

ОПТИМАЛЬНА РЕКОНФІГУРАЦІЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Б.В. Циганенко

Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг,
вул. Смоленська, 19, Київ, Україна, e-mail: tsyganenko@nerc.gov.ua

Досліджено проблеми, пов'язані з експлуатацією розподільних електричних мереж напругою 6-35 кВ. Показано актуальність застосування технологій Smart Grid до децентралізованого управління режимами розподільних мереж. Сформовано цільову функцію оптимальності конфігурації радіальної електричної мережі та представлено її математичну модель, адаптовану до апарату теорії генетичних алгоритмів. Бібл. 7.

Ключові слова: інтелектуальні розподільні мережі, реконфігурація, оптимізація, генетичний алгоритм.

Національна комісія України, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики, приділяє особливу увагу показникам якості, надання послуг із передачі та постачання електроенергії, надійності та економічності електропостачання. Вирішення проблеми надійного та якісного електропостачання в розподільних електричних мережах напругою 6-35 кВ ґрунтується на оптимальному управлінні перетоками потужностей, параметрами регулюючих та компенсуючих пристроїв тощо. Розв'язання такої задачі на сучасному етапі розвитку інтелектуальних технологій вимагає створення «розумних» електричних мереж у межах реалізації концепції Smart Grid [4]. Особливої актуальності реалізація концепції Smart Grid набуває в задачах управління режимами розподільних електричних мереж напругою 6-35 кВ, які характеризуються пониженим рівнем централізації диспетчерського управління. Разом з тим, у таких електричних мережах вирішення проблеми інтелектуалізації управління ускладнюється великою розмірністю системи, її пониженою спостережністю та обмеженим набором технічних заходів адаптивного управління.

Під час експлуатації часто виникає проблема зміни топології розподільних електричних мереж – реконфігурації робочої схеми. Очевидно, що кожна з можливих робочих схем характеризується набором таких показників, як надійність електропостачання, якість електричної енергії на шинах споживачів, втрати потужності на передавання електричної енергії і т.п. Все це визначає задачу оптимізації конфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі, яка є динамічною та має вирішуватися в режимі реального часу. Особливої актуальності задача online оптимізації конфігурації робочої схеми набуває для електричних мереж, з підключеними джерелами розподіленої генерації, для яких, відповідно до поточних умов, можуть змінюватися не тільки значення потоків потужностей, а й напрями перетоків електричної енергії.

Мета роботи полягає у формуванні математичної моделі функції оптимальності конфігурації розподільної електричної мережі, призначеної для реконфігурації її робочої схеми.

У загальному випадку задача оптимізації конфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі має на меті забезпечення:

- 1) мінімальної зв'язності робочої схеми;
- 2) якості електричної енергії на шинах споживачьких підстанцій за напругою;
- 3) нормованих показників надійності електропостачання споживачів;
- 4) мінімуму втрат активної потужності на передавання електричної енергії по мережі.

Для проведення оптимізації конфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі використано наступну форму цільової функції

$$\Phi = k_1 \sum M_i + k_2 \sum |\delta U_i| + k_3 \sum \alpha_i P_i Y_i + k_4 \sum I_i^2 r_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де k_1, k_2, k_3, k_4 – вагові коефіцієнти, призначені для поєднання у складі цільової функції неспівставних параметрів; M_i – сигнальний коефіцієнт, який дорівнює одиниці у разі, якщо контакти i -го комутаційного апарату замкнено, і нулю – в іншому разі; δU_i – відхилення робочої напруги i -го вузла схеми за допустимі межі; α_i – ступінь обмеження навантаження в i -му вузлі робочої схеми у разі виникнення аварійного збурення; P_i – активна потужність навантаження i -го вузла схеми; Y_i – питомі збитки, обумовлені обмеженням навантаження i -го вузла схеми; I_i – модуль робочого струму i -ї ділянки схеми; r_i – активний опір i -ї ділянки.

Аналіз виразу (1) свідчить, що запропонована функція оптимальності конфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі є складною нелінійною дискретною функцією багатьох змінних, форма якої обмежує використання традиційних методів оптимізації, наприклад, лінійного програмування. Ситуацію ускладнює невизначеність вагових коефіцієнтів груп окремих факторів цільової функції.

Останнім часом різними авторами запропоновано низку методів та алгоритмів оптимізації конфігурації розподільних електричних мереж, більшість яких базується на евристичних методах та методах штучного інтелекту, зокрема – імітації відпалу, штучних нейронних мережах, алгоритмах пошуку із заборонами, селективному методі рою часток тощо [1, 5]. При вирішенні задачі оптимізації за досить складною цільовою функцією ефективним є математичний апарат, який ґрунтується на математичному апараті теорії генетичних алгоритмів [3, 7].

Генетичний алгоритм представляє собою евристичний метод розв'язання оптимізаційної задачі високої обчислювальної складності. Тут замість повного перебору варіантів положення резервних перемичок (робочої конфігурації) розподільної електричної мережі, що потребує великих обсягів ресурсів та часу, апарат генетичних алгоритмів може дати швидко, хоча, інколи, недостатньо обґрунтоване рішення. Основна ідея пропонованого підходу полягає у представленні характеристик і властивостей можливих рішень щодо конфігурації розподільної мережі за допомогою двійкового коду та формування вектора, що містить бінарні ланцюжки властивостей варіантів схемних рішень. Очевидно, що такий вектор певною мірою відповідає спрощеній математичній моделі генотипу біологічного організму, який містить повну інформацію про цей організм. Вказана обставина дозволяє застосувати основні генетичні операції схрещування, що буде призводити до формування нових рішень з новими властивостями [2, 6].

Безпосереднє використання функції оптимальності (1) як фітнес-функції ускладнене тією обставиною, що виконання кожного кроку генетичного алгоритму вимагає моделювання відповідного усталеного режиму електричної системи із визначенням сумарних втрат потужності, допустимості режиму напруги тощо. Вимоги інженерної точності до моделювання розподільних електричних мереж дозволяють лінеаризувати режимну задачу і як фітнес-функцію використовувати матричний вираз

$$\Delta P_{\Sigma} = \mathbf{J}^T \mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C} \hat{\mathbf{J}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де \mathbf{J} – вектор-стовпець вузлових струмів; \mathbf{R} – діагональна матриця активних опорів ділянок схеми; $\mathbf{C} = \mathbf{M}^{-1}$ – матриця струморозподілу по ділянках схеми розподільної мережі; \mathbf{M} – перша матриця інцидентів.

Крім виразу (2) фітнес-функція має задовольняти обмеженням вигляду

$$\delta U_{\%} = \frac{1}{10U_n^2} [\mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{P} + \mathbf{C}^T \mathbf{X} \mathbf{Q}] \leq \delta U_{\max}, \quad (3)$$

де U_n – номінальна напруга електричної системи; \mathbf{P} , \mathbf{Q} – вектор-стовпці активних та реактивних навантажень розподільної мережі відповідно; \mathbf{X} – діагональна матриця реактивних опорів ділянок схеми; δU_{\max} – вектор-стовпець гранично допустимих втрат напруги в розподільній електричній мережі, виражений у відсотках. Можна показати, що обмеження (3) забезпечує одночасно й конфігураційну зв'язність електричної мережі.

Запропоновані матричні вирази (2) та (3) фітнес-функції оптимальності конфігурації розподільної електричної мережі було застосовано до розв'язання задачі реконфігурації робочої схеми розподільних електричних мереж СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго» із визначенням оптимальних місць розташування резервних перемичок за допомогою програмного середовища Easy NP 2.2. Моделювання було здійснене для перспективної схеми розподільної електричної мережі після переведення її на номінальну напругу 20 кВ.

Досліджувана електрична мережа отримує живлення від двох вузлових підстанцій «Гнівань» та «СЗБ». Крім того передбачене резервування живлення від підстанції «Агрономічна». Мережа забезпечує живлення 98 КТП, містить 187 ліній електропередавання повітряного та кабельного виконання та 116 термінальних вузлів. Встановлена потужність електричної системи становить 10,5 МВт.

За поточної конфігурації робочої схеми електричної мережі сумарні втрати активної потужності складають 0,19 МВт. Реалізація генетичного алгоритму в програмному середовищі Easy NP з використанням розробленої фітнес-функції (2) та (3) визначила зміну положення резервних перемичок в електричній мережі, тобто її реконфігурацію, перерозподіливши навантаження КТП між живлячими фідерами таким чином, що сумарні втрати активної потужності зменшилися до 0,17 МВт, приблизно на 10%. Зменшення втрат активної потужності підтвердили експериментальні розрахунки, проведені в середовищі Power Factory.

Істотною проблемою, пов'язаною з використанням генетичних алгоритмів у задачах оптимізації конфігурації розподільних електричних систем, є налагодження алгоритму. При цьому виборі підлягають такі характеристики алгоритму, як кількість схем початкової популяції; тривалість їхнього життєвого циклу; спосіб формування батьківських пар на кожному етапі роботи алгоритму; визначення імовірнісних налаштувань операцій кросинговеру і мутацій тощо. Задача налаштування генетичного алгоритму є багатofакторною і не має типового однозначного розв'язку. Як правило, знижене значення обсягу популяції характеризується недостатньою різноманітністю генотипів і може призвести до передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму, який не відповідає точному розв'язку задачі оптимізації. Навпаки, надмірно завищена кількість схемних рішень популяції часто призводить до неефективного схрещування неперспективних конфігурацій, що ускладнює і істотно уповільнює збіжність алгоритму. Схожа ситуація спостерігається і з налаштуванням характеристик мутацій. Для налаштування генетичних алгоритмів оптимізації конфігурації розподільної електричної мережі ефективним є апарат нечіткої логіки, який забезпечує налаштування алгоритму в багатовимірному просторі регулювання за алгоритмом Сугено.

Висновки.

Функція оптимальності конфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі є складною нелінійною дискретною функцією багатьох змінних, форма якої обмежує використання традиційних методів оптимізації. Для розв'язання оптимізаційної задачі реконфігурації розподільної електричної мережі запропоновано виконати лінеаризацію функції оптимальності, що дозволяє використовувати її як фітнес-функцію в апараті генетичних алгоритмів без виконання повного моделювання режимів розподільних мереж.

Розроблена математична модель фітнес-функції оптимальності конфігурації розподільної електричної мережі забезпечує мінімум втрат активної потужності за збереження зв'язності схеми та дотримання якості електричної енергії за напругою. Запропонована функція оптимальності використана під час оптимальної реконфігурації розподільної електричної мережі СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго» в програмному середовищі Easy NP, що забезпечило зниження втрат активної потужності на 10% з 0,19 до 0,17 МВт.

1. Булатов Б.Г., Тарасенко В.В. Алгоритмы оптимальной реконфигурации распределительной сети // Электроэнергетика. – 2013. – № 2. – С. 14–18.
2. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.
3. Кацадзе Т.Л., Сулейманов В.Н., Баженов В.А. Применение аппарата генетических алгоритмов для принятия проектных решений по развитию электроэнергетических систем // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 58–65.
4. Momoh J. Smart grid: fundamentals of design and analysis. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012. – 218 p.
5. Raju, GK Viswanadha, and P.R. Bijwe. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics // Power Systems, IEEE Transactions on 23.3 (2008): 1280-1287.
6. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
7. Щерба А.А., Кирик В.В. Системы с нечеткой логикой регулирования электроэнергетических режимов. – К.: Лазурит–Поліграф, 2011. – 329 с.

УДК 621.311

ОПТИМАЛЬНАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Б.В. Цыганенко

Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сфере энергетики и коммунальных услуг,

ул. Смоленская, 19, Киев, Украина.

e-mail: tsyganenko@nerc.gov.ua

Исследованы проблемы, связанные с эксплуатацией распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кВ. Показана актуальность реализации технологий Smart Grid в децентрализованном управлении режимами распределительных сетей. Сформирована целевая функция оптимальности конфигурации радиальной электрической сети и представлена ее математическая модель, адаптированная к аппарату теории генетических алгоритмов. Библ. 7.

Ключевые слова: интеллектуальные распределительные сети, реконфигурация, оптимизация, генетический алгоритм.

THE OPTIMAL RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION POWER SYSTEM

В.Тsyganenko

National Commission for State Energy and Public Utilities Regulation,

Smolenska st. 19, Kyiv, Ukraine.

e-mail: tsyganenko@nerc.gov.ua

The problems associated with the operation of power distribution systems with voltage 6-35 kV are investigated. The urgency of the implementation of Smart Grid technology in the decentralized management of the distribution network modes. Formed objective function optimal configuration of the radial electric network. The mathematical model of optimal distribution network configuration function, adapted to the apparatus of the genetic algorithms theory are presented. References 7.

Keywords: intelligent distribution power system, reconfiguration, optimization, genetic algorithm.

1. Bulatov B.G., Tarasenko V.V. Algorithms for the Optimal Reconfiguration of the Distribution Network // Elektroenerhetika. – 2013. – No 2. – Pp. 14–18. (Rus)
2. Voronovsky G.K., Makhotilo K.V., Petrashev S.N., Sergeev S.A. Genetic Algorithms, Artificial Neural Networks, and Virtual Reality Problems. – Kharkiv: Osнова, 1997. – 112 p. (Rus)
3. Katsadze T.L., Suleymanov V.N., Bazhenov V.A. The Genetic Algorithms Application For Decision Making Project Of Electric Power Systems Development // Enerhetyka: Ekonomika, Tekhnolohii, Ekolohiia. – 2013. – No 2. – Pp. 58–65. (Rus)
4. Momoh J. Smart grid: fundamentals of design and analysis. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012. – 218 p.
5. Raju, GK Viswanadha, and Bijwe P.R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics // Power Systems, IEEE Transactions on 23.3 (2008): 1280-1287.
6. Rutkovska D., Pilinsky M., Rutrovsky L. Neural Networks, Genetic Algorithms And Fuzzy Systems. – Moskva: Goriachaia Liniia. – Telekom, 2006. – 452 p. (Rus)
7. Shcherba A.A., Kyryk V.V. Systems with fuzzy logic regulation mode of electricity. – Kyiv: Lazuryt–Polihraf, 2011. – 329 p. (Ukr)

Надійшла 29.01.2016
Остаточний варіант 06.06.2016