

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ

Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В., Кравцов К.І., Таранюк Ю.А.

Вінницький державний технічний університет

ess@energo.vstu.vinnica.ua

The problems dealing with power flux and voltage control in electric system are considered. The suggested system of automatic control is based on the principle of optimum modes similarity. The method of criterial modelling is applied for analysis and generalization of optimization results into control rules.

З погляду на складність електроенергетичної системи (ЕЕС), як об'єкта керування, та на її особливості режимного характеру, очевидно, що відслідковувати і змінювати оптимальні значення параметрів стосовно до станів ЕЕС можливо тільки з допомогою систем автоматичного керування (САК) відповідними регульовальними пристроями (РП). В даній роботі на підставі встановлених в [1,2] закономірностей розглядається функціонування САК потоками потужності і напругою в складі системи оптимального керування нормальними режимами (НР) ЕЕС з імітаційною моделлю [3].

Дія розглядуваних тут САК трансформаторами зв'язку, які об'єднують електричні мережі різних напруг в електричну систему, направлена на зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні в ЕЕС шляхом перерозподілу природних потоків потужності і примусового наближення їх до потокорозподілу в однорідній ЕЕС. Ця задача може бути віднесена до класу задач теорії керування динамічними системами з квадратичним критерієм оптимальності (втрати активної потужності). В [3] показано, що розв'язок задачі мінімізації втрат в ЕЕС можна звести до закону оптимального керування:

$$u(t) = -w y(t), \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} +\Delta u_{уст\ i} & \text{при } u_i \geq u_i^+; \\ 0 & \text{при } u_i^+ > u_i > u_i^-; \\ -\Delta u_{уст\ i} & \text{при } u_i \leq u_i^-, \end{cases} \quad (2)$$

де $u(t) = [\dot{k}(t), Q(t)]_T$, $y(t) = [\dot{S}_B(t), \dot{I}_B(t), U(t)]_T$ - відповідно вектори керування і спостереження; w - матриця зворотного зв'язку; $\dot{k}(t)$ - вектор коефіцієнтів трансформації трансформаторів; $Q(t)$ - вектор навантажень джерел реактивної потужності (ДРП); $\dot{S}_B(t) = P_B + jQ_B$, $\dot{I}_B(t)$ - вектори потужностей та струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевиміри; $U(t)$ - вектор напруг вузлів; r - коригувальні дій САК, які вводять систему в область оптимальності (нечутливості); $\Delta u_{уст\ i}$ - добавка, яка, додаючись до уставки $u_{уст\ i}$, викликає відповідні дії РП по введенню керованого параметра в область оптимальності; u_i - i -та складова вектора керування; u_i^+ , u_i^- - верхня та нижня межі зони нечутливості зміни u_i .

Оптимальне керування у відповідності з (1)-(2) вимагає визначення меж зон нечутливості u_i^+ та u_i^- , що пов'язано з необхідністю розв'язання зворотної задачі чутливості [4]. Для ЕЕС ця задача є особливо складною через відсутність виразу цільової функції в аналітичній формі та через необхідність пошуку її екстремуму. Для її розв'язання доцільно застосувати критеріальний підхід.

В критеріальній формі всі параметри подаються у відносних одиницях [3]. Отже закон оптимального керування (1)-(2) відповідно запишеться:

$$u_*(t) = -\pi u_*(t), \quad (3)$$

$$r_{*i} = \begin{cases} +\Delta u_{уст\ *i} & \text{при } u_{*i} \geq u_{*i}^+; \\ 0 & \text{при } u_{*i}^+ > u_{*i} > u_{*i}^-; \\ -\Delta u_{уст\ *i} & \text{при } u_{*i} \leq u_{*i}^-, \end{cases} \quad (4)$$

де π - за своїм змістом ϵ , як це показано в [2], матрицею критеріїв подібності; $u_{*i} = u_i / u_{i0}$ - параметри РП, за допомогою яких оптимізуються режими ЕЕС, у відносних одиницях (за базисні приймаються оптимальні значення параметрів u_{i0}). Всі інші величини в (3)-(4) переводяться у відносні за аналогічною схемою.

В такій постановці задачі керуючими змінними є е.р.с., які необхідно ввести коефіцієнтами трансформації у всі замкнені контури для реалізації оптимального струморозподілу, та потужності ДРП. В [2] показано, що оптимальне значення втрат в ЕЕС досягається при відносних значеннях е.р.с., які визначаються за формулами:

$$\begin{matrix} E_{*_{зрп}}^E(t) = \pi_{*_{зрп}}^E J_{*_{зрп}}^E(t), & E_{*_{зрп}}^E(t) = \pi_{*_{зрп}}^E J_{*_{зрп}}^E(t), \end{matrix} \quad (5)$$

де $E_{*_{зрп}}^E(t)$, $E_{*_{зрп}}^E(t)$ - вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівновальних е.р.с.;

$J_{*_{зрп}}^E(t)$, $J_{*_{зрп}}^E(t)$ - вектори активних і реактивних складових відносних значень струмів у вузлах; $\pi_{*_{зрп}}^E, \pi_{*_{зрп}}^E$ - матриці критеріїв подібності.

Матриці критеріїв подібності визначаються за формулами [2]:

$$\pi_{*_{зрп}}^E = - \left[E_{*_{зрп}}^{(6)} \right]_{\text{д}}^{-1} v r_{\text{в}} M_{\alpha}^{-1} \left[J_{*_{зрп}}^{(6)} \right]_{\text{д}}; \quad \pi_{*_{зрп}}^E = \left[E_{*_{зрп}}^{(6)} \right]_{\text{д}}^{-1} v r_{\text{в}} M_{\alpha}^{-1} \left[J_{*_{зрп}}^{(6)} \right]_{\text{д}}, \quad (6)$$

де $v = N_{\alpha} x_{\text{в}} r_{\text{в}}^{-1} - x_{\text{к}} r_{\text{к}}^{-1} N_{\alpha}$ - матриця системних показників неоднорідності ЕЕС; $r_{\text{в}}, x_{\text{в}}$ - діагональні матриці опорів віток; $r_{\text{к}}, x_{\text{к}}$ - діагональні матриці опорів контурів; M_{α}, N_{α} - матриці з'єднань віток у вузлах і контурах дерева схеми.

З врахуванням зв'язку між контурними е.р.с. і коефіцієнтами трансформації трансформаторів (5) за певних умов (трансформатори в базовій системі контурів знаходяться в хордах, кількість регульованих трансформаторів дорівнює кількості контурів) можуть бути переписані у вигляді [2]:

$$k'(t) = 1 - \pi_{*_{зрп}}^E J_{*_{зрп}}^E(t), \quad k''(t) = -\pi_{*_{зрп}}^E J_{*_{зрп}}^E(t), \quad (7)$$

де $k'(t), k''(t)$ - вектори дійсних і уявних складових коефіцієнтів трансформації трансформаторів.

Серед можливих способів реалізації відповідної САК віддається перевага адаптивному регулюванню з еталонною моделлю. Такий підхід відповідає вимогам до керування НР ЕЕС, в його рамках можуть застосовуватись багато із напрацьованих і використовуваних на сьогодні в АСДУ алгоритмів і програм. Він досить просто реалізується на практиці за допомогою сучасних мікропроцесорних систем.

В такій схемі еталонна модель є частиною системи керування. На різних етапах впровадження САК еталонна модель може виконувати різні функції. На початковому етапі автоматизації, коли необхідно узгоджувати оперативне керування диспетчером з автоматичним, це імітаційна модель, з допомогою якої оперативний персонал не тільки аналізує, визначає і коригує налагоджувальні параметри САК, але і має можливість "програвати" стани ЕЕС і оцінювати наслідки керуючих дій, в тому числі автоматичних. На завершальному етапі, коли оптимальне керування НР ЕЕС здійснюється переважно локальними САК, еталонна модель стає основним елементом самонастройки і самоаналізу САК. За допомогою неї визначаються налагоджувальні параметри САК – уставки і зони нечутливості коефіцієнтів трансформації δk_i . Принципи їх визначення викладені в [5].

На рис. 1 наведені, як приклад, критеріальні залежності критерію оптимальності від коефіцієнтів трансформації $F_* = f(k_*)$. На підставі таких залежностей встановлюються зони нечутливості коефіцієнтів трансформації δk_i . Як видно, чисельні значення δk_i залежать від величини зони нечутливості критерію оптимальності δF , і характеру залежності $F_* = f(k_*)$.

Координація роботи трансформаторів при оптимальному керуванні здійснюється за критеріальними залежностями $F_* = f(k_*)$. Вони відображають технічні можливості трансформаторів в керуванні втратами потужності в ЕЕС та використовуються для визначення впливу їх на потоки потужності. Наприклад, в ЕЕС, критеріальна залежність для трансформаторів якої представлена на рис. 1, трансформатори 3 та 5 мало впливають на рівень втрат потужності. Зміна їх коефіцієнтів трансформації практично не впливає на втрати в ЕЕС, зате перемикання їх збільшує ймовірність відмови трансформаторів та недовідпуску електроенергії. Отже, використовувати ці трансформатори в САК потоками потужності з метою мінімізації втрат нерационально. Їх можна використовувати, наприклад, для введення режиму ЕЕС в допустиму за напругою область.

Для того, щоб розділити трансформатори на функціональні групи та визначити роль кожного з них в САК потоками потужності, розв'язується зворотня задача чутливості [4, 6]. В результаті її розв'язання при заданій зоні нечутливості критерію оптимальності δF_* визначаються зони нечутливості δk_i коефіцієнтів трансформації, які в свою чергу перераховуються в зони нечутливості за напругою блоків автоматичного регулювання (БАР). Як видно з рис. 1, розміри цих зон відповідають реальним можливостям трансформаторів впливати на втрати. Відповідно з їх регульовальним ефектом встановлюється різна інтенсивність перемикань

для трансформаторів ЕЕС. За такого порядку роботи системи керування введення режиму ЕЕС в область оптимальності реалізується мінімально можливою кількістю керуючих впливів, що в свою чергу запезпечує надійність та раціональне спрацювання ресурсу регулюючих пристроїв.

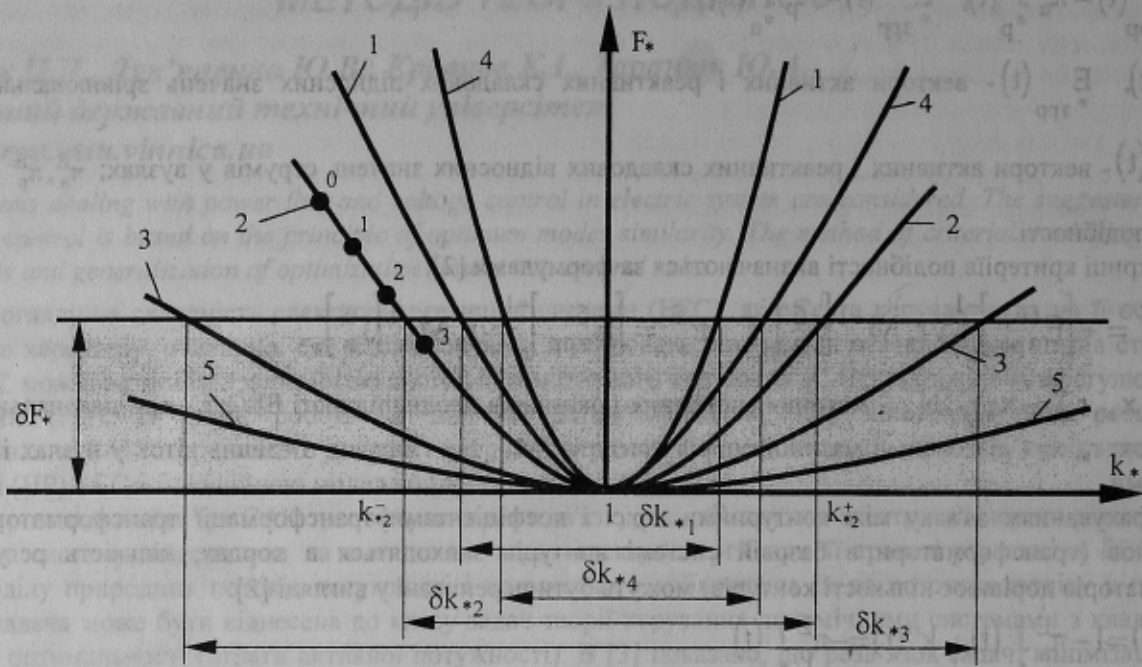


Рисунок 1

Задача оптимального керування потоками потужності в ЕЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення F_* у встановленій зоні нечутливості δF_* . Для цього при виході з неї здійснюються керувальні впливи трансформаторами. Наприклад, (див. рис. 1) другим трансформатором слід зробити три перемикання. Для підвищення ефективності керування потоками потужності в ЕЕС з метою зменшення втрат потужності необхідно виявляти реальні можливості трансформаторів з РПН, оцінюючи чутливість втрат потужності до змін коефіцієнтів трансформації. Для підвищення ефективності використання трансформаторів з РПН в ЕЕС при формуванні керуючих впливів необхідно також враховувати їх технічний стан та залишковий ресурс. З врахуванням сказаного в задачі оптимізації режиму ЕЕС критерій оптимальності встановлено такий [6]:

$$F = \Delta P + P(\delta U) + P(\omega) + \sum_{i=1}^q \Pi_{Ti},$$

де ΔP - сумарні втрати активної потужності в ЕЕС; $P(\delta U)$ - потужність, еквівалентна збитковим споживачів через неоптимальність якості напруги; $P(\omega)$ - потужність, еквівалентна збитковим внаслідок недовідпуску електроенергії, який викликаний відмовами трансформаторів, зокрема відмовами пристроїв РПН; Π_{Ti} - штрафна функція, що вводиться для врахування ресурсу трансформаторів, в тому числі перемикачів пристроїв РПН; q - кількість трансформаторів, які регулюються.

Розглянемо, як визначаються зони нечутливості САК трансформаторами зв'язку. Відомі методи теорії чутливості [4], в основі яких лежить використання функцій чутливості або градієнтів досліджуваних якостей системи, є не достатньо ефективними при прийнятті оптимальних рішень в складній системі типу ЕЕС. Причини тут і в структурі самої системи, і в особливостях формування її станів. В даній роботі використовується один із можливих способів вирішення проблеми чутливості системи оптимального керування в складних динамічних систем типу ЕЕС. В основу методу, який пропонується, покладено критеріальне моделювання [6]. Особливістю застосування критеріального методу є те, що оцінка чутливості здійснюється у відносних одиницях. Причому, якщо йдеться про оптимальне керування, то за базові приймаються параметри системи, що забезпечують її оптимальний стан у відповідності з обраним критерієм оптимальності.

При застосуванні критеріального моделювання основою алгоритму оцінки чутливості оптимальних рішень є критеріальна форма цільової функції, яка в загальному вигляді може бути записана як [6]:

$$F(u_*) = \sum_{i=1}^m \pi_i \prod_{j=1}^n k_{*j}^{\alpha_{ji}}, \quad (8)$$

де $F(k_*)$ - значення цільової функції у відносних одиницях; α_{ji} - показники степені, які визначаються в результаті апроксимації функції; m - кількість членів цільової функції; n - кількість змінних, що оптимізуються.

З допомогою співвідношення (8) в процесі оптимізації може бути розв'язана пряма і зворотна задачі чутливості. Розв'язування прямої задачі оцінки чутливості зв'язано, в основному, з аналізом додаткового руху цільової функції ΔF_* [4]. Очевидно, що в нашому випадку застосування критеріального методу йдеться про відносний додатковий рух. Особливих складнощів при цьому не виникає. При оптимізації станів системи в основному приходиться мати справу зі зворотними задачами чутливості, які відносяться до некоректно поставлених [4]. В [7] показано, що за умови апроксимації цільової функції двочленним позиномом виду

$$F_{*i} = \pi_{1i} k_{*i}^{\alpha_i} + \pi_{2i} k_{*i}^{\beta_i}, \quad (9)$$

розв'язок зворотної задачі чутливості може бути отриманий в аналітичній формі. В (9) π_{1i}, π_{2i} - критерії подібності, а α_i, β_i - постійні коефіцієнти, які відображають характер залежності і міру впливу k_{*i} на значення F_* .

Згідно методики, запропонованої в [7], вирази для обчислення граничних значень області оптимальності параметрів мають вигляд

$$k_{*i}^- = \left(\frac{\alpha - \beta}{-\beta} \frac{\pi_{1i}}{1 + \delta F_*} \right)^{\alpha}, \quad k_{*i}^+ = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha} \frac{\pi_{2i}}{1 + \delta F_*} \right)^{\beta}. \quad (10)$$

При багатопараметричній задачі області оптимальності окремих коефіцієнтів трансформації визначаються на підставі розподілу допусків на регульовані трансформатори при заданому δF_* . Необхідно розв'язати задачу визначення таких зон нечутливості коефіцієнтів трансформації, щоб сумарні відхилення останніх від своїх оптимальних значень не призводили до виходу критерію оптимальності з області оптимальності. Розглянемо як ця задача може бути розв'язана у відносних одиницях.

Очевидно, що в реальній системі з різних причин значення коефіцієнтів трансформації відрізняються від оптимальних на величини $\Delta k_1, \dots, \Delta k_m$. При цьому критерій оптимальності отримує приріст

$$\Delta F_* = F_*(k_{10} + \Delta k_1, \dots, k_{m0} + \Delta k_m) - 1. \\ \text{Система є працездатною, якщо [4]} \\ \Delta F_*(\Delta k_1, \dots, \Delta k_m) \in \delta F_*. \quad (11)$$

При розрахунку допусків методами теорії чутливості допускається, що відхилення значень параметрів від оптимальних значень малі і що зміни параметрів в межах поля допуску є лінійними. Тоді варіація (11) критерію оптимальності F визначається

$$\Delta F = \sum_{i=1}^m \mu_i \Delta k_i,$$

де $\mu_i = \left. \frac{\partial F}{\partial k_i} \right|_{\Delta k=0}$ - коефіцієнт чутливості. В останньому виразі величина Δk_i є варіацією, яка визначається як

$$\Delta k_i = k_i - k_{i0}.$$

Якщо розраховувати на найгірше поєднання відхилень параметрів, то для оцінки допусків користуються формулою:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^m |\mu_i| \delta k_i^{cp}, \quad (12)$$

де $\delta k_i^{cp} = \Delta k_i$ - половина поля допуску коефіцієнта трансформації k_i .

Згідно (12) безпосередньо визначається поле допуску критерію оптимальності δF . У випадку декількох параметрів розрахунок допусків можна здійснювати методом послідовних наближень, підбираючи допуски на параметри таким чином, щоб значення критерію оптимальності F знаходилось в заданому допуску. Такий підхід при великій кількості параметрів є громіздким в обчислювальному відношенні і не завжди приводить до потрібного результату. Більш простим і ефективним є алгоритм, що реалізує принцип рівних впливів [6]. У відповідності з цим принципом припускається, що в співвідношенні (12) значення всіх складових $(|\mu_i| \delta k_i)$ рівні між собою. При цьому

$$\delta F_* = m |\mu_i| \delta k_i^{cp}, \\ \text{Звідки} \\ \delta k_i^{cp} \leq \frac{\delta F_*}{m |\mu_i|}. \quad (13)$$

На рис. 1 наведено типовий для ЕЕС приклад [3], коли критеріальні залежності $F_* = f(k_*)$ відображають різний характер і можливості РП щодо їх впливу на оптимізацію режимів ЕЕС. З врахуванням цього задача розподілу допусків розв'язується наступним чином. Згідно (10) визначаються граничні значення коефіцієнтів трансформації k_{*i}^- та k_{*i}^+ . Використовуючи ці дані, обчислюються

$$\delta k_{*i} = k_{*i}^+ - k_{*i}^-.$$

Для трансформаторів визначаються їх вагові коефіцієнти в регулюванні. Вони можуть бути визначені в результаті нормування δk_{*i} наступним чином:

$$v_i = \frac{\delta k_{*i}}{\sum_{i=1}^m \delta k_{*i}}$$

Значення допуску δk_{*i}^{cp} , при заданому значенні δF_* визначається

$$\delta k_{*i}^{cp} \leq \frac{v_i \delta F_*}{|\mu_i|}, \quad (14)$$

де з врахуванням (9) $\mu_i = \frac{\partial F_*}{\partial k_{*i}} = \pi_{i1} \alpha_i k_{*i}^{\alpha_i-1} + \pi_{i2} \beta_i k_{*i}^{\beta_i-1}$.

На відміну від (13) допуски, визначені за допомогою формули (14), більш точно відображають реальні можливості конкретного РП впливати на процес оптимізації станів ЕЕС. Визначені таким чином δk_{*i} дозволяють більш обгрунтовано і з більшою техніко-економічною ефективністю досягати в ЕЕС загальносистемного ефекту.

Таким чином, при аналізі чутливості оптимальних рішень можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності та моделювання. Завдяки властивостям критеріального методу чутливість досліджується без визначення функцій чутливості та оптимальних значень параметрів. У випадку, коли цільова функція апроксимована степеневим поліномом, розв'язок зворотної задачі чутливості має аналітичний вид. Це значить, що поля допуску і межі області оптимальності керувальних параметрів також встановлюються аналітично в залежності від значень варіацій критерію оптимальності та від точності визначення критеріїв подібності. Отже, при автоматизації оптимального керування потоками потужності та напругою в ЕЕС можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності та моделювання. На основі них можна розв'язувати задачі, характерні для АСДУ, з єдиних методологічних засад на всіх етапах оптимального керування. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну САК з децентралізацією частини функцій АСДУ практично без порушення принципів централізованого керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лежнюк П.Д., Пауткіна Л.Р. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрической сети // Изв. вузов. Энергетика. - 1989. - №2. - С. 51-53.
2. Лежнюк П.Д., Оболюньский Д.І., Пауткіна Л.Р. Моделирование влияния неоднородности электрической системы на оптимальность її режиму // Вісник ВПІ. - 1996. - № 4. - С. 44-49.
3. 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.
4. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. - М.: Наука, 1981. - 464 с.
5. Вороничий 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.
6. 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.
7. Апроксимация неявно выраженных критеріів оптимальності електричної системи позиномом / Лежнюк П.Д., Оболюньский Д.І., Аль-Омарі Закарія, Кравцов К.І. // Вісник Вінниц. політехн. ін-ту. - 1994. - №4. - С. 35-37.