

П. Д. Лежнюк, д-р. техн. наук, проф.;
Н. В. Остра, канд. техн. наук, доц.;
О. Є. Рубаненко, канд. техн. наук, доц.

ОЦІНЮВАННЯ ЧУТЛИВОСТІ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ В ЗАДАЧАХ ВЕЛИКОЇ МІРИ СКЛАДНОСТІ

Запропоновано метод оцінювання чутливості критеріїв оптимальності зі застосуванням нейро-нечіткого моделювання в умовах задач великої міри складності. Обґрунтовано можливість і доцільність використання запропонованого методу для знаходження чутливості загальносистемного показника втрат електричної потужності з урахуванням залишкового ресурсу трансформаторів.

Вступ

Сучасний розвиток науки і техніки ініціює нові задачі в галузі керування складними системами. Завдяки появі нових можливостей обчислювальної та мікропроцесорної техніки стає реальним автоматизувати оптимальне керування станами складних динамічних систем таких, наприклад, як електроенергетичні, які розподілені на великій території, характеризуються складною просторово-часовою структурою керування і для яких характерні часті та швидкі зміни станів.

Ефективність оптимального керування нормальними режимами електроенергетичних систем істотно залежить від правильності вибору складу регулювальних пристроїв та від використання їх у відповідності з функціональними можливостями (регулювальним ефектом, залишковим ресурсом). Для цього необхідно відповідним чином задати режим роботи системи автоматичного керування напругою і потоками потужності в електроенергетичних системах (ЕЕС). Параметри систем автоматичного керування визначаються за результатами аналізу та оцінки чутливості оптимальних режимів ЕЕС до зміни цих параметрів. Наприклад, залежність чутливості загальносистемних втрат потужності від зміни коефіцієнтів трансформації регуляторів під напругою (РПН) трансформаторів.

Дослідження доцільності використання критеріального моделювання в процесі керування режимами ЕЕС

Подібність оптимальних станів ЕЕС дає можливість використовувати для оптимального керування її режимами апарат критеріального аналізу [1]. В результаті критеріального аналізу визначається чутливість математичної моделі оптимального розв'язку, встановлюються припустимі області оптимальних розв'язків, а при необхідності визначаються налагоджувальні параметри систем автоматичного керування (САК), за допомогою яких здійснюється оптимальне керування. Для розв'язку цих задач критеріального аналізу необхідно одержати узагальнені характеристики або критеріальні моделі, що пов'язують загальносистемний критерій оптимальності F з параметрами, які визначають стани системи (вектор стану \mathbf{x}) і оптимізують їх за допомогою регуляторів РПН трансформаторів (вектор керування \mathbf{u}), а також розробити алгоритми їх застосування.

Критеріальні моделі, що розглядаються, на відміну від відомих стохастичних, ґрунтуються на фізичних міркуваннях і положеннях теорії подібності. Такі моделі системи дають узагальнену, поширену на ряд станів, оцінку результатів, дозволяють виявити основні і відсіяти другорядні фактори [1]. Нарешті, за їх допомогою можна отримати відповідні критерії оптимальності, співставлення з якими параметрів існуючих режимів дозволяє оперативно виявляти нераціонально експлуатовані ділянки або елементи системи. При цьому початкові моделі можуть бути значно спрощені.

Задача оптимального керування нормальними режимами ЕЕС може бути в загальному випадку сформульована як задача теорії оптимального керування з квадратичним критерієм якості — мінімізувати функцію керування

$$F_{\Sigma} = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}_t(t) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_t(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}(t)] dt \quad (1)$$

за умов

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t); \\ x(t_0) &= x_0; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t), \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ — відповідно вектори стану, керування та спостереження; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} — матриці констант; \mathbf{Q} , \mathbf{R} — симетричні вагові матриці, що не залежать від часу; t_0 , t_k — фіксовані моменти часу.

Застосування цієї постановки задачі оптимізації до проблеми автоматичного керування потоко-розподілом в ЕЕС дозволяє визначити сутність векторів стану, спостереження та керування в залежності від значень складових вектора струмів у вузлах ЕЕС; діагональної матриці вузлових напруг; вектора потужностей у вузлах; вектора струмів у вітках ЕЕС; вектора напруг вузлів відносно базисного; напруги базисного вузла; вектора напруг вузлів; вектора коефіцієнтів трансформації трансформаторів, якими вводяться зрівнювальні е. р. с. в замкнені контури схеми ЕЕС; вектора навантажень джерел реактивної потужності; векторів потужностей та струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевимірювання.

Зв'язок критерію оптимальності у відповідності до (1) визначається впливом параметрів стану на складову $F_1(t)$ та параметрів керування на складову $F_2(t)$ та, відповідно до задачі (1), в загальному вигляді, записується, як (3)

$$F_{\Sigma}(t) = F_1(t) + F_2(t), \quad (3)$$

де $F_1 = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}_t(t) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(t)] dt$; $F_{\Sigma} = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{u}_t(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t)] dt$, тоді $F_1(t) = \mathbf{x}_t(t) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(t)$ та

$$F_2(t) = \mathbf{u}_t(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t) \quad \text{або} \quad F_1 = \mathbf{x}_t \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} \quad \text{та} \quad F_2 = \mathbf{u}_t \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

де \mathbf{u} — вектор керуючих параметрів, які можуть бути характеристиками дуг або вершин графа топологічної моделі досліджуваної системи; \mathbf{R} — діагональна або симетрична матриця коефіцієнтів.

В [1] розкрито суть аналізу чутливості оптимальних рішень за допомогою критеріальних моделей, де виділені дві задачі чутливості: пряма — коли встановлюється міра зміни функції при відхиленні аргументу від його базисного (оптимального) значення, і зворотна — коли виявляється можлива область відхилення параметрів від їх базисних значень при заданій величині зміни функції. Розглянемо тепер розв'язування прямої задачі чутливості на основі критеріального моделювання.

Визначення критеріїв оптимальності в умовах задач великої міри складності

Початкова модель, що встановлює зв'язки між параметрами процесу керування і параметрами елементів ЕЕС, в якій відбувається цей процес, має вигляд

$$F_2(u) = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}, \quad (5)$$

де $F_2(u)$ — цільова функція (деякий узагальнений техніко-економічний показник); a_i , α_{ji} — постійні коефіцієнти, які визначаються властивостями системи; u_j — змінні параметри системи; m_1 — кількість додатків в цільовій функції; n — кількість змінних.

Оптимальні значення величин F_2 , u_j позначимо F_{2o} , u_{jo} . Тоді:

$$F_2 = F_{2*} \cdot F_{2o}, \quad u_j = u_{j*} \cdot u_{jo}, \quad (6)$$

де $F_{2*} = F_2/F_{20}$; $u_{j*} = u_j/u_{j0}$ — відносні значення параметрів.

Підставивши (6) в (5), отримаємо:

$$F_{2*} \cdot F_{20} = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \prod_{j=1}^n u_{j*}^{\alpha_{ji}} u_{j0}^{\alpha_{ji}}.$$

Виконавши тотожне перетворення і ввівши заміну

$$\pi_{io} = \frac{a_i \prod_{j=1}^n u_{j0}^{\alpha_{ji}}}{F_{20}}, \quad (7)$$

отримуємо таку критеріальну форму:

$$F_{2*} = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i \prod_{j=1}^n u_{j*}^{\alpha_{ji}}, \quad (8)$$

яку покладемо в основу алгоритму розв'язування прямої задачі чутливості.

У випадку розв'язування прямої задачі чутливості встановлюється зміна функції ΔF_{2*} при відхиленні аргументу на Δu_* від його оптимального значення, а також коли є нечіткість у визначенні коефіцієнтів \tilde{a}_i початкової моделі (5). Останні в (8) входять через критерії подібності π_i .

Тут варто розглянути два випадки, характерних для критеріального методу [1]. Перший, коли $m_1 - n - 1 = 0$, тобто сумарна кількість додатків m_1 математичної моделі (5) на одиницю більше кількості змінних n . В цьому випадку значення критеріїв подібності визначаються з ортонормованої системи рівнянь [1]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \pi_i &= 0; & j &= \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

З урахуванням того, що в критеріальній моделі за базисні приймаються оптимальні значення параметрів і $u_{*0} = 1$:

$$F_{2*} (1 + \Delta u_*) = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i \prod_{j=1}^n (1 + \Delta u_{*j})^{\alpha_{ji}}.$$

З останнього виразу випливає, що показник чутливості цільової функції знаходиться за виразом:

$$\Delta F_{2*} = \sum_{i=1}^{m_1} c_i \pi_i - 1, \quad (10)$$

$$\text{де } c_i = \prod_{j=1}^n (1 + \Delta u_{*j})^{\alpha_{ji}}.$$

Таким чином, (10) дозволяє однозначно одержати значення ΔF_{2*} для заданого Δu_* . Використовуючи розв'язок прямої задачі чутливості при відхиленні u_* на Δu_* в одну та іншу сторони від оптимального значення, отримуємо додаткові зміни ΔF_{2*}^+ і ΔF_{2*}^- .

Розглянемо розв'язання рівняння (10) за умови, що попередньо потрібно знайти значення коефіцієнтів a_i в (5), однак, якщо кількість додатків більше ніж на 1 перевищує кількість невідомих u_j , то задача пошуку розв'язку (10) відноситься до задач великої міри складності.

Для того щоб знайти ΔF_{2*} , пропонуємо використати метод нейро-нечіткого моделювання у відповідності до алгоритму, який запропонований в [2]. Тому розрахуємо базисні критерії подібності π_i з використанням функцій належності. Для побудови функцій належності скористаємось моделлю нечіткого висновку Сугено. Модель Сугено передбачає наявність вибірки початкових даних, тому формуємо вибірки початкових даних, де входами будуть аргументи цільової функції — еле-

менти вектора \mathbf{u} : $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$, а виходом моделі будуть значення цільової функції — втрати активної потужності, розраховані в програмі ГрафСКАНЕР для різних значень впливових факторів. Кожний з впливових факторів подається у вигляді нечітких множин.

Нечітка множина можливих значень кожного з членів цільової функції містить нечіткі множини: «великі значення», «середні значення» і «малі значення». Тому для побудови структури нейронної мережі кожний з впливових факторів має по три терми «великі значення», «середні значення» і «малі значення». Для елементів нечіткої множини «великі значення» пропонуємо Z-подібну функцію належності, «середні значення» дзвоноподібну, «малі значення» — S-подібну. Сформувавши навчальну вибірку у вигляді таблиці початкових даних, визначимо параметри вибраних функцій належності за допомогою програмного комплексу MATLAB.

Знаючи значення елементів вектора \mathbf{u} , можна знайти відповідні їм значення функцій належності. Як запропоновано в [2], скористаємось значенням функції належності для розрахунку оптимальних критеріїв подібності. Знайдемо максимальні значення функцій належності для всіх складових характеристики — членів цільової функції (10). Пронормуємо значення функцій належності до одиниці і отримаємо оптимальні значення базисних критеріїв подібності $\pi_{i6,0}$ для членів цільової функції.

Знаючи оптимальні значення базисних критеріїв подібності з (7), розрахуємо значення коефіцієнтів a_i з виразу

$$a_i = \frac{\pi_{i6,0} \cdot F_{26}}{\prod_{j=1}^n u_i^{\alpha_{j,i}}}. \quad (11)$$

Розрахувавши базисні критерії подібності, розв'язуємо ортонормовану систему рівнянь і знаходимо оптимальні значення інших критеріїв подібності (для обмежень).

Використовуючи розраховані значення коефіцієнтів a_i і π_i , знаходимо оптимальне значення двоїстої функції, яке дорівнює шуканому значенню цільової функції F_2 . Далі знаходимо чутливість ΔF_{2*} до зміни Δu_{2*} .

В умовах використання в ЕЕС трансформаторів і автотрансформаторів, термін експлуатації яких перевищує паспортний термін (25 років), пропонуємо враховувати, визначений в умовах неповноти даних, коефіцієнт їх загального залишкового ресурсу (k_{pec}) в задачах ранжування трансформаторів за ефективністю їх впливу на цільову функцію загальносистемних втрат потужності в умовах оперативного керування нормальними режимами. k_{pec} є безрозмірною величиною і може набувати значень від нуля (залишковий ресурс відсутній) до одиниці (максимальне значення). Проблема визначення поточного залишкового ресурсу трансформатора полягає у відсутності значень всіх потрібних для цього діагностичних параметрів. Тому пропонуємо [3] знаходити k_{pec} з використанням алгоритму нечіткого моделювання Сугено, який передбачає (на основі раніше створеної і скорегованої експертами вибірки навчальних даних, що встановлює зв'язок між пронормованими до одиниці значеннями коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з діагностичних параметрів і k_{pec}) навчання нечіткої моделі k_{pec} , розрахунок і оптимізацію параметрів і значень функцій належності значень діагностичних параметрів до нечітких множин значень цих параметрів.

Чутливість цільової функції загальносистемних втрат потужності $\Delta F'_{2i}(\Delta u_i)$ до зміни значення i -го параметра вектора керування з урахуванням коефіцієнта залишкового ресурсу i -го трансформатора знаходиться з виразу

$$\Delta F'_{2i} = k_{pec i} \Delta F'_{2i}. \quad (12)$$

Отримані у відповідності до (12) значення є елементами вектора чутливості $\Delta \mathbf{F}'_{2i}(\Delta \mathbf{u})$. Елемент цього вектора, який має максимальне значення відповідає трансформатору, яким потрібно здійснювати коригувальні впливи.

Таким чином, використання методів критеріального програмування і нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати трансформатор, яким потрібно здійснювати керування параметрами нормального режиму з урахуванням його технічного стану в поточний момент.

Висновок

Запропоновано метод оцінювання чутливості критеріїв оптимальності шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати чутливість втрат електричної потужності в умовах задач великої міри складності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Оцінювання чутливості оптимального керування режимами електроенергетичних систем критеріальним методом : моног. / П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра, В. Ц. Зелінський. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 131 с.
2. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з урахуванням планового значення технічних втрат потужності / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 1. — С. 86—90.
3. Рубаненко О. Є. Діагностування обладнання в умовах неповноти вихідних даних / О. Є. Рубаненко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / Електротехніка і електроенергетика. — 2011. — Вип. 11. — С. 319—323.

Рекомендована кафедрою електричні станції та системи

Стаття надійшла до редакції 20.10.11

Рекомендована до друку 25.11.11

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри, *Остра Наталя Вікторівна* — доцент, *Рубаненко Олександр Євгенійович* — доцент.

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