

СИСТЕМИ ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЬ В ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС

© Лежнюк П.Д., Бевз С.В., 2000

Вінницький державний технічний університет, кафедра електричних станцій та систем

Розглянуто особливості і переваги застосування систем відносних одиниць при автоматизації оптимального керування режимами ЕЕС.

The peculiarities and advantages of relative units system for optimal energy grids modes controlling automation have been considered.

Одним з резервів, який дозволяє суттєво знизити рівень втрат в електроенергетичній системі (ЕЕС) та підвищити ефективність використання трансформаторів та автотрансформаторів з РПН є автоматизація оптимального керування [1, 2]. Вона забезпечує також достатні умови практичної реалізації організаційних заходів по зменшенню втрат електричної енергії, що не вимагають значних капіталовкладень. Для підвищення ефективності оптимізаційних заходів необхідно здійснювати корекцію нормального режиму (НР) ЕЕС в темпі процесу. При цьому слід враховувати надійність роботи трансформаторів з РПН та доцільність їх використання на визначеному етапі керування. З метою поширення результатів розрахунку на низку подібних явищ доцільно проводити обробку результатів дослідження в узагальненому вигляді. Ці та інші аспекти задач оптимального керування НР ЕЕС вимагають використання єдиної методологічної бази та системного підходу на всіх етапах розв'язання задачі оптимального керування, починаючи із формування математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією оптимальних рішень. Проте досить часто в оптимальному керуванні відсутня така уніфікація. Найбільш продуктивним у цьому плані виявляється застосування узагальнюючих методів теорії подібності і моделювання на всіх рівнях вирішення даної проблеми. Ці методи дозволяють визначити стійкі зв'язки в системі керування і подати їх у відносних одиницях у вигляді критеріальних співвідношень, яким властива достатня узагальненість [3]. За цих обставин деякі зміни розрахункових умов не вимагають багаторазових повторень розрахунків, що дозволяє суттєво зменшити час генерації керувальних впливів і є одним з визначальних факторів при розв'язанні задач оперативного керування, яке здійснюється в темпі процесу. Це особливо важливо для електроенергетичних систем, де вимагається підтримання миттєвого балансу потужності.

Одним з найбільш пристосованих до розв'язання такого типу задач і аналізу отриманих результатів є критеріальних метод (КМ) [4], який дозволяє вирішувати проблеми оптимального керування в одній з розроблених систем відносних одиниць (СВО). Засобами КМ не лише встановлюються оптимальні параметри об'єктів та процесів, а й виявляються аналітичні зв'язки між критерієм оптимальності й оптимізованими параметрами системи, які можна модифікувати дуже широко, в тому числі і як закони оптимального керування. Важливо відзначити й те, що

використовуючи СВО на ґрунті критеріального методу задача не формалізується, а розкриваються фізичні причини неоптимальності, що сприяє ефективному її розв'язанню. Специфічною особливістю КМ з огляду на процес оптимального керування виступає той доконаний факт, що КМ є штучно адаптованим до розв'язання вищезгаданих задач, його розвиток має об'єктивне підґрунтя і визначається послідовним аналізом нових проявів у процесі оптимального керування. Причинно-наслідкові конструкції даного методу формуються з використанням різних систем відносних одиниць. За базис завжди приймається оптимальний варіант.

Задача оптимального керування ставиться як задача визначення допустимого керування з квадратичним критерієм якості [5], розв'язок якої може бути поданим у вигляді закону оптимального керування [6, 7]:

$$u_*(t) = -\pi y_*(t), \quad (1)$$

за умов

$$u_*(t) \in 1 + \delta u_*, \quad (2)$$

де $u_*(t)$ - вектор керування у відносних одиницях; $y_*(t)$ - відносні значення вектора спостереження ЕЕС; π - матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку, за своїм фізичним змістом – критерій подібності оптимальних режимів ЕЕС; δu_* - область нечутливості (оптимальності) параметрів керування, верхня u_*^+ та нижня u_*^- межі якої визначаються з аналізу критеріальних залежностей, що характеризують НР ЕЕС (рис. 1,а).

В даній моделі

$$u(t) = \begin{bmatrix} \dot{k}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_B(t) \\ \dot{I}_B(t) \\ \dot{U}(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\dot{k}(t)$ - вектор комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторів; $Q(t)$ - вектор навантаження джерел реактивної потужності (ДРП); $\dot{S}_B(t)$, $\dot{I}_B(t)$ - вектори потужностей і струмів у вітках ЕЕС; $\dot{U}(t)$ — вектор напруг у вузлах.

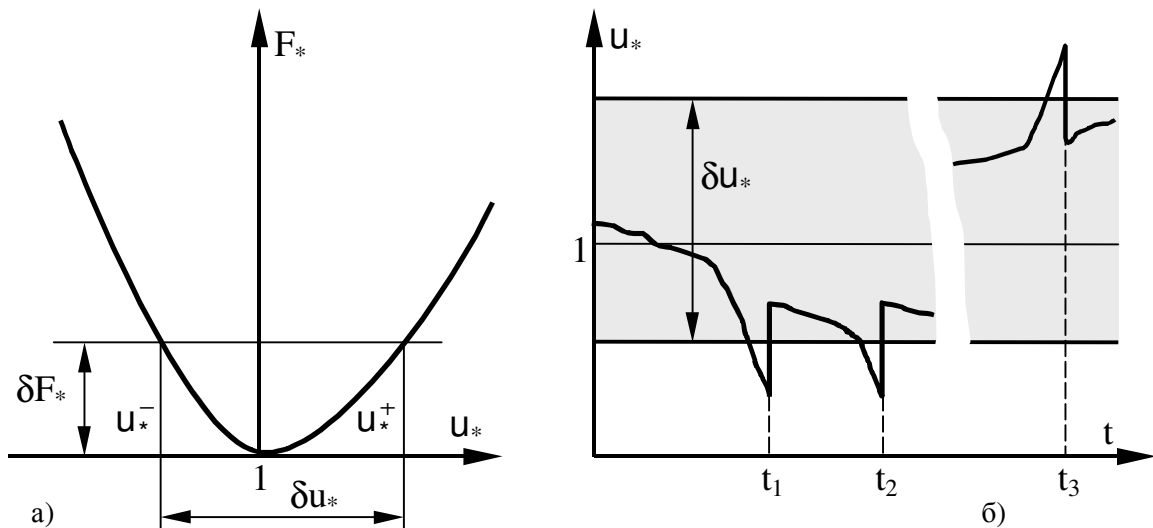


Рис. 1. Оптимальне керування з використанням критеріальних залежностей.

Задача оптимального керування НР ЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення критерію оптимальності F^* (рис. 1,а) у встановленій області оптимальності δF^* . Для цього необхідно підтримувати значення складових вектора керування в зоні нечутливості δu^* . При виході з неї (на рис. 1,б це моменти часу t_1, t_2, t_3) повинні здійснюватися керувальні впливи регулювальними пристроями (РП).

Детермінізація параметрів закону керування у критеріальній формі відбувається в результаті переходу від часткових залежностей до узагальнених залежностей систем відносних одиниць. Це перетворення дозволяє зіставляти, синтезувати результати досліджень, поширювати їх на низку подібних випадків. Таке перетворення обумовлене тим, що кореляція основних фізичних ефектів, які визначають розвиток явища для групи подібних явищ однакова, а всі їх кількісні ознаки, виражені у відносній формі, тотожні.

Слід зауважити, що перехід до однієї із запропонованих СВО докорінно змінює характер дослідження: відмовляючись від початкових і обираючи нові безрозмірні величини, дослідник по-новому інтерпретує конкретне явище, розглядаючи його з позиції генералізації змінних, втрачаючи при цьому можливість фіксувати численні особливості конкретного процесу. На перший погляд узагальнені змінні являють собою досить прості вирази. Проте ця простота лише зовнішня. Адже в принцип їх побудови вкладена важлива ідея, яка полягає в угрупованні величин, які утворюють узагальнені змінні.

Критерії подібності не є самостійними факторами, оскільки вони об'єднують низку постійних і змінних параметрів, які визначають властивості процесу. Таке угруповання параметрів вносить важливі переваги [3]. Передусім – це зменшення кількості змінних і значне спрощення зв'язків між ними, що помітно полегшує обробку аналітичних та експериментальних досліджень. Крім того, критерії подібності акумулюють сукупність факторів-складників характеристики процесу, їх внутрішні зв'язки і впливи, які можуть самоскомпенсуватися і видозмінюватися в межах одного комплексу. Існує багато шляхів отримання узагальнених критеріїв подібності, що відкриває широкі перспективи перед дослідником і дозволяє визначити парадигму різних випадків, об'єднаних загальними властивостями [3, 4].

Специфічною особливістю процесу керування є кількісне вираження математичної моделі (подання закону керування як критеріального співвідношення). Звідси необхідність використання систем відносних одиниць критеріального моделювання на всіх рівнях розв'язання проблеми оптимального керування НР ЕС. При чому на різних етапах розв'язання даної проблеми можуть використовуватись критеріальні моделі однієї чи декількох СВО. На рис.2 подана класифікація можливих СВО, показані їх особливості і області застосування. Розглянемо їх детальніше.

СВО розроблені стосовно задачі оптимального керування НР ЕС, яка у загальному випадку зводиться до поліноміальних функцій виду [8]:

мінімізувати

$$F(u) = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}, \quad (4)$$

за умов

$$g_k = \sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}} \leq 1, \quad k = \overline{1, p}, \quad u_j > 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

де $F(u)$ - деякий узагальнений техніко-економічний показник; a_i, α_{ji} - сталі коефіцієнти, які визначаються властивостями системи; m_1 - кількість членів цільової функції моделі; n - кількість змінних; m - кількість членів математичної моделі; p - кількість обмежень в математичній моделі.

Залежно від особливості поставленої задачі для її розв'язання можна послуговуватись тією чи іншою СВО, що передбачає перехід до безрозмірної форми запису. Тому розділивши рівняння (4) на базисне значення і ввівши позначення безрозмірних відношень базисних величин через критерії подібності

$$\pi_{i\delta} = \frac{a_i}{F_0} \prod_{j=1}^n u_{j\delta}^{\alpha_{ji}},$$

отримаємо критеріальне рівняння евристичної СВО:

$$F_* = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_{i\delta} \prod_{j=1}^n u_{j*}^{\alpha_{ji}}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_{i\delta} = 1, \quad (7)$$

де $F_* = F/F_0$, $u_{j*} = u_j/u_{j\delta}$ - відношення керувальних параметрів до їх базових значень.

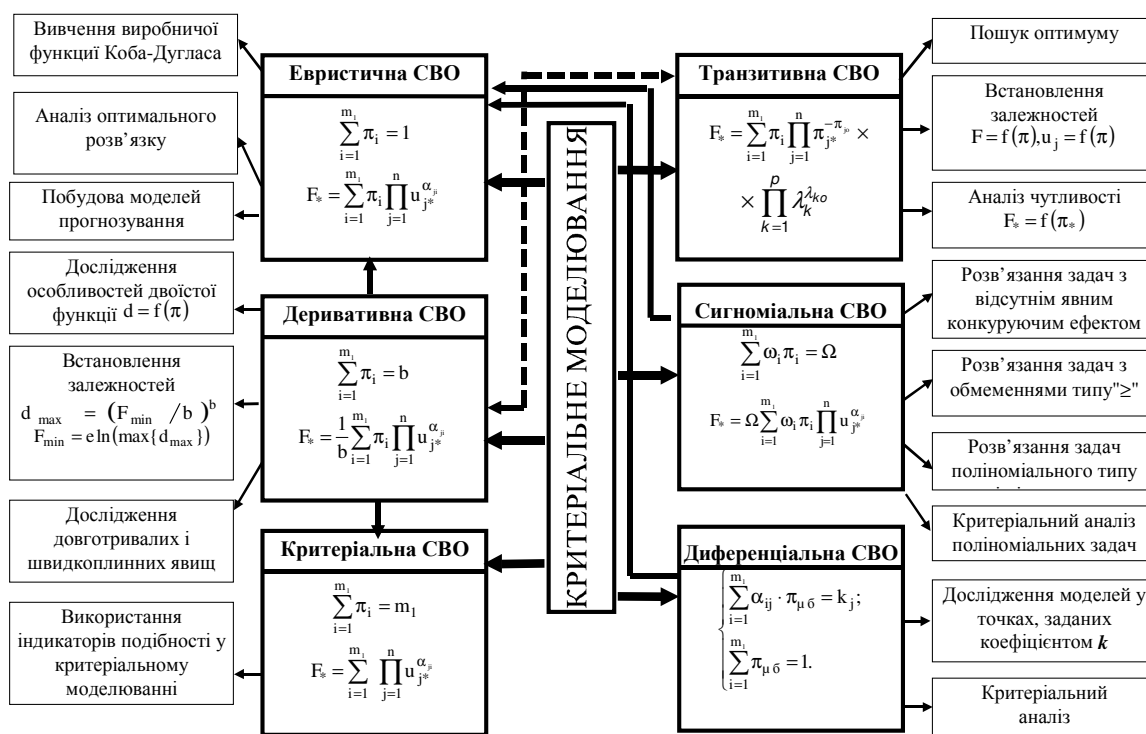


Рис. 2. Системи відносних одиниць.

За допомогою (6) визначається відносна зміна F при відхиленні параметрів u_j від базису. За базис може бути прийнята точка оптимуму чи будь-яка інша. Тобто в цій точці може бути досліджена чутливість. З метою підвищення ефективності керування доцільно формувати керувальні впливи, враховуючи інформацією про динаміку процесу. Для потреб оптимального керування використовуючи критеріальні моделі евристичної СВО розроблено метод критеріального прогнозування [9]. Він уможлиблює побудову багатофакторних та однофакторних моделей прогнозування. Таким чином, евристична СВО дозволяє розв'язувати задачі оптимізації, проводити критеріальний аналіз отриманих розв'язків на чутливість, а також здійснювати побудову моделей прогнозування.

Для дослідження особливості поставленої задачі на рівні її математичних моделей, а саме двоїстої задачі оптимізації [4] може використовуватись деривативна СВО, яка є узагальненням евристичної і обумовлена введенням коефіцієнта b до умови нормування:

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_i = b.$$

Ці критерії подібності відрізняються від критеріїв евристичної системи і визначаються з виразу:

$$\pi_i = \frac{b \cdot a_i}{F_{\min}} \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}.$$

Домноження критеріїв подібності на сталий коефіцієнт уможлиблюється завдяки властивостям критеріїв подібності [3], які для будь-якого значення $\pi_i = \text{idem}$ передбачають $b \cdot \pi_i = \text{idem}$.

Вибір значення коефіцієнта нормування може відігравати роль засобу впливу на темп розвитку процесу керування. Так, швидкоплинне явище завдяки введенню коефіцієнта b може бути відтворене при моделюванні в уповільненому темпі, що дає можливість провести докладне спостереження. У протилежному випадку такий підхід дозволяє прискорити процес протікання змодельованого явища у потрібну кількість разів.

Як бачимо, на вибір коефіцієнта b не накладається практично ніяких обмежень; для кожного конкретного випадку його значення визначається метою дослідження. Залежно від вибраного значення нормуючого коефіцієнта розглядається та чи інша СВО (див. рис.2). Так, наприклад, коли $b=1$ користуються евристичною СВО, при $b=m_1$ - критеріальною, а при $b=\pm 1$ — сигноміальною системою. У деривативній СВО критеріальні залежності подані у найбільш загальній формі.

При формуванні закону оптимального керування нормальними режимами ЕС САК використовується транзитивна СВО, яка акумулює досить широкі можливості стосовно практичної реалізації оптимального розв'язку [10]. Це, зокрема, безпосередній зв'язок між керувальними параметрами та матрицею критеріїв подібності π_j , яка виступає як матриця зворотного зв'язку в законі оптимального керування [4]:

$$F = \sum_{i=1}^m \pi_i \times \prod_{j=1}^m \left(\frac{\pi_j}{a_j} \right)^{-\pi_{0j}} \prod_{k=1}^p \left(\sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} \pi_i \right)^{-\sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} \beta_{n+1,i}} = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_i \prod_{j=1}^m \left(\frac{\pi_j}{a_j} \right)^{-\pi_{i0}} \prod_{k=1}^p (\lambda_k)^{\lambda_{ko}}.$$

де β_{ji} - елементи оберненої матриці показників α ; $\lambda_k = \sum_{\mu=m_k+1}^{m_{k+1}} \pi_{i0}, k = \overline{1, p}$ — нормовані

множники Лагранжа.

Використання транзитивної СВО розкриває характерні властивості моделі, що полегшує проведення аналізу чутливості та визначення допустимої області оптимальних рішень, яка адекватна точності й повноті вихідної інформації.

При розв'язанні задач оптимального керування НР ЕЕС досить часто трапляються випадки, коли до матриці критеріїв подібності входять від'ємні критерії. У цьому разі послуговуються сигноміальною СВО, яка використовується для дослідження задач поліноміального типу та задач з відсутнім у явному вигляді конкуруючим ефектом за однією чи декількома змінними.

Поліноміальна задача формулюється аналогічно (4)-(5) з урахуванням знакових функцій сигноміальної СВО $\omega_i, i = \overline{1, m}, \Omega, \Omega_k, k = \overline{1, p}$, які доповнюють сформовані в термінах критеріального програмування умови нормування

$$\sum_{i=1}^{m_1} \omega_i \pi_i = \Omega$$

і ортогональності

$$\sum_{i=1}^m \omega_i \alpha_{ji} \pi_i = 0, j = \overline{1, n},$$

де $\omega_i = \pm 1, \Omega_i = \pm 1$ - сигноми-функції, величини яких визначаються відповідно з умови та в ході розв'язання задачі.

З урахуванням оптимальних значень критеріїв подібності для цільової функції

$$\pi_{i0} = \frac{a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}}{\Omega \cdot F_{\min}}$$

формується критеріальна програма сигноміальної СВО (рис. 2).

При створенні критеріальної системи відносних одиниць з множини базових величин виділяють незалежні та залежні величини. Число незалежних базисних одиниць і вигляд функціонального зв'язку виявляється на підставі аналізу індикаторів подібності [3]. Вираз (4) у критеріальній СВО запишеться:

$$F_0 = \sum_{i=1}^{m_1} \prod_{j=1}^n u_{j0}^{\alpha_{ij}}$$

Умова нормування матиме вигляд:

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_{i0} = m_1.$$

Застосування критеріальної СВО суттєво зменшує складність математичного апарату дослідження, а також зменшує кількість змінних.

У випадках, коли доводиться досліджувати математичну модель у точках, координати яких відрізняються на відому величину від координат стаціонарної точки доцільно використовувати диференційну СВО. Диференційна СВО може бути побудована, відповідно до першої похідної цільової функції. В інженерній практиці

досить часто виникає необхідність дослідження моделі в інших характерних точках. У таких випадках СВО необхідно будувати, виходячи з другої і третьої похідних.

Залежно від постановки задачі оптимального керування, вимог до форми отримання оптимального розв'язку використовується одна із запропонованих СВО. Так, наприклад, для створення математичних моделей можуть використовуватись евристична, сигноміальна та транзитивна СВО; для їх дослідження - критеріальна і деривативна; для визначення меж області допустимого розв'язку та пошуку оптимуму - евристична, сигноміальна і транзитивна СВО; для прогнозування - евристична СВО; аналізу отриманого розв'язку - евристична, критеріальна, диференціальна, транзитивна та сигноміальна СВО. Для визначення критеріїв подібності в законі оптимального керування (1)-(2) найбільш часто використовується евристична, сигноміальна і транзитивна СВО.

Таким чином, введення відносних одиниць у теорію оптимального керування дозволяє зробити рівняння зв'язку між фізичними величинами загальним для всієї групи подібних явищ. При переході від абсолютних характеристик до відносних отримуємо рівняння, яке представлено залежністю між безрозмірними параметрами - критеріями подібності. Воно дозволяє розв'язати вузлову задачу автоматизації оптимального керування НР ЕЕС – виділення області оптимальності і врахувати фактори, що визначають ефективність оптимізації режимів. Закон оптимального керування НР ЕЕС у відносних одиницях досить просто реалізується сучасними засобами обчислювальної техніки.

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176 с. 2. Воротницкий В.Э., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции. – 1992. - №1. – С. 60-66. 3. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. - М.: Высшая школа, 1984.- 439 с. 4. Лежнюк П.Д., Бевз С.В. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 1999. - 177 с. 5. Острем К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. - М.: Мир. - 1987. - 480 с. 6. Мокін Б.І., Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісник ВПІ. - 1995. - № 3. - С. 5-9. 7. Лук'яненко Ю.В., Гайдамака В.М., Рамзі Хаддад. Оптимальне керування потоками потужності в ЕЕС на підставі критеріальних залежностей та результатів аналізу їх на чутливість // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 1999. - № 372. - С. 100-107. 8. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1990. - №5. - С.3-11. 9. Бевз С.В., Бурбело С.М. Критеріальне моделювання в задачах прогнозування // Наукові вісті НТУУ «Київський політехнічний інститут». - 1998. - № 3. - С. 39-42. 10. Лежнюк П.Д., Бевз С.В. Транзитивна система відносних одиниць у критеріальному моделюванні // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 1999. - № 372. - С. 91-97.