УДК 621.316

О. Ю. Петрушенко, асп.;
О. О. Рубаненко, канд. техн. наук

РОЗВ’ЯЗАННЯ ДВОЇСТОЇ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Запропоновано алгоритм розв’язання двоїстої задачі оптимального керування електричною системою зі застосуванням нейро-нечіткого моделювання. Цей алгоритм базується на представлені незалежних критеріїв подібності за допомогою функцій належності членів цільової функції (планових втрат потужності) відповідним множинам. Проаналізовано чутливість планового значення технічних втрат потужності до зміни значень цільової функції.

Вступ

Для підвищення ефективності оптимального керування електричною системою доцільно використовувати загальну методологічну базу і системний підхід на всіх етапах розв’язування задачі оптимального керування, починаючи з формування математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією оптимальних рішень. Достатньо продуктивним в цьому плані є використання узагальнюючих методів теорії подібності. Добре пристосованим для вирішення оптимізаційних завдань і аналізу отриманих результатів є критеріальний метод (КМ) [1, 2].

Але поки що залишається не повністю вирішеною проблема оптимального керування з використанням теорії подібності та її методів, зокрема КМ в умовах неповноти вихідних даних. Таким чином, *метою роботи* є підвищення ефективності процесу розв’язування оптимізаційних задач великої розмірності шляхом використання засобів нейро-нечіткого моделювання.

Двоїста задача оптимального керування електричною системою

Задача керування режимом ЕЕС може бути сформована в такому вигляді [1, 2]:
мінімізувати:

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

за умов
$$q_k(x)=\sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} a_i\prod_{j=1}^{n} x_j^{\alpha_{ji}}\le G_k,\ k=\overline{1,p};\quad x_j\rangle\ 0,\ j=\overline{1,n}, \qquad (2)$$

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; mk — кількість членів k-го обмеження; p — кількість обмежень.

Відповідна (1) двоїста задача може бути сформульована таким чином [2, 3]:
максимізувати

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

за умов, які представлені у вигляді ортонормованої системи рівнянь:

$$\begin{vmatrix}\alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m_1} & \alpha_{1m_1+1} & \alpha_{1m_1+2} & \dots & \alpha_{1m}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m_1} & \alpha_{2m_1+1} & \alpha_{2m_1+2} & \dots & \alpha_{2m}\\ \dots & \dots & \dots & \dots & \alpha_{3m_1+1} & \alpha_{3m_1+2} & \dots & \alpha_{3m}\\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nm_1} & \alpha_{nm_1+1} & \alpha_{nm_1+2} & \dots & \alpha_{nm}\\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0\end{vmatrix}\cdot\begin{vmatrix}\pi_1\\ \pi_2\\ \pi_3\\ \dots\\ \pi_m\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}0\\0\\0\\ \dots\\ 1\end{vmatrix}. \qquad (4)$$

де $m_1 + 1$; $m_1 + 2$ і т. ін. — індекси членів системи рівнянь (4), які відповідають членам обмежень (2).

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. В усіх інших випадках система рівнянь невизначена або має безліч розв'язків. Розв'язувати задачу визначення оптимальних параметрів нормального режиму і формування керувальних впливів, доводиться з мірою складності $t = m - n - 1 \geq 1$. Тут розглядаються задачі, коли матриця α є виродженою прямокутної форми і система рівнянь (4) невизначена. Очевидно, що розв'язків системи (4) буде безліч або взагалі не існуватиме. Проте використовуючи сингулярний розклад матриці α = SVD та його властивості, щодо здатності показувати ранг матриці, відшукання псевдоoберненої матриці до α та зменшення розмірності даної матриці дана задача стає розв'язуваною. Однак процес знаходження оптимального розв'язку в даному випадку є досить ресурсоємним.

Процес виділення можна виконувати за такою схемою: використовуючи SVD розклад матриці α, відшукати базис, а саме кількість базисних змінних; шляхом вибірки виконувати виділення залежних змінних через незалежні, знайти оптимальний розв'язок системи (4). Проте процедура перебору всіх можливих комбінацій відносно критеріїв подібності становить $2m$ і вимагає чимало часу на обчислення, що не задовольняє умови оперативного керування.

Розглянемо задачу міри складності: $t \geq 1$. В [2] показано, що критерії подібності, які описуються системою ортонормованих рівнянь (4), визначаються:

$$\pi_i = \beta_{oi} + \sum_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \pi_{Бb}, \quad i = \overline{1,m}, \tag{5}$$

де β_{oi} — елемент вектору нормалізації; β_{ib} — елемент вектору нев'язки; $\pi_{Бb}$ — базисні (незалежні) критерії подібності; $t = m - n - 1$ — міра складності задачі КП.

Розв'язання задач великої міри складності КП методами нейронечіткого моделювання

Функції належності μ в теорії нечітких множин та критерії подібності в теорії подібності є безрозмірними співвідношеннями [2, 4] параметрів системи. Функція належності і критерії подібності змінюються від 0 до 1. Отже між ними є певна аналогія. Схожість функції належності і критерію подібності дозволяє використовувати функції належності при визначенні критеріїв подібності для знаходження оптимізуючого вектора критеріїв подібності в задачах великої міри складності. В умовах невизначеності пропонується записати критерії подібності (5) з використанням функцій належності для базисних критеріїв подібності [5]:

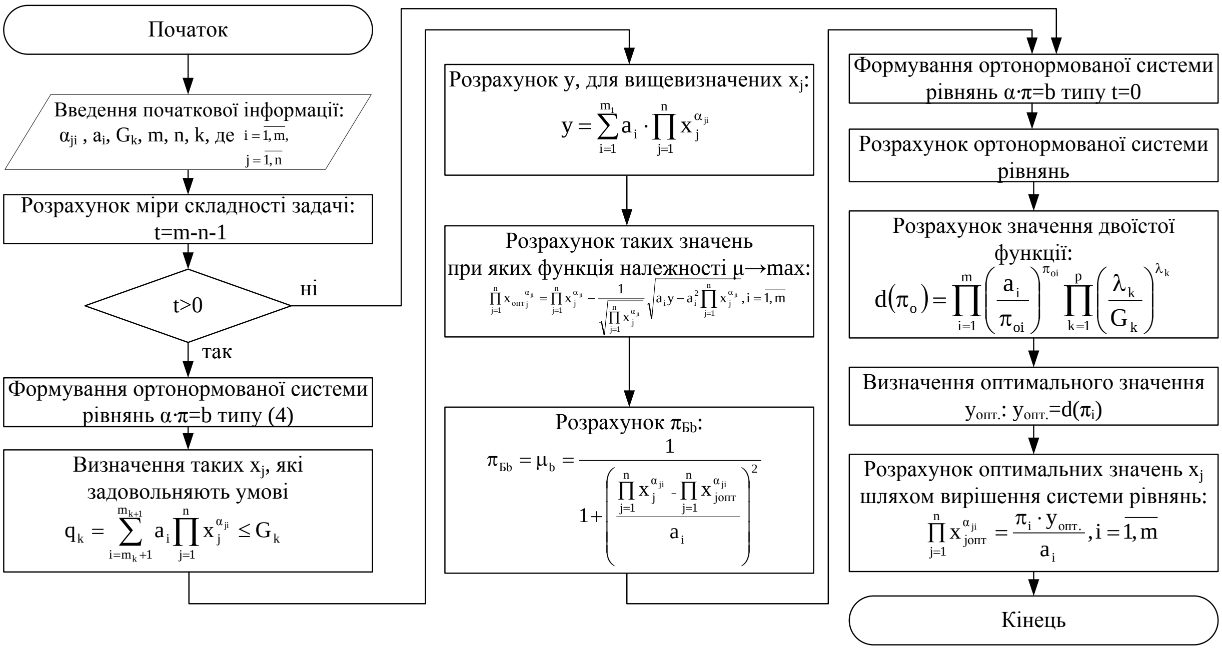
$$\pi_i = \beta_{oi} + \sum_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \mu_b, \quad i = \overline{1,m}, \tag{6}$$

де μ_b — функції належності для базисних критеріїв подібності. Якщо записати критерії подібності як функції належності для базисних критеріїв подібності, то двоїста функція перепишеться в такому вигляді:

$$d(\mu_b) = \prod_{i=1}^{m} \left(\frac{a_i}{\beta_{oi} + \sum\limits_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \mu_b} \right)^{\beta_{oi} + \sum\limits_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \mu_b} \prod_{k=1}^{p} \left(\sum_{i \in T_k} \left(\beta_{oi} + \sum_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \mu_b \right) \right)^{\sum\limits_{i \in T_k} \left(\beta_{oi} + \sum\limits_{b=1}^{t} \beta_{ib} \cdot \mu_b \right)}. \tag{7}$$

Для визначення незалежних (базисних) критеріїв подібності, в залежності від набору початкових даних, запропоновано:

1. Незалежні критерії подібності представляти за допомогою функцій належності (рис.). До переваг першого методу можна віднести можливість швидкого визначення значень параметрів функцій належності і простоту визначення базисних критеріїв подібності. Завдяки цьому даний метод може легко реалізуватись у вигляді програми. До недоліків даного методу можна віднести складність вибору типу функції належності критерію подібності.



Алгоритм розв’язання двоїстої задачі оптимального керування електричною системою з застосуванням нейро-нечіткого моделювання

2. Незалежні критерії подібності представляти за допомогою нечітких критеріїв подібності. Даний метод визначення базисних критеріїв подібності значно спрощує розрахунок за умов невизначеності у вихідних даних. Перевага даного методу полягає в простому і швидкому знаходженні значень функції належності, а тому і значень базисних критеріїв подібності, а недолік — в складностях з вибором оптимальної функції належності.

Перевага надається тому значенню нечіткого критерію подібності у якого функція належності має максимальне значення. Метод використовується, коли є достатня вибірка вихідних значень базисних критеріїв подібності для навчання нечіткої моделі за алгоритмом Сугено. Перевагою методу є можливість використання існуючих програмних засобів (наприклад, MATLAB) з метою автоматизації процесу визначення оптимальних параметрів функції належності, а недоліком — необхідність в великій кількості вихідних значень базисних критеріїв подібності для зменшення похибки навчання нечіткої моделі базисних критеріїв за алгоритмом Сугено.

3. Незалежні критерії подібності представляти за допомогою нечітких множин критеріїв подібності. До переваг даного методу відноситься можливість врахування досвіду експертів. До недоліків відноситься потреба уточнювати отриманий розв’язок методами дихотомії, золотого перерізу та ін.

Аналіз чутливості цільової функції (прямої задачі)до варіювання значень її членів

Для того, щоб вибрати які критерії подібності приймати в якості незалежних критеріїв подібності, проаналізуємо чутливість цільової функції (прямої задачі) до варіювання її членів на прикладі розрахунку значення планових втрат потужності для схеми IEEE на 14 вузлів.

$$\Delta P_{\text{план}} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \geq 1}^{n} A_{ij} \cdot P_i P_j + \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot P_i \tag{8}$$

для 4-х впливових факторів запишеться: мінімізувати

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{норм}} = {} & A_{11}P_1^2 + A_{22}P_2^2 + A_{33}P_3^2 + A_{44}P_4^2 + A_{12}P_1P_2 + A_{13}P_1P_3 + A_{14}P_1P_4 + \\ & + A_{23}P_2P_3 + A_{24}P_2P_4 + A_{34}P_3P_4 + B_1P_1 + B_2P_2 + B_3P_3 + B_4P_4 \end{aligned} \tag{9}$$

за умов $\frac{P_1}{P_1P_2} + \frac{P_2}{P_1P_2} + \frac{P_3}{P_1P_2} + \frac{P_4}{P_1P_2} \leq P_c$; $P_1,\ P_2,\ P_3,\ P_4\ \rangle\ 0$, де $P_c = \frac{P_1}{\Delta P^2}$.

Запишемо ортонормовану систему рівнянь

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

Міра складності задачі t = 13.

Функція планових втрат потужності, розкладена в ряд Тейлора

$$\Delta P_{\text{план}}\left(P_iP_j, P_i\right) \approx \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_iP_j\right)^0, P_i^0\right) + \frac{\partial \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_1P_1\right)^0\right)}{\left(P_1P_1\right)}\Delta P_1P_1 + \frac{\partial \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_2P_2\right)^0\right)}{\left(P_2P_2\right)}\Delta P_2P_2 +$$

$$+\frac{\partial \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_3P_3\right)^0\right)}{\left(P_3P_3\right)}\Delta P_3P_3 + \ldots + \frac{\partial \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_iP_j\right)^0 P_i^0\right)}{\left(\left(P_iP_j\right), P_i\right)}\left(\Delta P_iP_j, \ \Delta P_i\right),$$

де $\Delta P_iP_j = P_iP_j - \left(P_iP_j\right)^0$; $\Delta P_i = P_i - P_i^0$. Тоді

$$\Delta P_{\text{план}}\left(P_iP_j, \ P_i\right) = \Delta P_{\text{план}}\left(P_iP_j, \ P_i\right) - \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_iP_j\right)^0, \ P_i^0\right) \approx \frac{\partial \Delta P_{\text{план}}\left(P_iP_j, \ P_i\right)}{\partial\left(\left(P_iP_j\right)^0, \ P_i^0\right)}\left(\Delta P_iP_j, \Delta P_i\right).$$

Коефіцієнти чутливості планових втрат потужності до зміни членів функції розраховуються за виразом

$$s_i = \frac{\partial \, \Delta P_{\text{план}}\left(\left(P_iP_j\right)^0, P_i^0\right)}{\partial\left(P_iP_j\right), P_i\right)} = \frac{\delta P_{\text{план}}\left(P_iP_j, \ P_i\right)}{\left(\Delta P_iP_j\right), \ \Delta P_i\right)}. \tag{11}$$

Розроблені алгоритми використані для розв’язування задачі визначення планового значення технічних втрат потужності, зокрема для тестової схеми електричної мережі 110…220 кВ IEEE та схем реальних енергосистем. Проаналізована чутливість цільової функції планового значення втрат потужності до зміни членів цільової функції. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих алгоритмів: відносна похибка визначення планового значення технічних втрат потужності зменшилась на 5…8 %.

Висновки

Запропоновано алгоритм розв’язання двоїстої задачі оптимального керування електричною системою зі застосуванням нейро-нечіткого моделювання. Цей алгоритм базується на представлені незалежних критеріїв подібності за допомогою функцій належності членів цільової функції (планових втрат потужності) відповідним множинам. Проаналізовано чутливість планового значення технічних втрат потужності до зміни значень цільової функції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Астахов Ю. Н. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 5. — С. 3—11.
2. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк. — К. : УМК ВО, 1989. — 140 с.
3. Лежнюк П. Д. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод : навч. посіб. / П. Д. Лежнюк, С. В. Бевз. — Вінниця : ВДТУ, 1999. — 177 с.
4. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О. П. Ротштейн. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 320 с.
5. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з урахуванням планового значення технічних втрат потужності / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. — 2011. — № 1. — С. 192—193.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 11.11.11

Петрушенко Олег Юрійович — аспірант, ***Рубаненко Олена Олександрівна*** — асистент.

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