

УДК 621.316

П. Д. ЛЕЖНЮК (д-р техн. наук, проф.), О. Є. РУБАНЕНКО (канд. техн. наук, доц.),
О. О. РУБАНЕНКО (канд. техн. наук)

Винницький національний технічний університет

lenu_rubanenko@bk.ru

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС З ВРАХУВАННЯМ НОРМАТИВНОГО ЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РПН

Проаналізовано можливість врахування планового значення технічних втрат потужності при оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС. Запропоновано для визначення планового значення технічних втрат потужності (ПЗТВП) використовувати критеріальний метод і нейро-нечітке моделювання. Проаналізовано важливість визначення якості функціонування регулюючих пристроїв на прикладі трансформатора з РПН. Запропоновано при оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС ранжувати трансформатори з РПН по коефіцієнту якості функціонування, який залежить від технічного стану трансформатора і його впливу на втрати потужності.

Ключові слова: *планове значення технічних втрат потужності, коефіцієнт якості функціонування, критерій подібності, нейро-нечітке моделювання, коефіцієнт ресурсу, оптимальне керування.*

Вступ. Задача зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні є актуальною. Одним із способів зменшення втрат електроенергії, який добре зарекомендував себе в розподільних мережах, є їх нормування.

Для досягнення нормативного значення технічних втрат електроенергії потрібно відслідковувати поточне значення втрат активної потужності. Потрібно здійснювати оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС таким чином, щоб поточні втрати потужності не перевищили планового їх значення. Тому при оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС доцільно в якості критерію оптимальності використовувати втрати активної потужності і намагатись їх значення звести до планового. Це гарантує, що в кінці звітного періоду значення втрат електроенергії не перевищить норматив. Тому актуальною є задача вдосконалення існуючих та розробки нових методів оптимізації режимів ЕЕС, коли критерієм оптимальності є втрати електроенергії під час її транспортування з врахуванням планового значення технічних втрат потужності і технічного стану регулюючих пристроїв в умовах неповноти вихідних даних.

Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС здійснюється за допомогою трансформаторів з РПН. Особливістю сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС), яка ускладнює процес керування і значно зменшує ефективність керувальних впливів, є зростання частки обладнання, яке відпрацювало нормативний термін. Це зумовлює необхідність розробки методів та засобів, які забезпечують економічну, якісну та надійну роботу ЕЕС в цілому. Підвищення вимог до надійної і економічної експлуатації обладнання потрібно не лише внаслідок спаду темпів заміни такого обладнання, а і зумовлено зростанням потужності енергооб'єктів і посиленням конкуренції між енергокомпаніями, викликаною переходом до ринку електроенергії.

В електроенергетиці України більше 60 % енергоблоків теплових електростанцій, 40 % повітряних ліній, 70 % трансформаторних підстанцій вичерпали свій граничний технічний ресурс, не менше 60 % засобів релейного захисту і автоматики також відпрацювали нормативні терміни, системи телемеханіки і зв'язку, що в переважній більшості є аналоговим, морально та фізично застаріли [1]. На багатьох ПС (підстанціях) комутаційні апарати, системи релейного захисту, протиаварійної автоматики і оперативно-диспетчерського керування потребують заміни або капітального ремонту. Обладнання підстанції 220–750 кВ на 68 % відпрацювало свій паспортний ресурс [2]. Швидко зростає частка устаткування, яке відпрацювало нормативний термін служби. У багатьох промислово розвинених країнах світу, у тому числі і в Україні, до 2010 р. велика частка такого устаткування перевищила розрахунковий термін експлуатації, це стосується і трансформаторів з РПН [1].

Таким чином, метою даної роботи є вдосконалення методу оптимального керування нормальними режимами ЕЕС шляхом врахування планового значення технічних втрат потужності регулювальної здатності трансформаторів з РПН і їх технічного стану.

Матеріал і результати дослідження. При керуванні нормальними режимами ЕЕС потрібно забезпечити мінімальне значення комплексного критерію оптимальності:

$$F = f(\Delta P, \Delta P_{\text{норм}}, P(\delta), P(\omega), \sum_{i=1}^q Ш_{Ti}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де ΔP – поточні втрати активної потужності в ЕЕС; $P(\delta)$ – потужність, еквівалентна збитку споживачів, обумовленому низькою якістю напруги; $P(\omega)$ – потужність, еквівалентна збитку внаслідок недовідпуску

© Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Рубаненко О.О., 2013

електроенергії, викликаному відмовами трансформаторів, зокрема відмовами пристроїв РПН; $Ш_{Ti}$ – штрафна функція, яка вводиться для обліку ресурсу трансформаторів, зокрема перемикачів пристроїв РПН; q – кількість регульованих трансформаторів.

Для цього контролюють відхилення поточних втрат потужності від планового їх значення:

$$\psi(\Delta P) = \Delta P - \Delta P_{\text{план}}, \quad (2)$$

де $\Delta P_{\text{план}}$ – планове значення технічних втрат потужності (ПЗТВП).

ПЗТВП визначається за формулою:

$$\Delta P_{\text{план}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq 1}^n A_{ij} \cdot P_i P_j + \sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i, \quad (3)$$

де P_i , P_j – впливні фактори (потужність навантаження на шинах 110 кВ; потужність, яка передається по лінях міжсистемного зв'язку та ін.); A_{ij} і A_i – коефіцієнти при членах нормативної характеристики технічних втрат потужності. З метою знаходження мінімального значення цільової функції (1) в умовах неповноти початкових даних пропонуємо використовувати метод критеріального програмування і методи нейронечіткого моделювання. Одним із шляхів рішення задачі (1) є обґрунтована мінімізація НЗТВП (3). Під час пошуку рішення задачі мінімізації $\Delta P_{\text{план}} \rightarrow \min$, формується відповідно цій задачі – двоїста задача з обмеженням у вигляді ортонормованої системи рівнянь [3]. Якщо ортонормована система рівнянь обмежень $\alpha \cdot \pi = \mathbf{b}$ (де α – матриця показників; \mathbf{b} – вектор вільних членів ортонормованої системи рівнянь; π – вектор критеріїв подібності); містить рівнянь менше ніж змінних (критеріїв подібності), то така задача має високу міру складності і знайти її розв'язок звичайними методами складно. Тому запропоновано для розв'язку задачі високої міри складності критеріального програмування використовувати нейро-нечітке моделювання на етапі визначення незалежних (базисних) критеріїв подібності. Незалежні критерії подібності представляються за допомогою функцій належності відповідним множинам членів цільової функції планових втрат потужності [4, 5].

Розрахуємо нормативне значення технічних втрат електроенергії за розрахунковий період методом середніх навантажень. Метод середніх навантажень полягає в розрахунку втрат електроенергії за формулою:

$$\Delta W = k_L k_K \Delta P_{\text{ср}} T_j k_{\Phi}^2, \quad (4)$$

де $k_L=1,02$ – коефіцієнт, який враховує вплив втрат в арматурі повітряних ліній; $\Delta P_{\text{ср}}$ – втрати потужності в мережі при середніх за розрахунковий інтервал навантаженнях вузлів; k_{Φ}^2 – коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий інтервал; $k_K = 0,99$ – коефіцієнт, який враховує відмінність конфігурації графіків активного і реактивного навантаження різних віток мережі; T_j – тривалість j -го розрахункового інтервалу, годин.

Коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий період розраховується за виразом

$$k_{\Phi}^2 = \sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i / (P_{\text{ср}}^2 T), \quad (5)$$

де P_i – значення навантаження на i -му ступені графіка навантаження тривалістю Δt_i , годин; m – число ступенів графіка за розрахунковий період; $P_{\text{ср}}$ – середнє навантаження мережі за розрахунковий період

Очевидно, що оперативний персонал формуючи керуючі впливи враховує технічний стан електрообладнання. Вибір трансформатора, який краще використовувати для оптимального керування НР ЕЕС, здійснюється, враховуючи такі умови: перемикач бажано реалізувати найбільш надійним трансформатором, тому що пошкодження трансформатора під час перемикачів призводить до витрат на його ремонт, які можуть значно перевищити збитки від роботи енергосистеми в неоптимальному режимі в разі відмови від застосування ненадійного трансформатора; використання при керуванні параметрами НР найнадійнішого трансформатора для забезпечення їх оптимальних значень не завжди забезпечує оптимальний режим роботи, тому що трансформатор може бути нечутливий для підтримання режиму в даний момент; розрахункова кількість перемикачів для підтримання оптимального режиму (деякі трансформатори може перевести в категорію обладнання з аварійно низьким залишковим ресурсом, а для інших трансформаторів – лише незначним чином зменшує їх ресурс).

Тому пропонується як критерій вибору трансформатора, яким краще здійснювати перемикачів, і вибору кількості перемикачів використовувати коефіцієнт якості функціонування [6]. Коефіцієнт якості функціонування враховує надійнісні характеристики трансформатора (зокрема залишковий ресурс), навантаження трансформатора та чутливість зміни втрат потужності в ЕЕС до перемикачів РПН саме цього трансформатора. Перемикачів потрібно здійснювати таким трансформатором, у якого коефіцієнт якості функціонування найвищий [6]. Вибрати відповідний трансформатор складно, враховуючи те, що потрібно мінімізувати втрати і забезпечити надійність роботи РПН (зменшити кількість відмов в роботі РПН) [6]. За таких умов для знаходження розв'язку задачі визначення коефіцієнту якості функціонування можна

застосовувати програмний комплекс MATLAB, тому що він дозволяє розв'язувати оптимізаційні задачі при вихідних даних, які представлені у вигляді нечітких множин і враховувати експертну інформацію. Розглянемо задачу знаходження коефіцієнта якості функціонування трансформатора залежно від його впливу на втрати в енергосистемі та його залишкового ресурсу. Коефіцієнт якості функціонування трансформатора є комплексним параметром, який враховує не лише можливість трансформатора перетворювати електроенергію, а й можливість ефективно впливати на режим енергосистеми, і визначається за виразом:

$$k_{\text{як.функ.}} = (a_1 + a_2) \cdot k_{\text{рес}_n} \cdot k_{\text{рес}_t} \cdot k_{\text{рес}_V} \cdot k_{\text{рес}_W} \cdot k_{\text{рес}_I} \cdot a_3 \cdot k_{\text{втрат}} \quad (7)$$

коефіцієнт втрат за виразом:

$$k_{\text{втрат}} = \frac{\Delta P_{\text{неопт}} - \Delta P_{\text{опт}}}{\Delta P_{\text{опт}}}, \quad (8)$$

вагові коефіцієнти за виразами: $a_1 = \frac{B_1}{B_{\text{сум}}}$, $a_2 = \frac{B_2}{B_{\text{сум}}}$, $a_3 = \frac{B_3}{B_{\text{сум}}}$,

вартість понаднормованих технічних втрат потужності за виразом:

$$B_3 = (\Delta P_{\text{пот}} - \Delta P_{\text{норм}}) \tau C, \quad (9)$$

сумарну вартість за виразом:

$$B_{\text{сум}} = B_1 + B_2 + B_3, \quad (10)$$

де B_1 , B_2 – вартості: – втраченої електричної енергії в результаті роботи по ремонтній схемі, – ремонту РПН трансформатора в разі його пошкодження при оперативних перемиканнях; $n_{\text{зал.}}$ – залишкова кількість перемикань; $n_{\text{пасп.}}$ – кількість перемикань, яка вказана в паспорті трансформатора; n – кількість потрібних перемикань для досягнення оптимального режиму; $\Delta P_{\text{опт}}$ – оптимальне значення втрат активної потужності; $\Delta P_{\text{неопт}}$ – значення втрат активної потужності при відмові від перемикань даним трансформатором; $I_{\text{зал.}}$ – залишковий струм комутації; $I_{\text{ком}}$ – струм, який комутує трансформатор при одному перемиканні; $I_{\text{пасп.}}$ – струм, який повинен комутувати трансформатор по паспорту; $I_{\text{нак.}}$ – накопичений комутований струм; $\Delta P_{\text{норм}}$ – нормативне значення технічних втрат активної потужності; $\Delta P_{\text{пот}}$ – поточне значення втрат активної потужності; C – вартість електроенергії; τ – тривалість періоду між перемиканнямиде коефіцієнт ресурсу по параметру «кількість перемикань» за формулою:

$$k_{\text{рес}_n} = \frac{n_{\text{зал.}} - n}{n_{\text{пасп.}}}, \quad (11)$$

коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «температура масла в баку РПН» визначається за виразом:

$$k_t = \left| \frac{t_{\text{гран}} - t_{\text{ном}}}{t_{\text{гран}} - t_{\text{поч}}} \right|, \quad (12)$$

де: $t_{\text{гран}}$ – граничне нормативне значення температури масла в баку РПН, $t_{\text{ном}}$ – значення температури масла в баку РПН на момент контролю, $t_{\text{поч}}$ – початкове значення температури масла в баку РПН (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту);

коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «швидкість спрацювання» визначається за виразом:

$$k_V = \left| \frac{V_{\text{гран}} - V_{\text{ном}}}{V_{\text{гран}} - V_{\text{поч}}} \right|, \quad (13)$$

де: $V_{\text{гран}}$ – граничне нормативне значення швидкості спрацювання РПН, $V_{\text{ном}}$ – значення швидкості спрацювання РПН на момент контролю, $V_{\text{поч}}$ – початкове значення швидкості спрацювання РПН (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту);

коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «вміст вологи в трансформаторному маслі бака РПН» визначається за виразом:

$$k_W = \left| \frac{W_{\text{гран}} - W_{\text{ном}}}{W_{\text{гран}} - W_{\text{поч}}} \right|, \quad (14)$$

де: $W_{\text{гран}}$ – граничне нормативне значення вмісту вологи в трансформаторному маслі бака РПН, $W_{\text{ном}}$ – значення вмісту вологи в трансформаторному маслі бака РПН на момент контролю, $W_{\text{поч}}$ – початкове значення вмісту вологи в трансформаторному маслі бака РПН (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту);

коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «накопичений комутований струм» визначають за формулою:

$$k_{\text{ресI}} = \frac{I_{\text{зал.}} - n \cdot I_{\text{ком.}}}{I_{\text{пасп.}}}, \quad (15)$$

залишковий струм комутації за формулою: $I_{\text{зал.}} = I_{\text{пасп.}} - I_{\text{нак.}}$

Висновки: обґрунтована можливість використання критеріального методу і нейро-нечіткого моделювання для визначення планового значення технічних втрат потужності. В даній роботі запропоновано вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності оптимального керування параметрами нормального режиму ЕЕС критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання в умовах неповноти вихідних даних, що полягає у вдосконаленні математичних моделей та методів визначення ПЗТВП, для врахування їх значень при формуванні керуючих впливів. Вдосконалено метод визначення керуючих впливів трансформаторами з РПН з врахуванням коефіцієнта якості їх функціонування, використання якого дозволяє оцінити доцільність здійснення керуючих впливів і зменшити затрати, зумовлені пошкодженням трансформаторів з РПН.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи / Б. С. Стогній // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 6–9.
2. Авраменко В. М. Проблеми моделювання та керування режимами електроенергетичних систем / В. М. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 3. – С. 59–64.
3. Лежнюк П.Д. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод: навч. Посібник / П.Д. Лежнюк, С.В. Бевз. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 177 с.
4. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О. П. Ротштейн. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
5. Петрушенко О. Ю. Розв'язання двоїстої задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з застосуванням нейро-нечіткого моделювання/ О.Ю. Петрушенко, Ю.В. Петрушенко, О.О. Рубаненко // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С.26 – 27.
6. Спосіб оптимального керування нормальними режимами електроенергетичної системи: патент 61058 Україна, МПК8 НО2J3/24 / Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О.; власник патенту «Вінницький національний технічний університет»; заяв. 29.11.10; опубл. 11.07.11, Бюл. № 13.

REFERENCES

1. Stogniy B. S. Sustainable energy and intelligent energy systems / B. S. Stogniy // Proceedings of the institute of electrodynamics of NAN of Ukraine. collected works. Special issue . – 2010. – P. 6–9.
2. Avramenko V. M. Modeling problems and control of power systems modes / V. M. Avramenko, V. O. Krulov, V. L. Prihno // Technical elektrodinamika. – 2007. – № 3. – P. 59–64.
3. Lezhnyuk P.D., Bevs S. V. Optimization method in energy. Criterion method. – Vinnitsa: Universum, VNTU. – 1999. – 177 p. (Ukr.)
4. Rotshtein O.P. Intelktualni tehnologii identufikacii: nechitki mnozhyni, genetychni alorytmy, neyronni merezhy Vinnitsa: Universum, VNTU. – 1999. – 320 p. (Ukr.)
5. O.U. Petrushenko The dvoistoy problem solution of the optimal control by normal regimes of EPS with using neuro-fuzzy control/ O.U. Petrushenko, U.V. Petrushenko, O.O. Rubanenko // Technical elektrodinamika. – 2012. – №2. – P.26 – 27.
6. Pat. 61058 Ukraine, МПК8 НО2J3/24. The method of optimal control normal mode power system / Lezhnyuk P. D. , Rubanenko O.O.; applicant patentoutrymuvach Vinnytsia National Technical University - appl. 29.11.10, publ. 11.07.11. Bull. № 13, 2011.

Надійшла до редакції 26.02.2013

Рецензент: О.І. Толочко

П. Д. ЛЕЖНЮК, А. Е. РУБАНЕНКО, Е. А. РУБАНЕНКО
Вінницький національний технічний університет

Оптимальное управление нормальными режимами ЭЭС с учётом нормативного значения технических потерь электроэнергии и технического состояния трансформаторов с РПН. Проанализирована возможность учета планового значения технических потерь мощности при оптимальном управлении нормальными режимами ЭЭС. Предложено для определения планового значения технических потерь мощности (ПЗТПМ) использовать критеріальный метод и нейро-нечеткое моделирование. Проанализирована важность определения качества функционирования регулирующих устройств на примере трансформатора с РПН. Предложено при оптимальном управлении нормальными режимами ЭЭС ранжировать трансформаторы с РПН по коэффициенту качества функционирования, который зависит от технического состояния трансформатора и его влияния на потери мощности.

Ключевые слова: плановое значение технических потерь мощности, коэффициент качества функционирования, критерий подобия, нейро-нечеткое моделирование, коэффициент ресурса, оптимальное управление.

P. LEZHNYUK, O. RUBANENKO, O. RUBANENKO
Vinnitsa National Technical University

Optimal Control of the Normal Modes of EPS with the Normative Value of Technical Power Losses and the Technical State of Transformers with Load Tap Changer. The paper is devoted to the development of methods and techniques that are aimed at improving the optimal control of normal modes of electric power systems (EPS) with incomplete initial data. It is shown that the use of the planned value of technical power losses (PVTPL) for optimal control of the normal modes of EPS will reduce the loss of power and do not exceed the standard value of losses in the end of the reporting period. By constantly monitoring the value stream of active power losses and a pointer to their regular value enables more accurate shape control actions.

Key words: planned value of technical power losses, the quality coefficient is functioning, the similarity criterion, neuro-fuzzy modeling, coefficient of the resource, the optimal control.