

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Солдатенко В. П.

Центральноукраїнський національний технічний університет (м. Кропивницький)

Запропонована система автоматичного керування комбінованою електроенергетичною системою з відновлюваними джерелами енергії, в основу якої покладено розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації.

Постановка проблеми. Зміни в законодавстві енергетичної сфери України, а саме введення поняття "зеленого тарифу" сприяли різкому зростанню зацікавленості до установок з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Найбільша ставка "зеленого тарифу" передбачена для енергії сонячних електричних станцій (СЕС) на основі фотоелектричних перетворювачів. Тому стрімко почала зростати частка сонячної електроенергетики в енергобалансі України.

Стрімкий розвиток відновлюваної енергетики оголив ряд технічних проблем. Електричні мережі для розподілу електричної енергії між споживачами проектувалися, як правило, із розрахунку потоку потужності в одному напрямку – від центрів живлення до периферійних споживачів. Такими режимами обумовлювався вибір рівнів напруги на шинах підстанцій, методи і засоби регулювання напруги в мережі, алгоритм і уставки дії релейного захисту та автоматики, визначалися техніко-економічні показники роботи розподільної мережі. При цьому забезпечувалися показники якості електричної енергії (ПЯЕ), зокрема відхилення напруги, економічність і надійність розподілу електричної енергії.

Підключення установок із ВДЕ до розподільних електричних мереж (РЕМ) 0,4 кВ і 10 кВ, у випадку співрозмірної потужності, призводить до зміни режиму роботи РЕМ. Потоки активної потужності від ВДЕ до РЕМ в режимі мінімального навантаження і високої продуктивності ВДЕ спричиняють підвищення рівня усталеного відхилення напруги на шинах приєднання ВДЕ до РЕМ.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є вдосконалення системи автоматичного керування (САК) режимами роботи ВДЕ, які б враховували їх вплив на рівні напруги в РЕМ, тому задача створення таких САК є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] приведені результати дослідження впливу генерації активної потужності, яка виробляється СЕС, на рівні відхилення напруги на шинах 0,4 кВ споживачів. Доведено, що в локальних електричних мережах можливі режими, за яких напруга на шинах 0,4 кВ споживачів може виходити за межі нормально допустимих значень. Відмічено, що в таких системах мають місце різкі зміни напруги на шинах підстанцій споживачів, а усталене значення відхилення напруги може перевищувати номінальне більше ніж на 10 %.

В роботі [2] зауважується, що у РЕМ, де активно встановлюються та експлуатуються установки з ВДЕ, має місце погіршення ПЯЕ електричної енергії – понаднормове відхилення напруги на шинах підстанцій

10/0,4 кВ, спотворення синусоїдальної форми кривої напруги.

В роботі [3] було показано, що для врахування впливу генерації потужності ВДЕ на рівні усталених відхилень напруги задачу керування режимами КЕС з ВДЕ найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації та встановлено, що найбільш доцільним методом розв'язку даної задачі є метод наближення до утопінчної точки в просторі критеріїв.

Мета статті. Метою даної роботи є визначення нового підходу до створення системи автоматичного керування комбінованою електроенергетичною системою з відновлюваними джерелами енергії, яка б враховувала вплив генерації електричної енергії установками з ВДЕ на рівні усталеного відхилення напруги в районній електричній мережі.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити дві задачі:

- формалізувати задачу автоматичного керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії;
- визначити найбільш доцільний спосіб вирішення даної задачі з урахуванням технічних особливостей реалізації даних систем автоматичного керування.

Основні матеріали дослідження. На рис. 1 зображена схема розподільної електричної мережі напругою 0,4 кВ. У вузлі 1 до РЕМ підключена енергосистема (ЕС), у вузлі 2 – споживачі електричної енергії (навантаження) та установки із ВДЕ. Споживачі електричної енергії споживають потужність $P_{сп}$, а установки з ВДЕ генерують потужність $P_{вде}$.

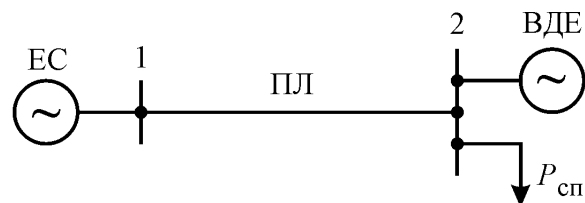


Рисунок 1 - Схема розподільної електричної мережі напругою 0,4 кВ

В залежності від поточного співвідношення між потужністю генерації ВДЕ та потужністю навантаження виділимо два режими роботи ПЛ.

1. Режим генерації електричної енергії в енергосистему. За умови перевищення потужності генерації ВДЕ над потужністю навантаження $P_{вде} > P_{сп}$ перетік потужності $P_{ген} = P_{вде} - P_{сп} > 0$ відбувається від вузла

2 до вузла 1. Умовою передачі цієї потужності буде підвищення рівня напруги у вузлі 2, що призводить до росту усталеного значення відхилення напруги. При значній потужності $P_{\text{ген}}$ відхилення напруги може вийти за допустимі межі.

2. Режим споживання електричної енергії від енергосистеми. За умови перевищення потужності навантаження над потужністю генерації ВДЕ $P_{\text{сп}} > P_{\text{вде}}$ від вузла 1 до вузла 2 відбувається перетік потужності – $P_{\text{ген}} = P_{\text{вде}} - P_{\text{сп}} < 0$. При такому режимі роботи вплив ВДЕ на усталене значення відхилення напруги мінімальний.

Для забезпечення допустимості рівня усталеного відхилення напруги необхідно здійснювати керування потужністю генерації установками з ВДЕ. Закон керування повинен враховувати вплив ВДЕ на рівні напруг в РЕМ. З метою врахування такого впливу задачу керування режимами генерації активної потужності ВДЕ найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Постановка такої задачі має наступний вигляд

$$\begin{cases} Q_1 = -P(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2 = 3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (1)$$

де $Q(P_{\text{ген}}) = (Q_1(P_{\text{ген}}), Q_2(P_{\text{ген}}))$ – вектор критеріїв керування;

$P_{\text{ген}}$ – потужність, яка генерується ВДЕ у енергосистемі;

$\Pi(P_{\text{ген}})$ – прибуток від генерації потужності ВДЕ у енергосистемі з урахуванням "зеленого тарифу";

$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$ – збитки, які виникають внаслідок перевищення усталеного значення відхилення напруги від номінального значення;

$[P_{\min} \dots P_{\max}]$ – область допустимих значень потужності $P_{\text{ген}}$.

Задача (1) найкращим чином вирішується методом наближення до утопічної (ідеальної) точки в просторі критеріїв.

Під утопічною точкою слід розуміти точку $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$, координатами якої є оптимальні (мінімальні) значення для кожного з критеріїв $Q_i(P_{\text{ген}})$. Критерії $Q_{1\min}$ та $Q_{2\min}$ знаходяться в протиріччі, тобто зменшенню значення критерію $Q_{1\min}$ відповідає збільшення значення критерію $Q_{2\min}$ і навпаки, то режим роботи в утопічній точці найбільш бажаний, але не досяжний. Мініального значення критерію $Q_{1\min}$ буде досягнуто у випадку максимальної генерації потужності ВДЕ в енергосистемі P_{\max} . При цьому прибуток від продажу електричної енергії за "зеленим тарифом" максимальний. Мініального значення критерію $Q_{2\min}$ буде досягнуто у випадку мінімальної генерації потужності ВДЕ в енергосистемі P_{\min} . При цьому відхилення напруги від номінального значення буде рівним нулю.

На рис. 2 зображена область значень критеріїв $Q_1(P_{\text{ген}})$ та $Q_2(P_{\text{ген}})$ в залежності від значень потужності генерації ВДЕ в діапазоні $P_{\min} \leq P_{\text{ген}} \leq P_{\max}$ ($Q_{1\text{ут}} = Q_1(P_{\min}), Q_{2\text{ут}} = Q_2(P_{\max})$)

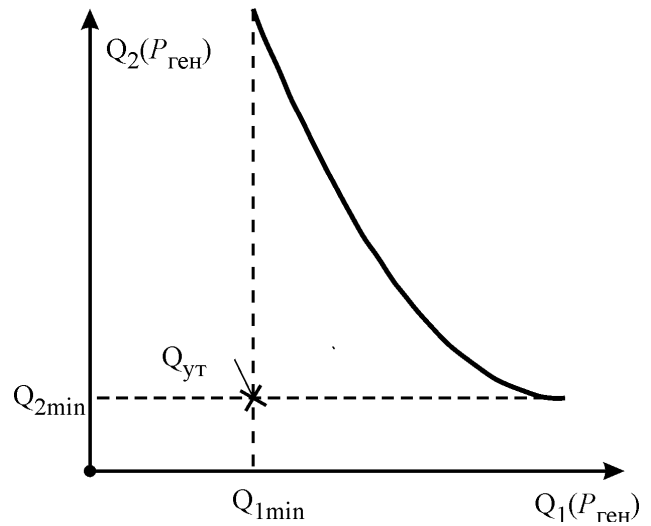


Рисунок 2 - Геометрична інтерпретація розв'язку

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом наближення до утопічної точки здійснюється за два кроки:

Крок 1. Шляхом визначення оптимального значення для кожного з критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$ в просторі критеріїв оптимізації $\{Q\} \subset R^m$.

Вище було показано, що координати утопічної точки відповідають максимальному та мініальному значенню потужності генерованої ВДЕ.

Крок 2. Шляхом розв'язку задачі скалярної оптимізації відстані ρ від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації $P_{\text{ген}}^*$ в просторі керування $[P_{\min} \dots P_{\max}] \subset R^k$.

$$\rho_{L^p} = \left(\sum_{i=1}^m |Q_i(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}i}|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2)$$

Поставлена задача (1) найкращим чином вирішується за умови мінімізації чебишевської відстані (2) від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків.

Для випадку $p \rightarrow \infty$ (чебишевська відстань) знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) (крок 2) набуває вигляду

$$\begin{cases} F(P_{\text{ген}}) = \max \left\{ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}1}}{\zeta_1}, \right. \\ \left. \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}2}}{\zeta_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (3)$$

де ζ_1 та ζ_2 – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

Розв'язок задачі (3) зводиться до вирішення задачі умовної скалярної оптимізації з обмеженнями двох видів – у вигляді рівності та нерівності

$$\begin{cases} Q_1(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{1\min}}{\zeta_1} - \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{2\min}}{\zeta_2} = 0; \\ P_{\min} \leq P_{\text{ген}} \leq P_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

Для розв'язку задачі типу (4) найдоцільніше застосовувати один із чисельних методів вирішення задачі умовної скалярної оптимізації.

При виборі чисельного методу необхідно врахувати, що технічна реалізація такої системи автоматичного керування передбачається у вигляді мікроконтролерного пристрою.

Тому чисельний метод, що буде обраний для розв'язку задачі (4) повинен використовувати просту процедуру розрахунку, оскільки така система автоматичного керування повинна працювати в режимі реального часу.

Найбільш поширеними методами вирішення задач скалярної оптимізації є: метод покоординатного спуску; метод градієнтного спуску; метод повного перебору; метод Хука-Джівса; метод Нелдера-Міда.

Метод Нелдера-Міда має ряд суттєвих переваг в порівнянні з іншими методами знаходження мінімуму функції, що зумовило його широке розповсюдження, а саме:

1. Відсутня необхідність розрахунку градієнту функції в процесі оптимізації. Тобто, метод Нелдера-Міда – безградієнтний. Це значно спрощує процес розрахунку та підвищує його швидкодню.

Ця обставина є найголовнішою при виборі методу оптимізації, зважаючи на мікроконтролерну реалізацію САК, в якій планується використання процедури знаходження мінімуму функції в процедурі знаходження розв'язку задачі (4).

2. Відносна простота (в порівнянні, наприклад, з методом Хука-Джівса) розрахункової процедури по знаходженню оптимуму, яка зводиться до використання простих арифметичних операцій та логічних операцій порівняння.

3. Висока надійність збіжності методу, яка підтверджена великою кількістю вирішених шляхом його використання прикладних задач.

Висновки. В результаті проведеного дослідження встановлено:

1. Для врахування впливу генерації потужності ВДЕ на рівні усталених відхилень напруги задачу керування режимами КЕС з ВДЕ найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

2. Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації найбільш доцільно проводити методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

3. Бажане співвідношення критеріїв в точці оптимуму однозначно визначається співвідношенням вагових коефіцієнтів ζ_1 та ζ_2 у випадку знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом мінімізації чебишевської відстані від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків.

4. Найбільш придатним для вирішення задачі скалярної оптимізації (4) є метод Нелдера-Міда, завдяки своїй високим швидкодії та надійності, а також відноській простоті.

Список використаних джерел

1. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.

2. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145.

3. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков // Вісник Харківського політехнічного інституту. Технічні науки. – 2017. – № 2. – у друку.

Анотація

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Солдатенко В. П.

Предложена система автоматического управления комбинированной электроэнергетической с возобновляемыми источниками энергии, в основу которой заложено решение задачи многокритериальной оптимизации.

Abstract

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF COMBINED ELECTRIC POWER SYSTEM OPERATION WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

V. Soldatenko

The system of automatic control of combined electric power with renewable energy sources is proposed, which is based on the solution of the multi-criteria optimization problem.