};$$

$$\Delta P_{\text{норм}} = d(\pi_i) = 14,79 \text{ МВт}.$$

Розрахуємо нормативне значення технічних втрат електроенергії за розрахунковий період методом середніх навантажень. Метод середніх навантажень полягає в розрахунку втрат електроенергії за формулою

$$\Delta W = k_{\text{л}} k_{\text{к}} \Delta P_{\text{ср}} T_j k_{\text{ф}}^2, \quad (8)$$

де $\Delta P_{\text{ср}}$ — втрати потужності в мережі для середніх за розрахунковий інтервал навантажень вузлів; $k_{\text{ф}}^2$ — коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий інтервал; $k_{\text{к}}$ — коефіцієнт, який враховує відмінність конфігурації графіків активного і реактивного на-

вантаження різних віток мережі; T_j — тривалість j -го розрахункового інтервалу, годин.

Коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий період розраховується з виразу

$$k_{\text{ф}}^2 = \sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i / (P_{\text{ср}}^2 T),$$

де P_i — значення навантаження на i -й ступені графіку навантаження тривалістю Δt_i , годин; m — число ступенів графіка за розрахунковий період; $P_{\text{ср}}$ — середнє навантаження мережі за розрахунковий період; i для схеми на 14 вузлів приймає значення 1,3.

Коефіцієнт $k_{\text{к}}$ приймається рівним 0,99, згідно з [7], $k_{\text{л}}$ — коефіцієнт, який враховує вплив втрат в арматурі повітряних ліній і приймає значення 1,02 згідно з [7]. Нормативне значення технічних втрат електроенергії за розрахунковий період — 1 година

$$\Delta W = 1,1 \cdot 0,99 \cdot 14,79226 \cdot 1 \cdot 1,3 = 19,16941 \text{ МВт}\cdot\text{год.}$$

Нормативне значення технічних втрат електроенергії за розрахунковий період — доба, дорівнює $\Delta W = 1,1 \cdot 0,99 \cdot 19,43045 \cdot 24 \cdot 1,3 = 614,479 \text{ МВт}\cdot\text{год.}$

Висновки

Запропоновано алгоритм розрахунку нормативного значення технічних втрат електроенергії критеріальним методом із застосуванням нейро-нечіткого моделювання, який базується на поданні впливних факторів у вигляді нечітких множин і визначенні базисних критеріїв подібності за допомогою функцій належності членів нормативної характеристики технічних втрат потужності відповідним множинам. Запропонований алгоритм може бути використаний для визначення нормативного значення технічних втрат в задачах оперативного керування нормальними режимами ЕЕС для забезпечення такого значення втрат електроенергії за звітний період, який не перевищує нормативний.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике / Юрий Николаевич Астахов, Петр Демьянович Лежнюк. — К. : УМК ВО, 1989. — 140 с.
2. Лежнюк П. Д. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод : навч. посіб. для студентів ВНЗ / П. Д. Лежнюк, С. В. Бевз. — Вінниця : ВДТУ, 1999. — 177 с.
3. Комар В. О. Критеріальне моделювання якості функціонування регулюючих пристроїв в задачах оптимального керування : дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / В'ячеслав Олександрович Комар. — Вінниця, 2003. — 148 с. — Бібліогр. : С. 114—123.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Александр Васильевич Леоненков. — С.-Пб. : «БХВ-Петербург», 2004. — 736 с. — ISBN 5-94157-087-2.
5. Железко Ю. С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях : руководство для практических расчётов / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. — М. : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2006. — 280 с. — ISBN 978-5-93196-910-7.
6. Методика визначення нормативу технічних втрат електроенергії в електричних мережах енергокомпаній України (Проект 21.02.2005) [Електронний ресурс] / [Потребич О. А., Дерзський В. Г., Коваленко Д. В. та ін.]. — Горлівка, 2004. — 50 с. — Режим доступу : <http://www.nerc.gov.ru/control/uk/archive/docvien>.
7. Методика расчёта нормативных технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям в базовом периоде. Приложение № 1 к Порядку расчёта и обоснования нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям [Електронний ресурс]. — Режим доступа : <http://www.minprom.gov.ru/ministry/dep/energy/docs/3/25/>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 23.02.11
Рекомендована до друку 9.03.11

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри, *Рубаненко Олена Олександрівна* — асистент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця