

УДК 621.311.

В. Ц. Зелінський, к. т. н., доц.;

Н. В. Остра, асп.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО УПРАВЛІННЯ З УРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

Запропоновано алгоритмічну та програмну реалізацію моделі електроенергетичної системи для автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ), яка дозволяє підвищити ефективність роботи системи оперативно-диспетчерського керування режимами. Крім того, за рахунок оптимізації режимів їх роботи, а також, враховуючи чутливість до зниження втрат, стає можливим зниження рівня втрат активної потужності в електроенергетичних системах ЕЕС в цілому.

Вступ

Підвищення ефективності автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ) електроенергетичних систем (ЕЕС) передбачає вдосконалення методів і засобів формування розрахункових моделей ЕЕС, синтез на їх основі керувальних впливів та автоматизацію основних функцій процесу керування нормальними режимами. Це стосується збору та обробки оперативної телеметричної інформації про стан ЕЕС, синтез керувальних дій з урахуванням ієрархій ЕЕС та практичної реалізації заданих законів керування в АСДУ.

Оптимальне керування параметрами режимів ЕЕС на сучасному етапі розвитку АСДУ досягається вибором оптимальної конфігурації схеми ЕЕС, складу обладнання, що працює, та рядом інших факторів [1]. Під час вирішення задач оптимізації розрахункових математичних моделей та реалізації принципів автоматичного керування режимами ЕЕС проявляються тенденції переходу від задач аналізу функціонування енергосистем до складніших — задач управління технологічними процесами, до яких входить вибір оптимальних методів і засобів управління для цілеспрямованого коригування ходу процесів і характеристик об'єктів, якими здійснюється керування [2].

Досвід показує, що традиційні математичні методи не зовсім задовольняють нові вимоги. Виникає потреба у вдосконаленні математичних моделей процесу оперативно-диспетчерського управління нормальними режимами ЕЕС на основі сучасних методів моделювання з використанням методів теорії оптимального керування складними технологічними системами та теорії графів [3, 4].

В даній статті описується розроблена методика формування розрахункової моделі ЕЕС, яка була б адекватна реальним умовам експлуатації і враховувала чутливість критерію оптимальності до параметрів, що оптимізуються.

Постановка задачі оптимізаційного дослідження

Задача оптимального керування нормальними режимами ЕЕС в загальному випадку формулюється як задача теорії оптимального керування [4]: мінімізувати функцію

$$F(U) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \left[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \right] dt \quad (1)$$

динамічної системи, яка описується диференціальними матричними рівняннями

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t); \\ \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{Cx}(t) + \mathbf{Du}(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ — відповідно вектори стану, керування і спостереження; \mathbf{Q} , \mathbf{R} , \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} — матриці констант, які можуть залежати від часу t ; t_0 , t_k — фіксовані моменти часу.

В керуванні усталеним режимом ЕЕС критерієм оптимальності служить економічний критерій — мінімум технологічних витрат електричної енергії на її передачу по електричних мережах за умов дотримання обмежень з надійності електропостачання та якості електроенергії. Ще на стадії формування цільової функції ставиться мета отримати закони керування регулювальними пристроями у вигляді, зручному для їх автоматичної реалізації. Розв'язком задачі (1), (2) є рівняння

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{W}\mathbf{y}(t), \quad (3)$$

де \mathbf{W} — матриця зворотного зв'язку, яка відображає зв'язок топології мережі з її сталими параметрами.

Вираз (3) описує закон оптимального керування параметрами регулювальних пристроїв ЕЕС, та за певних умов дозволяє досягнути мінімуму цільової функції (1). З метою практичної реалізації закону (3) в АСДУ доцільним є синтез систем керування ЕЕС з використанням теорії самовпорядкувальних систем керування на основі адаптивних гнучких моделей [5]. Розвиток систем управління технологічними процесами в ЕЕС має на меті автоматизацію збору та обробки інформації і реалізацію дій керування в АСДУ. При цьому необхідно мати на увазі, що автоматизація управління режимами це не просто автоматична реалізація однієї або декількох функцій керування, а створення системи, яка органічно включає в себе людину, ЕОМ, сукупність методів та технічних засобів, що забезпечують ефективне виконання великої кількості функцій керування режимами. Для реалізації законів автоматичного керування режимами існують певні умови, основними з яких є:

— виділення областей корекції та координація роботи регулювальних пристроїв з урахуванням ранжування їх за пріоритетом керування режимами;

— побудова розрахункової моделі ЕЕС, в першу чергу дерева графа, таким чином, щоб виділити в якості хорд трансформаторні вітки з найбільшим регулювальним ефектом, що по суті є адаптацією розрахункової моделі до реальних умов експлуатації цих пристроїв.

Об'єднання цих двох принципів в процесі реалізації оптимальних режимів дозволяє наблизити струморозподіл в ЕЕС до економічного і знизити рівень втрат активної потужності в енергосистемі. Керувати потоками потужності в неоднорідних електричних мережах можливо шляхом зміни комплексних коефіцієнтів трансформації регулювальних трансформаторів. Але, моделюючи параметри реальних ЕЕС, не завжди вдається сформувати модель таким чином, щоб реалізувати в мережі наблизений до економічного струморозподіл, тому і виникає необхідність визначення найчутливіших вузлів, які є найпридатнішими для заходів компенсації втрат активної потужності в енергосистемі.

Розрахункова модель та її оптимізація в АСДУ ЕЕС

Цілеспрямоване формування розрахункової моделі ЕЕС дозволяє ідентифікувати параметри режиму, проаналізувати склад вхідної та вихідної інформації і врахувати фактори, які мають найбільший вплив на достовірність отриманих результатів. Призначення моделі визначається її принциповою можливістю синтезувати оптимальні рекомендації та закони керування для ведення технологічного режиму в енергосистемі.

Процес моделювання дерева графа ЕЕС з урахуванням ранжування регулювальних трансформаторів за пріоритетом керування режимами ЕЕС побудуємо таким чином, щоб трансформаторні вітки були хордами графа. Такий підхід дозволить отримати закони керування (3) і адаптувати модель ЕЕС до реальних умов експлуатації конкретних регулювальних пристроїв.

Для побудови моделі та її оптимізації в АСДУ енергосистеми скористаємося певними припущеннями. Важливою топологічною властивістю електричних систем з точки зору розв'язування

задач моделювання є те, що кожен вузол мережі зв'язано з відносно невеликою кількістю інших вузлів. Модель дерева графа електричної системи представимо як кореневе дерево, в якому в ролі кореня вибирається балансувальний вузол. Кількість різних дерев N'_m на множині вершин m електричної системи визначається:

$$N'_m = m \cdot N_m = m \cdot m^{m-2} = m^{m-1} \quad (4)$$

Оскільки кількість можливих варіантів вибору балансувальних вузлів для реальних ЕЕС обмежена і при моделюванні вони вибираються за певною методикою, то загальна кількість різних варіантів дерев моделі зменшується. Перенесення кореня на другу вершину теж призводить до іншого кореневого дерева. Для кожного дерева N'_m існує така система незалежних контурів k_1, k_2, \dots, k_m , де кожному з них ставиться у відповідність одна хорда. Існує базисна система контурів, де кожна вітка графа належить не більше, ніж двом контурам вказаного базису. Дерево графа мережі описується з допомогою матриць інцидентів M і N .

Як показує досвід, необхідно керувати вибором системи незалежних контурів і хорд під час моделювання дерева графа та його оптимізації. Метою цілеспрямованої побудови дерева графа є включення в хорди моделі елементів регулювання режимами (трансформаторів з РПН, автотрансформаторів і т. ін.), що дозволить одержати закони їх функціонування у вигляді (3). Алгоритм побудови безпосередньо дерева графа та в цілому адаптивної моделі ЕЕС розроблений з урахуванням аналізу неоднорідності електричної мережі, виділення зон корекції та ранжування трансформаторів за пріоритетом керування [6].

Моделювання схеми ЕЕС

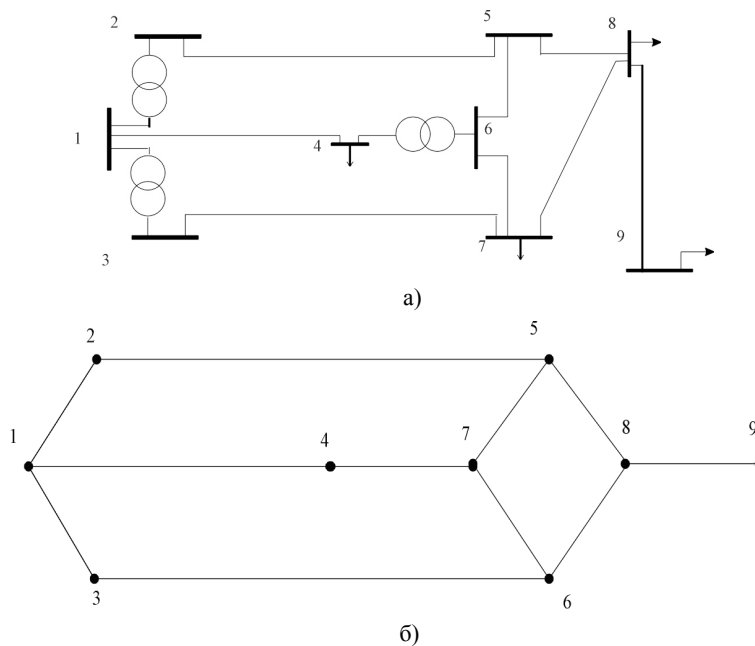


Рис. 1. Схема електричних з'єднань (а) та граф електричної мережі (б)

Проілюструємо процес побудови алгоритму та формування моделі на прикладі простої електричної мережі (рис. 1а), граф якої має вигляд, показаний на рис. 1б.

Віткам дерева графа $V_{i,j}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$ надамо певну вагу C_{Vij} , що відповідає величині неоднорідності кожної з них. Задача цілеспрямованої побудови орієнтованого графа мережі зводиться до знаходження найкоротшої відстані між вершинами віток графа, які на підставі ранжування трансформаторів за пріоритетом керування режимом вибрано в якості хорд. Хорди вибираються за результатами попереднього аналізу за методикою запропонованою в [6] і формується відповідна матриця хорд L_j , де $j = 1, \dots, k$ — кількість хорд в моделі системи.

Побудова моделі дерева графа розпочинається зі знаходження оптимальної відстані між двома фіксованими вершинами графа — хорди. Хорда вибирається з масиву L за результатами ранжування трансформаторів за пріоритетом керування режимом та з урахуванням їх надійності та ресурсу.

Алгоритм побудови моделі опирається на дії, які в загальному вигляді сформулюємо таким чином:

— за заданою матрицею вагових коефіцієнтів віток графа C_V обчислюємо деяке верхнє наближення $D(V)$ на відстані одного кроку від фіксованої точки з масиву хорд L_j до всіх вершин, які належать даному графу;

— на кожному кроці обчислень, коли встановлюємо, що

$$D(L) + C_{Vij} < D(V), \quad (5)$$

оцінку обмеження $D(V)$ поліпшуємо на величину нев'язок $A(V, L)$:

$$D(V) = D(L) + A(V, L); \quad (6)$$

— процес обчислення продовжується допоки подальше поліпшення хоча б одного з обмежень стає неможливе. Тобто, таким чином знаходиться найкоротша відстань від початкової вершини хорди на наступній вершині дерева графа. Значення кожної із змінних $d(v)$ матриці $D(V)$ фактично дорівнює $d(v, l)$, тобто відстані від початкової вершини хорди L до наступної вершини дерева графа.

Для того, щоб визначити відстань від початкової вершини хорди $L(j)$ до її кінцевої вершини $L(j+1)$, тобто знайти оптимальний шлях для незалежного контуру, поступово перебирається вся матриця вагових коефіцієнтів віток C_{Vij} . При цьому перевіряється зв'язність мережі і кожна нова вибрана вершина виключається з масиву вершин дерева G . Це забезпечує реалізацію алгоритму, коли кожна вітка належить не більше ніж двом контурам.

Побудова дерева графа з урахуванням чутливості до втрат потужності в ЕЕС

Через неможливість реалізації повного списку запланованого масиву хорд, сформованого за результатами аналізу ранжування регульовальних пристроїв, пропонується побудова дерева графа мережі виключенням з цього списку трансформаторних віток, чутливість до зниження втрат яких незначна і керування якими не дає суттєвого ефекту від оптимізації режимів. Це дозволяє визначити оптимальний склад керувальних пристроїв і по суті зводиться до «прив'язки» вибраних розрахунковим шляхом місць установки регульовальних пристроїв, які реалізують в мережі оптимальний струморозподіл, до реально існуючих трансформаторів. З урахуванням дискретності регульовальних пристроїв такий підхід дозволяє без реконструкції електричної мережі реалізувати в ній струморозподіл, близький до економічного.

Проілюструємо запропонований алгоритм на прикладі графа мережі, який представлено на рис. 1б. Попередньо за методикою, запропованою в [6] визначимо матрицю хорд L . Проранжуємо трансформатори за їх регульовальним ефектом, тобто за пріоритетом керування режимом. Результати такого ранжування представимо у вигляді залежності втрат активної потужності від коефіцієнтів трансформації $\Delta P = f(K_T)$ (рис. 2).

Як видно з рис. 2, найпріоритетнішою з точки зору регульовального ефекту є трансформаторна вітка 4—7. Для побудови моделі дерева графа в якості початкової вершини (балансувального вузла) вибирається вершина 4 та, враховуючи вагові коефіцієнти C_{Vij} , обчислюється послідовність та напрямок обходу першого контуру (рис. 3).

Для наведеної схеми заміщення (рис. 1б) перший контур складається з послідовного з'єднання віток 4—1—3—6—7 та замикається хордою 4—7, в якій змодельована трансформаторна вітка. Аналогічним чином продовжується побудова моделі дерева графа для другого контуру, в якому змодельована трансформаторна вітка 1—2 (рис. 4).

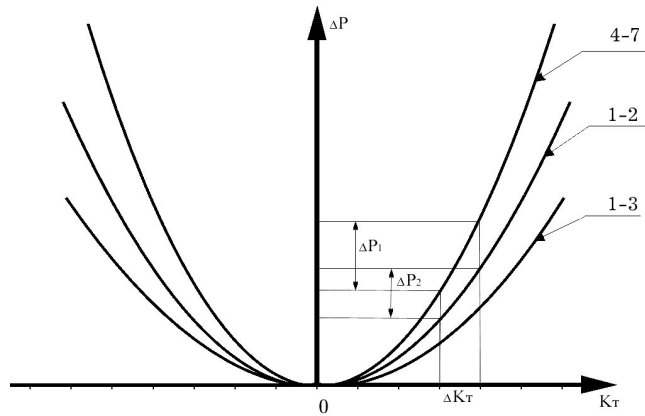


Рис. 2. Визначення регулювального ефекту трансформаторів з РПН

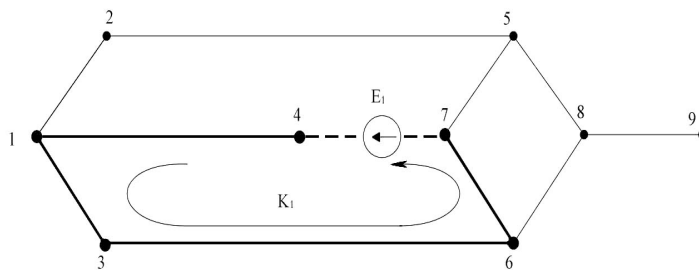


Рис. 3. Перший крок побудови графа

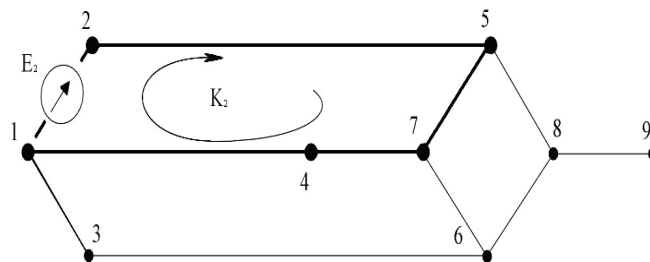


Рис. 4. Другий крок побудови графа

В процесі синтезу моделі графа для реальних ЕЕС великої розмірності реалізація сформованого для попереднього аналізу масиву хорд L повним списком буде недоцільною як з технічної, так і з економічної точок зору. Це пов'язано з тим, що чутливість до зниження втрат активної потужності трансформаторів, які мають похилі характеристики (див. рис. 2) незначна і керування ними не дає суттєвого впливу на параметри оптимального режиму. Визначальним може бути ресурс регулювальних пристроїв, що не дозволяє ефективно використовувати ці пристрої в циклах оперативно-диспетчерського керування режимами.

Розроблений алгоритм синтезу адаптивної моделі дозволяє визначити оптимальний склад керувальних пристроїв. По своїй суті він зводиться до «прив'язки» вибраних розрахунковим шляхом за результатами аналізу моделі пунктів установлення регулювальних пристроїв в мережах, які реалізують оптимальний струморозподіл, до пунктів установлення трансформаторів в діючих мережах. Враховуючи дискретність цих пристроїв, ми маємо змогу без реконструкції електричної мережі реалізувати в ній струморозподіл наближений до економічного.

Розроблений алгоритм цілеспрямованого формування розрахункової моделі електричної мережі забезпечує їй значну гнучкість, високий ступінь адаптивності та керованості, що є одним з визначальних факторів для розвитку та модернізації систем управління в АСДУ. Процедура формування такої моделі включає в себе аналіз наявного в системі складу телевимірів, враховує ранжу-

вання трансформаторів за пріоритетом керування і дозволяє автоматизувати сам процес оперативного управління.

Достовірність роботи алгоритму і програми була перевірена на тестових прикладах і на моделях реальних ЕЕС, що покривають широкий діапазон окремих випадків як при виборі хорд, так і при побудові різних дерев графа мережі. Включались дані, які передбачають всі умови наперед спланованих помилок, а також «хибні» дані, з метою перевірки правильності роботи алгоритму.

Висновки

1. Запропонована методика розробки та оптимізації розрахункової математичної моделі ЕЕС дозволяє отримати рекомендації та закони керування для оптимізації нормальних режимів ЕЕС у вигляді, який зручний для їх подальшої практичної реалізації в АСДУ.

2. Моделювання ЕЕС в АСДУ з урахуванням чутливості втрат потужності до коефіцієнтів трансформації дозволяють підвищити ефективність оперативно-диспетчерського керування режимами. Крім того, раціональніше використовується ресурс трансформаторів завдяки впорядкуванню оптимізувальних впливів, які здійснюються регулювальними пристроями на режимах ЕЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Руденко Ю. И. Вступление к циклу статей по совершенствованию АСДУ электроэнергетических систем // Изв. АН РФ. Энергетика. — 1992. — № 4. — С. 3—5.
2. Портнов Е. М., Портнов М. Л. Построение интегрированных АСУ ТП распределенных энергообъектов и производств на информационно-управляющих телемеханических комплексах «Гранит-микро» // Электрические сети и системы. — 2004. — № 5, 6. — С. 59—64.
3. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З. и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 256 с.
4. Лежнюк П. Д., Лук'яненко Ю. В. Принципи формування умов оптимальності нормальних режимів електроенергетичних систем // Збірн. наук. праць Донецьк. держ. техн. ун-ту: Серія «Електротехніка і енергетика». Вип. 21. — 2000. — С. 73—76.
5. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальное керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с.
6. Лежнюк П. Д., Зелинский В. Ц. Серова И. А. Методика координации работы регулирующих устройств при оптимальном управлении режимами электрической системы // Устройство преобразования информации для контроля и управления в энергетике. — Харьков, 1992. — С. 108—112.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 14.06.05
Рекомендована до друку 22.06.05

Зелінський Віктор Цезарович — доцент; *Остра Наталія Вікторівна* — аспірантка.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет