

ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуто питання розробки та використання методів оптимізації усталених режимів електричних мереж сучасних енергосистем за реактивною потужністю і напругою, що забезпечують ефективне розв'язання поставленої задачі, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей. Запропонований алгоритм, який використовує метод сполучених градієнтів, має досить високий рівень збіжності, стійкість до вибору початкових наближень.

Ключові слова: електрична мережа, енергосистема, оптимізація функціонування, технічні та ресурсні обмеження, елементи мережі.

Вступ

Розв'язання задачі комплексної оптимізації режиму електричної системи за одночасної зміни всіх регульованих параметрів, за які використовуються активні і реактивні потужності електростанцій, напруги опорних пунктів і комплексні коефіцієнти трансформації регульованих трансформаторів, викликає істотні труднощі зумовлені, насамперед, розмірністю задачі, великим обсягом інформації, що стосується як електростанцій системи, так і елементів електричної мережі. Крім того, розрахунки виконуються на різних часових інтервалах різними організаціями. Внаслідок цього, задача оптимізації режимів розв'язується зазвичай у два етапи: оптимізація розподілу активних потужностей і оптимізація режиму електричної мережі за реактивною потужністю і напругою.

Найперспективнішими методами оптимізації сталих режимів електричних систем є градієнтні методи. Однак їхнє використання ускладнюється у випадку витягнутого гіперпростору, коли лінії рівнів цільової функції утворюють витягнутий «яр». У цьому випадку напрямком антиградієнта майже ортогональний напрямкові досягнення мінімуму і розв'язання задачі або вимагає значних витрат часу розрахунку, або взагалі розв'язок не може бути отриманий. Тому доцільно використання методів сполучених градієнтів, збіжність яких часто майже така ж, як і в квазіньютонівських методів [7, 9].

Матеріал і результати досліджень

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації режимів електричної мережі за реактивною потужністю та напругою, що забезпечують ефективне розв'язання поставленої задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Задачу оптимізації режиму електричної мережі за реактивною потужністю та напругою можна сформулювати в такий спосіб.

Мінімізувати функцію $f(X)$ за наявності S нелінійних обмежень у вигляді рівностей

$$h_s(X) = W_s(X) - W_s, \quad s = 1, 2, \dots, S. \quad (1)$$

і I лінійних і нелінійних обмежень у вигляді нерівностей

$$g_i(X) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (2)$$

Функція $f(X)$ — це в загальному випадку дисконтовані витрати на спорудження й експлуатацію додаткових пристроїв, що генерують реактивну потужність, покриття втрат активної потужності в мережі та існуючих джерелах реактивної потужності. Крім того, тут може враховуватися збиток у споживачів, зумовлений відхиленнями параметрів режиму від допустимих значень і порушеннями енергопостачання.

До складу J -вимірного вектора незалежних змінних оптимізації X входять реактивні потужно-

сті електростанцій та інших джерел реактивної потужності Q_j , напруги контрольованих генераторних пунктів U_t , регулювальні ЕРС e . При цьому для забезпечення стійкості розрахунку сталого режиму електричної системи на кожному кроці процесу оптимізації в частині пунктів з джерелами реактивної потужності, так званих опорних пунктах, як незалежні змінні використовуються не потужності, а модулі напруг [3, 6]. Регулювальними ЕРС називаються модулі збільшення напруг на обмотках трансформаторів або автотрансформаторів, які отримані за рахунок застосування передбачених конструкцій засобів регулювання [6]. Використання регулювальних ЕРС як незалежних змінних зменшує число аргументів, забезпечує спільний облік поздовжніх і поперечних складових коефіцієнтів трансформації та полегшує практичне використання результатів оптимізації.

Обмеження типу рівностей (1) зумовлені найчастіше функціональними зв'язками, які доводиться враховувати, виходячи зі структури і властивостей керованого об'єкта. Для розв'язання розглянутої задачі оптимізації сталих режимів електричних систем у цю групу можуть бути віднесені рівняння балансу потужностей у вузлах із заданими активною і реактивною потужностями, а також рівняння балансу активних потужностей для пунктів з фіксацією модулів напруг.

Обмеження типу нерівностей (2) зв'язані з умовами регулювання незалежних змінних

$$x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

і залежних характеристик режиму

$$\varphi_p^{\min} \leq \varphi_p \leq \varphi_p^{\max}, \quad p = 1, 2, \dots, P. \quad (4)$$

До складу обмежень у вигляді нерівностей входять обмеження за незалежними змінними оптимізації — реактивними потужностями джерел Q_j , напругами опорних пунктів U_t і регулювальними ЕРС трансформаторів e_r . Крім того, до складу обмежень (4) включені функціональні обмеження за активною потужністю балансувального пункту, активними потужностями віток мережі, контрольованих за потужністю, струмами віток і напругами навантажувальних пунктів.

Алгоритми методів сполучених градієнтів визначають послідовність напрямків пошуку, що є лінійними комбінаціями вектора антиградієнта $-\nabla f(X^{(k)})$ і попередніх напрямків пошуку $s^{(0)}, s^{(1)}, \dots, s^{(k-1)}$. При цьому коефіцієнти напрямку ω_k вибираються таким чином, щоб зробити напрямки сполученими. Для розрахунку ω_k використовуються вектори $-\nabla f(X^{(k)})$ і $-\nabla f(X^{(k-1)})$.

Для забезпечення однакової розмірності складових вектора градієнта доцільно вибрати за незалежні змінні оптимізації відносні значення величин Q_{j^*} , U_{t^*} і e_{r^*} , що можуть бути розраховані за допомогою виразів

$$Q_{j^*} = \frac{Q_j - Q_j^{\min}}{Q_j^{\max} - Q_j^{\min}}; \quad U_{t^*} = \frac{U_t - U_t^{\min}}{U_t^{\max} - U_t^{\min}}; \quad e_{r^*} = \frac{e_r}{e_r^{\max}}. \quad (5)$$

Перехід з точки простору $X^{(k)}$ в точку $X^{(k+1)}$ під час оптимізації режимів енергосистем за реактивною потужністю і напругою здійснюється за формулою

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{jk} \nabla f(X^{(k)}), \quad (6)$$

де $\xi^{(k)}$ — коефіцієнт довжини кроку; a_{jk} — діагональна матриця коефіцієнтів, що приводить змінні до одного масштабу. У пропонованому алгоритмі для розрахунку напрямку пошуку під час оптимізації режимів енергосистем за реактивною потужністю і напругою застосовується вираз

$$s^{(k)} = -\nabla f(X^{(k)}) + s^{(k-1)} \omega_k. \quad (7)$$

При цьому коефіцієнт напрямку ω_k розраховується за формулою

$$\omega_k = \frac{(\nabla f(X^{(k)}), \nabla f(X^{(k)}))}{(\nabla f(X^{(k-1)}), \nabla f(X^{(k-1)}))}, \quad (8)$$

За використання для оптимізації режимів електричних систем за реактивною потужністю і напругою найперспективніших градієнтних методів виникає необхідність у визначенні частинних похідних від цільової функції $f(X)$ за незалежними змінними оптимізації. Для визначення складових вектора градієнта $\nabla f(X^{(k)})$ використовуються методи, які базуються на правилах диференціювання складних неявних функцій [4, 6].

Ітераційний метод розрахунку частинних похідних аналогічний багатоопорному варіанту методу розрізання контурів. Як і раніше, загальний ітераційний процес розподіляється на два: зовнішній процес, на якому досягають виконання умов, заданих рівняннями системи, отриманою диференціюванням рівнянь усталеного режиму; внутрішній процес, імітуючий передачу похідних, які виконують роль аналогів напруг та струмів, по розрахунковій схемі електричної мережі. Як і при розрахунку усталеного режиму, електрична система розподіляється на джерела енергії, електричну мережу та навантажувальні елементи.

В складі пунктів мережі виділено опорні, від яких починаються конфігураційні зони, та навантажувальні пункти. Які опорні приймаються балансувальні пункти, пункти з фіксацією модулів напруг та фіксацією потужності.

За аналогією з розрахунком усталеного режиму ітерація розрахунку похідних для кожного навантажувального пункту може складатися з двох дій. Перша — визначення нев'язки частинних

похідних в пункті $E_s^{(i)}$, а друга — уточнення значень похідних $\frac{\partial I_s^{(i)}}{\partial Q_j}$; $\frac{\partial I_s^{(i)}}{\partial U_t}$; $\frac{\partial I_s^{(i)}}{\partial e_r}$. Напруга балансувальних пунктів схеми не залежить від реактивної потужності j -го джерела, напруги t -го пункту та r -ї регулювальної ЕРС. Тому відповідні похідні $\frac{\partial U_w^{(i)}}{\partial Q_j}$; $\frac{\partial U_w^{(i)}}{\partial U_t}$; $\frac{\partial U_w^{(i)}}{\partial e_r}$ дорівнюють нулю.

Для пунктів з фіксацією модулів напруги та потужності на зовнішньому процесі розраховуються нев'язки частинних похідних та уточнюються значення похідних $\frac{\partial U_k^{(i)}}{\partial Q_j}$; $\frac{\partial U_k^{(i)}}{\partial U_t}$; $\frac{\partial U_k^{(i)}}{\partial e_r}$.

Для кожної із зон електричної мережі на кожному кроці внутрішнього ітераційного процесу здійснюється відображення частинних похідних від напруг опорних і струмів навантажувальних пунктів в частинні похідні від струмів опорних і напруг навантажувальних пунктів. Ця задача ефективно розв'язується за допомогою двох евристичних алгоритмів, моделюючих для кожної із зон розрахункової схеми два фізичних напрямки причинно-наслідкових впливів: передачу частинних похідних напруги опорних пунктів до навантажувальних і передачу частинних похідних струмів від навантажувальних пунктів до опорних.

Алгоритм розрахунку передбачає компактне збереження конфігураційної моделі мережі в пам'яті комп'ютера. У порівнянні з класичними матрицями інцидентів ефективнішими виявилися «адресні моделі» [1, 2]. Адресна модель електричної мережі складається з посилань, що дозволяють оперативно «переключати увагу» алгоритму від вітки схеми до вузла, який їй належить, і навпаки. Під час побудови адресних посилань у процесі автоматичного сортування інформації вихідна конфігураційна модель перетворюється в асоціативну, що істотно спрощує процедуру пошуку. Оскільки реалізація адресної моделі вимагає додаткового часу, це виправдано тільки для багаторазово повторюваних розрахунків — ітераційних і оптимізаційних.

Розрахункова схема електричної мережі поділяється на зони, що оточують задані балансувальні пункти. Ці пункти є центрами, від яких починається побудова зон розрахункової схеми. Кожна зона має вигляд дерева мережі і складається з ярусів, які починаються одночасно від всіх опорних пунктів. Контури схеми усередині зон і зв'язки між зонами замикаються за допомогою хорд.

Якщо функція витрат на спорудження й експлуатацію додаткових джерел реактивної потужності, покриття втрат активної потужності в мережі й існуючих джерел реактивної потужності $f(X)$ в загальному випадку задовольняє вимогам унімодальності, безперервності й може бути однократно продиференційована, то алгоритм оптимізації може бути записаний в такий спосіб.

1. Задаємо початкове наближення вектора незалежних змінних оптимізації $X^{(k)}$.
2. Як напрямок пошуку вибираємо напрямок антиградієнта в k -й точці простору

$$s^{(k)} = -\nabla f(X^{(k)}).$$

3. Визначаємо оптимальний коефіцієнт довжини кроку $\xi_{\text{опт}}^{(k)}$.

4. Виконуємо крок у напрямку пошуку $s^{(k)}$ з оптимальним коефіцієнтом довжини кроку

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{jk} \nabla f(X^{(k)}).$$

5. Перевіряємо закінчення процесу оптимізації $\|\nabla f(X^{(k+1)})\| \leq \varepsilon$, де $\|\nabla f(X^{(k+1)})\|$ — норма вектора $\nabla f(X^{(k+1)})$; ε — точність розрахунку. Якщо нерівність виконується, то переходимо до пункту 8 алгоритму, якщо ні, то — до пункту 6.

6. Визначаємо напрямок пошуку, сполучений з попереднім,

$$s^{(k+1)} = -\nabla f(X^{(k+1)}) + s^{(k)} \frac{(\nabla f(X^{(k+1)}), \nabla f(X^{(k+1)}))}{(\nabla f(X^{(k+1)}), \nabla f(X^{(k+1)}))}.$$

7. Змінюємо номер кроку оптимізації $k = k + 1$ і переходимо до пункту 3 алгоритму.

8. Кінець.

У пункті 3 алгоритму для визначення оптимального коефіцієнта довжини кроку використовується метод одномірного пошуку, заснований на проведенні квадратичної апроксимації цільової функції після виконання двох пробних кроків у напрямку пошуку.

Щоб уникнути відмов методу рекомендується через певну кількість кроків виконувати процедуру «відновлення» алгоритму. При цьому як напрямок пошуку приймається не напрямок, сполучений з попереднім, а сам напрямок антиградієнта.

Під час оптимізації сталих режимів електричних систем за реактивною потужністю і напругою обмеження рівності враховуються в процесі розрахунку сталого режиму на кожному кроці обчислювального процесу з отриманими компонентами вектора $X^{(k)}$. Для обліку обмежень за незалежними змінними використовується метод стримуючих обмежень, а для задоволення функціональних обмежень застосовується комбінований метод штрафних функцій [6].

Суть методу стримуючих обмежень така. Починаємо від точки простору, що задовольняє всім обмеженням, виконуємо крок пошуку і перевіряємо дотримання обмежень у новій точці. Обмеження, що не задовольняються в цій точці, називаються стримуючими. Щоб задовольнити їх, фіксуємо відповідні змінні на порушених межах і виконуємо новий крок пошуку. Далі необхідно уточнити склад стримуючих обмежень. У залежності від значень частинних похідних обмеження, раніше включені до складу стримуючих, можна виключити з розгляду. Одночасно можуть виникати нові стримуючі обмеження і т. д.

Для врахування стримуючих обмежень за $x_j < x_j^{\min}$ змінна x_j береться рівною порушеній межі x_j^{\min} , а за $x_j > x_j^{\max}$ — рівній x_j^{\max} . Якщо змінна раніше зафіксована на межі x_j^{\min} , то обмеження виключається зі складу стримуючих за умови $\frac{\partial f(X)}{\partial x_j} < 0$. Якщо змінна зафіксована на межі x_j^{\max} ,

то умова виключення цього обмеження зі складу стримуючих має вигляд $\frac{\partial f(X)}{\partial x_j} > 0$.

Для обліку функціональних обмежень (4) під час оптимізації режимів електричних систем застосовується комбінований метод зовнішніх і внутрішніх штрафних функцій, що дозволяє призначати як зовнішні штрафи за умови порушення обмежень, так і внутрішні — за наближення до границь допустимої області [6, 9]. За використання комбінованого методу штрафних функцій задача оптимізації режиму перетворюється в послідовність задач, кожна з яких не має обмежень. З цією метою множина індексів усіх функціональних обмежень розбивається на дві підмножини. Перша з них містить у собі індекси обмежень, що були порушені, а друга — індекси обмежень, які виконані в початковій точці пошуку

При цьому цільова функція записується у вигляді

$$\Phi(X) = f(X) + \frac{1}{\varepsilon'} P'(X) + \varepsilon'' P''(X), \quad (9)$$

де $P'(X)$ і $P''(X)$ — відповідно зовнішні і внутрішні штрафні функції; ε' і ε'' — коефіцієнти штрафу зовнішніх і внутрішніх штрафних функцій. Зовнішні штрафні функції призначають штрафи у разі порушень обмежень, індекси яких входять у першу підмножину. Внутрішні штрафні функції призначають штрафи у разі наближення залежних характеристик до границь допустимої області і призначаються для обмежень, індекси яких входять у другу підмножину.

Початкові значення коефіцієнтів ε' і ε'' розраховуються на першому циклі оптимізації як відношення довжин векторів $\nabla f(X)$, $\nabla P'(X)$, $\nabla P''(X)$:

$$\varepsilon'^{(1)} = \frac{|\nabla P'(X)|}{|\nabla f(X)|}; \quad \varepsilon''^{(1)} = \frac{|\nabla f(X)|}{|\nabla P''(X)|}. \quad (10)$$

Після визначенні кожної точки відносного мінімуму функції $\Phi(X)$ розраховуються нові значення коефіцієнтів. При цьому всі вони повинні бути позитивними, значення кожного наступного коефіцієнта повинно бути менше попереднього і межа послідовності коефіцієнтів за спрямування номера коефіцієнта до нескінченності повинна дорівнювати нулю.

В цілому процес оптимізації будується таким чином. При початкових значеннях коефіцієнтів штрафу ε' і ε'' визначаємо точку мінімуму функції (9) $X^{(1)}$. В отриманій точці перевіряємо виконання обмежень за незалежними змінними. Обмеження, які не виконуються в цій точці, називаються стримуючими. Щоб задовольнити їх, фіксуємо відповідні компоненти вектора X на порушених межах. Потім знаходимо нові значення коефіцієнтів $\varepsilon'^{(2)}$ і $\varepsilon''^{(2)}$ та знову визначаємо точку відносного мінімуму цільової функції $X^{(2)}$. Далі необхідно уточнити склад стримуючих обмежень. В залежності від значень частинних похідних $\frac{\partial \Phi(X^{(k)})}{\partial x_j}$ деякі обмеження, які раніше були

включені до складу стримуючих, можуть бути виключені з розгляду. Одночасно можуть виникати нові стримуючі обмеження. Якщо їх склад залишився без змін і виконуються всі функціональні обмеження, то на цьому оптимізаційний розрахунок завершується. Якщо ні, тоді необхідно знову розрахувати значення коефіцієнтів штрафу, визначити положення точки відносного мінімуму функції $\Phi(X)$, уточнити склад стримуючих обмежень і т. д.

Висновки

Методи та алгоритми оптимізації режимів електричної мережі за реактивною потужністю та напругою, що запропоновані в роботі, забезпечують ефективне розв'язання задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Розрахунки показали, що запропонована методика оптимізації характеризується хорошою збіжністю, досить стійка до вибору початкових наближень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баженов В. А. Модели и методы оптимизации установившихся режимов сложных электрических систем : учеб. пос. / В. А. Баженов. — Киев : КПИ, 1981. — 111 с.
2. Баженов В. А. Модели оптимального развития энергосистем : учеб. пос. / В. А. Баженов. — Киев : КПИ, 1984. — 100 с.
3. Методы оптимизации режимов энергосистем / под ред. В. М. Горнштейна. — М. : Энергия, 1981. — 336 с.
4. Крумм Л. А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами / Л. А. Крумм. — Новосибирск : Наука, 1977. — 368 с.
5. Кацадзе Т. Л. Модели та методи оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин / Т. Л. Кацадзе, В. А. Сулейманов, В. А. Баженов // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2014. — № 4. — С. 58—66.
6. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Б. И. Тугай, В. А. Баженов. — Киев : Наукова думка, 1992. — 216 с.
7. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход / Э. Полак. — М. : Мир, 1974. — 375 с.
8. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы / Р. Тьюарсон. — М. : Мир, 1977. — 189 с.
9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. — М. : Мир, 1975. — 534 с.

Стаття рекомендована до опублікування кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

Баженов Володимир Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних мереж та систем, e-mail: v_bazenov@ukr.net .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. A. Bazhenov¹

Questions of Optimization of Electrical Networks Operation of Modern Energy Systems

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The paper considers the development and use of methods for optimization of the established modes of electric networks of modern power systems by reactive power and voltage, which provide an effective solution of the task, the implementation of technical and resource constraints in the form of equality and inequality. The proposed algorithm, which uses the combined gradient method, has a rather high level of convergence, resistance to the choice of initial approximations.

Keywords: electric network, power system, optimization of functioning, technical and resource constraints, network elements.

Bazhenov Volodymyr A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electric Networks and Systems, e-mail: v_bazenov@ukr.net

В. А. Баженов¹

Вопросы оптимизации функционирования электрических сетей современных энергосистем

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Рассмотрены вопросы разработки и использования методов оптимизации установившихся режимов электрических сетей современных энергосистем по реактивной мощности и напряжению, обеспечивающих эффективное решение поставленной задачи, выполнение технических и ресурсных ограничений в виде равенств и неравенств. Предложенный алгоритм, который использует метод сопряженных градиентов, имеет достаточно высокий уровень сходимости, устойчивость к выбору начальных приближений.

Ключевые слова: электрическая сеть, энергосистема, оптимизация функционирования, технические и ресурсные ограничения, элементы сети.

Баженов Владимир Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и систем, e-mail: v_bazenov@ukr.net