

УДК 621.316

Ю.П. ЗУБЮК (канд.техн.наук), І.В. ТРАЧ. (канд.техн.наук)

Інститут електродинаміки НАН України

igor.trach@gmail.com

КОМБІНОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВИБОРУ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК В РАДІАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Розглянуто комбінований алгоритм для вибору конденсаторних установок та їх розташування в радіальних розподільних електромережах, який забезпечує зниження втрат та покращення профілю напруги. В алгоритмі використовується комбінація методу поступок, техноценологічного підходу та модифікований метод рою часток.

Ключові слова: конденсаторна установка, зниження втрат, радіальна мережа, техноценоз, оптимізація методом рою часток, метод поступок, комбінований алгоритм.

Постановка задачі компенсації реактивної потужності (РП) в електричних мережах (ЕМ) за допомогою конденсаторних установок (КУ), в першу чергу, передбачає вибір їхньої потужності та розташування, які забезпечують максимальне зниження втрат електроенергії від протікання реактивних струмів, що є суттєвою складовою енергоощадності в ЕМ. Рішенню вказаної актуальної задачі присвячена суттєва кількість публікацій, наприклад детально проаналізованих в [1], в яких задача мінімізації втрат зазвичай [2] подається як

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_{\Sigma \Delta I} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i + \sum_{i=1}^n \sum_{v=\min}^{v=\max} \Delta P_{iv} \rightarrow \min \quad (1)$$

де ΔP_{Σ} , ΔP_i - відповідно загальні втрати активної потужності та втрати в i -му фрагменті/вузлі ЕМ, що складається з n вузлів; v - номер вищої гармонічної складової.

Зазвичай, мінімізація втрат має відбуватись за мінімальних вартісних показників, наприклад поданих у вигляді:

$$B = K_p \Delta P_{\Sigma} + \sum_{i=1}^{nc} K_{ci} Q_{ci} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де K_p - еквівалент річної вартості на одиницю реальних втрат (грн/кВт/рік), K_{ci} - річна вартість реактивної потужності відповідної КУ, Q_{ci} - реактивна потужність відповідної i -ї КУ, nc - загальна кількість встановлених КУ.

Функція (1) має наступні основні обмеження:

$$\text{- Обмеження за напругою } U_{\min} \leq |U_i| \leq U_{\max}, \quad (3)$$

де U_{\min} , U_{\max} - значення мінімально та максимально допустимої напруги (наприклад, за ДСТУ 13109-97), U_i - середньоквадратичне значення напруги в i -тому вузлі.

- Обмеження за коефіцієнтом несинусоїдальності напруги (застосовується за наявності в ЕМ суттєвої кількості джерел вищих гармонічних складових струмів або інформації про спотворення форми напруги):

$$THDU_i \leq THDU_{\max}, \quad (4)$$

де $THDU_i$, $THDU_{\max}$ - відповідно коефіцієнт несинусоїдальності напруги в i -му вузлі та його максимально допустиме значення (наприклад, за ДСТУ 13109-97).

- Обмеження за сумарною потужністю КУ:

$$Q_{c\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{c\max} \quad (5)$$

де Q_{ci} - потужність КУ в i -му вузлі.

- Обмеження за струмом фідера після встановлення КУ, який не повинен перевищувати номінальний струм фідера

$$I_i \leq I_{\text{ном}i}, \quad (6)$$

де I_i - струм у вузлі/фідері i після встановлення КУ; $I_{\text{ном}i}$ - номінальний струм фідера/вузла.

Аналіз публікацій, зокрема, показує, що врахування критеріїв (1) та (2) та вказаних обмежень далеко не завжди дає позитивний результат, наприклад з точки зору інженерної інтуїції/логіки, можливостей побудови чи реконструкції ЕМ в цілому, зокрема завдяки існуванню суб'єктивного підходу до їхньої ієрархії, наданням

© Зубюк Ю.П., Трач І.В., 2013

переваги економічній або технічній стороні задачі, неврахуванню особливостей ціноутворення в умовах особливих станів економіки тощо. З огляду на вказане, **метою роботи** є розроблення алгоритму вибору КУ в радіальних розподільних електромережах, який забезпечує підвищення ефективності вирішення задачі, що розглядається, шляхом введення додаткового критерію в поєднанні з високоефективним обчислювальним методом.

Для рішення оптимізаційних задач за окремими критеріями застосовано метод оптимізації за допомогою рою часток (Particle Swarm Optimization-PSO), який має підвищену продуктивність порівняно з іншими сучасними методами. Останнім часом саме за допомогою PSO-методу і його модифікацій здебільшого вирішують актуальні задачі визначення параметрів та місць розташування КУ в ЕМ, в т.ч. в розподільних мережах середньої та високої напруги. В PSO-методі організоване керування роєм часток, що переміщуються в багатовимірному просторі рішень, кожна з яких є потенційним рішенням оптимізаційної задачі; позиція частки m визначається при взаємодії з усіма іншими частками рою, що в ітеративному процесі покривають простір рішень і рухаються до глобального екстремуму; закінчення процесу відбувається при виконанні відповідного критерію зупини.

В умовах існуючих технічних похибок та неоднозначного ціноутворення на «перехідному» та кризовому етапах економіки, для вирішення багатокритеріальної задачі (1) і (2) застосовується метод поступок, при якому кожному з мінімальних значень призначається поступка δ , %, якою є припустиме погіршення відповідного критерію, виходячі з практичних міркувань, вимог точності тощо.

Пропонований алгоритм складається з наступних процедур.

1. За результатом здійснення процедур оптимізації PSO-методом, при якому кожній частинці рою m відповідає вектор Y_{p_m} провідностей КУ у відповідних n вузлах ЕМ, формується базова множина рішень Y_1 за критерієм (1) з можливим урахуванням одного чи кількох з обмежень (3)-(6). Множина Y_1 формується з векторів Y_{p_m} , що знаходяться в діапазоні припустимої поступки δ_1 мінімальних втрат:

$$Y_{p_m} = (y_1, y_2, \dots, y_n) : \Delta P_{\Sigma}(y_1, y_2, \dots, y_n) \leq (1 + \delta_1) \Delta P_{\Sigma \min},$$

2. З множини рішень Y_1 з допомогою PSO-метода формується множина Y_2 векторів Y_{B_m} за допомогою критерія (2) і його припустимої поступки δ_2 ,

$$Y_{B_m} = (y_1, y_2, \dots, y_n) : B(y_1, y_2, \dots, y_n) \leq (1 + \delta_2) B_{\min},$$

Множина припустимих рішень Y_2 може визначатись PSO-методом окремо від Y_1 , тоді визначається перетин рішень

$$Y_2' = Y_1 \cap Y_2 \neq \emptyset$$

У випадку наявності порожньої множини \emptyset , далі послідовно змінюються припустимі похибки δ_1 та δ_2 і повторюються обчислення Y_2 чи Y_2' .

3. Далі з множини Y_2 (чи Y_2' в разі застосування і існування простору перетину) проводиться вибір найкращого рішення за додатковим техноценологічним критерієм подібності ранжованих значень провідностей КУ –гіперболічному H -розподіленню [3]. Методика оцінювання ефективності техноценозів (ТЦ), в т.ч. базується на приведенні рангових параметричних розподілень, наприклад упорядкованих електричних виробів (особин) за видоутворюючим параметром, до гіперболічної залежності виду [3,4]

$$C(r) = C_1 / r^{\beta}, r = 1, 2, \dots, d \quad (7)$$

де r – параметричний ранг; C_1 - максимальне значення параметра особини з рангом $r=1$; β - ранговий коефіцієнт, що характеризує степінь крутизни кривої розподілення; d - загальна кількість рангів.

При цьому при застосуванні ТЦ-критерію, важливим для фактором вибору була величина потужності КУ першого рангу та величина рангового коефіцієнту, які разом визначають діапазон потужностей КУ пропонованих для встановлення і врешті їх кількість: за умови подібності до нормованої апроксимуючої гіперболи за $0,5 \leq \beta \leq 1,5$, що відповідає найефективнішому стану техноценоза [4]. При цьому для визначення найкращого H -розподілу за першим параметром та ранговим коефіцієнтом може бути застосована відповідна поступка δ_3 для параметру C_1 . За результатами визначення фіксованих значень потужностей КУ для режиму максимальних навантажень, надалі вирішується задача для визначення ступенів регулювання, наприклад, з використанням раціоналізації кодів увімкнення, розповсюджених на практиці рішень у відсотках від номінальної РП КУ, узгодження чутливості регуляторів та трансформаторів струмів тощо. Важливо відмітити, що збільшення кількості КУ з багатоступеневим регулювання розширює простір ЕМ, як об'єкту ТЦ-аналізу.

Так, в досліджених тестових ЕМ, виявлено, що при застосуванні пропонованого додаткового ТЦ-критерію, найкраще рішення забезпечує суттєво знижену потужність КУ першого рангу, а кількість вузлів, де треба встановити КУ меншої потужності збільшується порівняно з варіантом розрахунку без застосування вказаного критерію.

Розрахунки за допомогою PSO-методу проводились з використанням класичного алгоритму роя часток, який використовують для оптимізації безперервних нелінійних функцій з можливістю регулювання швидкості сходимості алгоритму, зокрема регулювання загальної кількості позицій часток. Для рішення задачі, що розглядається, застосована модифікація PSO-методу, що полягає в наступному: проміжні результати кожної ітерації обчислень в процесі розрахунків не відкидаються, а групуються у відповідні простори рішень наступного алгоритму оптимізації; додатково регулюється загальна кількість часток за рахунок вибору коефіцієнта інерції.

В якості прикладу для аналізу зазначеним алгоритмом розглядалися тестові схеми складних радіальних мереж з кількома десятками вузлів. Розраховувались фіксовані параметри КУ для характерних періоду максимальних втрат електроенергії в ЕМ та вартості втрат електроенергії. Вартість КУ визначалась за середніми цінами європейських компонентів, що існували на ринку України у 2012 р. Припустимі похибки в процесі обчислень збільшувались: δ_1 досягала 5% що, наприклад, знаходиться в межах похибок технічних параметрів, а δ_2 досягала 10% , що, наприклад, знаходиться в межах відхилень середніх ринкових цін та звичайних знижок редуціонів. За результатами визначення фіксованих значень потужностей КУ для режиму максимальних навантажень, надалі вирішувалась задача визначення ступенів регулювання з використанням інженерної логіки. Вартість КУ враховувалась для двох випадків: для нерегульованих конденсаторних батарей та автоматичних КУ, вартість яких суттєво (в 3-6 разів) збільшена за рахунок комірок, комутаційної, захисної, регулювальної апаратури, засобів захисту та електромагнітної сумісності

За результатами розрахунків зменшення втрат в тестових мережах порівнювалось з мінімально можливим рівнем втрат в ЕМ, визначеним за алгоритмом (1) без обмежень. Вирішення задачі за критеріями (1) та (2) давало розташування КУ в невеликій кількості вузлів, причому потужності КУ, встановлених в деяких вузлах мали потужність, що перевищувала середню величину навантажень у вузлах в кілька разів, що може бути придатним для проектування нових ЕМ. Однак, для впровадження КУ в існуючих мережах без повної реконструкції/заміни електрообладнання вузлів, необхідно використовувати певні обмеження, наприклад $Q_{ci} \leq 2Q_{Li}$, де Q_{ci} потужність КУ, Q_{Li} реактивна потужність i -го вузла ЕМ. Розрахунки вказаним комбінованим алгоритмом дозволили забезпечити зменшення сумарної перекомпенсації у вузлах встановлення КУ та суттєве зменшення суми модулів реактивної потужності всіх вузлів

Висновок. Застосування пропонованого комбінованого алгоритму, порівняно з застосуванням тільки критеріїв (1) та (2), дозволило отримати розподіл потужностей КУ у вузлах тестових ЕМ, що забезпечує менший розбіг між максимально і мінімальною потужністю КУ, встановлення їх в більшій кількості вузлів зі зменшеними одиничними потужностями та більшу стійкість до зміни напруг в разі виходу з ладу окремих КУ. Запропонований комбінований алгоритм, що включає в себе додатковий ТЦ-критерій, застосовує метод поступок та модифікований розрахунковий PSO-алгоритм, представляється ефективним, в т.ч. а рахунок специфічного врахування економічних та технічних показників системи компенсації реактивної потужності та відносної простоти практичної реалізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sirjani R. Heuristic Optimization Techniques to Determine Optimal Capacitor Placement and Sizing in Radial Distribution Networks: A Comprehensive Review / R. Sirjani, A. Mohamed, H. Sharef // *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7a.- 2012.- P.1-7.
2. Eajal A.A. Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems. Part II: Problem Formulation and Solution Method / A.A. Eajal, M.E. El-Havary // 14th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power Bergamo, Italy.- 2010.- P.1-6.
3. Кудрин Б.И. Введение в технетику / Б.И. Кудрин .- Томск: Изд-во Томск.Гос.ун-та.- 1993.- 552 с.
4. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов / В.И. Гнатюк.- Вып. 29. Ценологические исследования.- М.: Изд-во ТГУ-Центр системных исследований.- 2005.-384 с.

REFERENCES

1. Sirjani R., Mohamed A., Sharef H. Heuristic Optimization Techniques to Determine Optimal Capacitor Placement and Sizing in Radial Distribution Networks: A Comprehensive Review // *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7a. 2012; 1-7.
2. Eajal A.A., El-Havary M.E. Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems. Part II: Problem Formulation and Solution Method// 14th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power Bergamo, Italy. 2010; 1-6.
3. Kudrin B.I. Introduction to Technetics/ Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 1993. 552 p.(Rus)

4. Gnatyuk V.I. The Law of Technocoenosis Optimum Construction. -Vol.29. Coenosis Research. -M.: Publishing House of Tomsk State University - Center for Systems Research, 2005. 384 p.(Rus)

Надійшла до редакції 28.03.2013

Рецензент: М.В. Гребченко

Ю.П.ЗУБЮК, И.В. ТРАЧ

Институт электродинамики НАН Украины

Комбинированный алгоритм выбора конденсаторных установок в радиальных электрических сетях. Рассмотрен комбинированный алгоритм для выбора конденсаторных установок и их размещения в радиальных распределительных электросетях, который обеспечивает снижение потерь и улучшение профиля напряжения. В алгоритме используется комбинация метода уступок, техноценологического подхода и модифицированного метода роя частиц.

Ключевые слова: конденсаторная установка, снижение потерь, радиальная сеть, техноценоз, оптимизация методом роя частиц, метод уступок, комбинированный алгоритм.

Iu. ZUBIUK, I. TRACH

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine

Combined Algorithm for Capacitor Banks Choice in Radial Networks. The problem of shunt capacitor banks choice and placement in nodes of radial distribution networks has been formulated by using two main criteria: the reducing of power loss and cost of capacitor banks. The first criteria has constraint: keeping the voltage profile. Additionally used the Technical-Coenose approach in order to obtain the specific solution for radial distribution network under reconstruction. The calculation procedures are based on Particle Swarm Optimization approach and method of concessions. The results show that obtained solutions of shunt capacitor banks placement satisfies the formulated problem and show the effectiveness.

Key words: capacitor bank, loss reduction, radial network, Particle Swarm Optimization, technical coenosis, method of concessions, combined algorithm.