

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 621.311.1

Б.В. Циганенко,
Національна комісія, що здійснює державне
регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг,
В.В. Кирик, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЗЕРВНИХ ПЕРЕМИЧОК РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Представлено метод багатоцільової оптимізації конфігурації розподільної мережі в післяаварійних режимах з використанням теорії нечітких множин. Синтезовано нечіткий логічний контролер для визначення рейтингів вимикачів резервних перемичок з врахуванням втрат напруги в найвіддаленішій ділянці, коефіцієнта потужності на головній ділянці з допустимості режиму по струму. Передатна характеристика синтезованого нечіткого логічного контролера дозволяє визначити за вхідними характеристиками параметрами мережі рейтинги комутаційних елементів резервних перемичок для різних конфігурацій схем мережі та сформувати дві резервні перемички з максимальними значеннями рейтингів, для яких уточнюються втрати потужності, і за мінімальним значенням втрат приймається рішення щодо використання даної перемички.

Ключові слова: розподільні мережі, реконфігурація, оптимізація, нечітка логіка

Вступ

Розподільні мережі організовано за радіальними схемами: від центру живлення до споживачів відходять протяжні фідери з відгалудженнями. Із цієї причини пошкодження на будь-якій ділянці такої мережі призводить до відключення споживачів по всій довжині лінії і, що часто спостерігається, – на тривалий термін. Для забезпечення безперебійності електропостачання в разі аварійного відключення фідера, живлення здійснюється через резервні перемички від сусідніх фідерів.

При проектуванні розподільних мереж в основі прийняття рішення щодо розміщення комутуючих елементів резервних перемичок у схемі мережі для забезпечення електропостачання в післяаварійних режимах, а також у процесі експлуатації, для покращення ефективності функціонування мереж, необхідно вирішувати складну задачу багатоцільової оптимізації. При тому, що реконфігурація схеми мережі виконується за умови обмежень на втрати потужності, рівень напруги, надійності і неоднорідності мережі з урахуванням нелінійності поточкорозподілу та допустимості режиму.

На сьогодні управління конфігурацією мережі стає важливою частиною менеджменту електричних мереж. Досить велика кількість наукових праць відображає різні підходи до вибору оптимальної конфігурації розподільної мережі, але в основній частині вони приймають за критерій оптимальності втрати потужності, а обмеженням виступають відхилення напруги або струми в вітках.

Одним з напрямків наукових досліджень щодо реконфігурації мережі, спрямований на зменшення втрат електричної енергії, є реалізація алгоритму перебору варіантів схем, за яким всі ввімкнені комутаційні апарати в схемі послідовно вимикаються з метою розмикання замкнених контурів для визначення радіальних відгалуджень [7]. Використовуються індексні методи визначення ступеня порушення певних обмежень в пунктах схеми та індексації відгалуджень за втратами електроенергії [8]. В методі, викладеному в роботі [6], пропонується перенесення навантаження між пунктами для зменшення втрат по відгалудженнях та симетрування навантаження. Мають місце і методи перенесення навантаження за умови обмежень потоків потужності і рівнів напруги в пунктах [5], а також розподіл мережі на збалансовані підсистеми [9]. В роботах [1, 2] для визначення місць секціонування розподільної електричної мережі запропоновано оцінку якості функціонування розподільної електричної мережі за критерієм, який отримано при поєднанні теорії марковських процесів та критеріального методу.

На практиці, оптимальні місця зв'язку між фідерами формують в точках поточкорозподілу вихідної замкнутої (радіально-кільцевої) мережі за результатами розрахунку поточкорозподілу в R-схемі. Для оцінки економічності режимів розподільних мереж персонал структурних підрозділів енергосистеми щорічно розробляє так звану «нормальну» схему експлуатації з чітко встановленими точками розмикання контурів та формуванням радіальної топології з умовами роботи засобів захисту та автоматики.

Мета та завдання

Виходячи зі світової концепції формування інтелектуальних систем Smart Grid, пріоритетом якої є підвищення надійності та ефективності функціонування електричних мереж, авторами запропоновано метод визначення оптимальної конфігурації розподільної мережі шляхом аналізу режиму вихідної розімкненої мережі на основі математичного апарату нечіткої логіки, який дозволяє проводити оптимізацію одночасно за декількома критеріями.

Мета роботи – розробка методу визначення оптимальної конфігурації розподільної мережі, а точніше – місць розташування резервних комутаційних переминок для забезпечення мінімальних втрат електроенергії при реконфігурації схеми у разі аварійних вимикань фідерів.

Особливість методу полягає не в комбінаторному перенесенні навантаження між фідерами, шляхом замикання комутуючих елементів, введених в схему переминок та розмикання комутуючих елементів в основних пунктах живлення фідерів, а в знаходженні конфігурації схеми шляхом визначення нечітким логічним контролером (НЛК) рейтингу комутуючих елементів можливих резервних переминок за трьома критеріями (падіння напруги на кінцевій ділянці, значення струму та коефіцієнта потужності на головній ділянці) з подальшим знаходженням оптимальної перемички за мінімальним втратами електроенергії для комутуючих елементів (вимикачів) з максимальним значенням рейтингу.

Матеріал і результати досліджень

Розглянемо два фідери $f1$ та $f2$, які відходять від шин підстанції живлення ПС (рис.1а). Почерговим вимиканням одного з фідерів формуємо структури дерев мережі в післяаварійному режимі. Зв'язуючими елементами між ділянками двох фідерів будуть вимикачі Q_i , які і визначають кількість варіантів $N = 2i$ конфігурації мережі, тобто i - при живленні по одному фідеру та i – по другому. Для кожного варіанту реконфігурованої мережі проводимо моделювання усталених режимів із визначенням таких параметрів:

потокорозподіл по ділянках

$$P_{n-1} = P_n + r_n \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2}, \tag{1}$$

$$Q_{n-1} = Q_n + x_n \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2}; \tag{2}$$

напруга в пункті f

$$U_f = \sqrt{U_0^2 - 2 \sum_{n=1}^f (P_{nn} r_{nn} - Q_{nn} x_{nn})}; \tag{3}$$

струм на головній ділянці

$$I_0 = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^f (P_{nn}^2 + Q_{nn}^2)}}{\sqrt{3} U_0}; \tag{4}$$

коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ на головній ділянці

$$\cos \varphi = \cos \left(\arctan \frac{\sum_{n=1}^f P_{nn}}{\sum_{n=1}^f Q_{nn}} \right); \tag{5}$$

сумарні втрати потужності по фідеру

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{n=1}^f (\Delta P_n + J \Delta Q_n). \tag{6}$$

Указані перші п'ять параметрів (1), (2), (3), (4), (5), які розраховані для i конфігурацій схем по кожному фідеру живлення, визначають вхідні лінгвістичні змінні нечіткого логічного контролера. Вихідною лінгвістичною змінною контролера є рейтинг «rating» R_{i1} та R_{i2} активного елемента (вимикача Q_i), тобто НЛК формує множину рейтингів $\{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{i1}\}$ вимикачів Q_i в схемі живлення від першого $f1$ фідера та множину рейтингів $\{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{i2}\}$ тих же вимикачів в схемі живлення від другого $f2$ фідера. В подальшому визначається максимальний рейтинг на одній та другій множині

$$R_{k1} = \max\{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{i1}\}, \quad R_{l2} = \max\{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{i2}\},$$

де k – номер вимикача з максимальним рейтингом, при $1 \leq k \leq i$, для одного фідера і l – номер вимикача з максимальним рейтингом, для другого фідера при $1 \leq l \leq i$.

У випадку, коли вимикач має максимальні рейтинги при живленні від фідерів $f1$ та $f2$, тобто $k = l$, номер вимикача для резервної перемички визначається однозначно.

В інших випадках, коли вимикач може мати максимальний рейтинг при живленні схеми від одного фідера, і нижчий максимального при живленні від другого, номер вимикача для резервної перемички визначається шляхом визначення мінімального значення сумарних втрат потужності для конфігурацій схем з перемичками, що реалізовані вимикачами Q_k та Q_l , які мають в одному з варіантів схеми максимальний рейтинг

$$\min[(\Delta S_{\Sigma}^{kf1} + \Delta S_{\Sigma}^{kf2}), (\Delta S_{\Sigma}^{lf1} + \Delta S_{\Sigma}^{lf2})] \Rightarrow (Q_k | Q_l), \quad (7)$$

де $\Delta S_{\Sigma}^{kf1}, \Delta S_{\Sigma}^{kf2}$ – сумарні втрати потужності для конфігурації схем з перемичкою, яка реалізована вимикачем Q_k , відповідно, при живленні від фідерів $f1$ та $f2$; $\Delta S_{\Sigma}^{lf1}, \Delta S_{\Sigma}^{lf2}$ – сумарні втрати потужності для конфігурації схем з перемичкою, яка реалізована вимикачем Q_l , відповідно, при живленні від фідерів $f1$ та $f2$.

Для реалізації представленого методу визначення місця резервної перемички між фідерами за рейтингом вимикача синтезовано нечіткий логічний контролер (НЛК), який виконує аналіз режимних параметрів конфігурацій схем мережі на основі математичного апарату нечітких множин. Прийняття логічного рішення щодо встановлення рейтингу вимикача виконується за алгоритмом Мамдані [3, 4] з вихідною лінгвістичною змінною рейтингу «rating» (R), яка включає п'ять нечітких змінних {низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} або в вигляді терм множини $R=\{l, lm, m, hm, h\}$. Нечіткі змінні l та h представлені Z та S сплайн-функціями належності, а всі інші - трикутними. Графічне представлення розміщення терм множини лінгвістичної змінної «rating» на прийнятному діапазоні рейтингу в межах від 1 до 5 показано на рис.2.

Вхідна лінгвістична змінна «відхилення напруги», яка позначена термом dU включає п'ять нечітких змінних {негативне дуже високе, негативне високе, нормальне, позитивне високе, позитивне дуже високе} або в вигляді терм множини $dU=\{nvh, nh, n, ph, pvh\}$. Нечіткі змінні nvh та pvh представлені Z та S сплайн-функціями належності, а всі інші - трикутними. Графічне представлення розміщення терм множини лінгвістичної змінної « dU » з гранично допустимим відхиленням напруги $\pm 10\%$ на прийнятному діапазоні $[-1,1]$ в відносних одиницях показано на рис.3а.

Вхідна лінгвістична змінна «струм», яка позначена термом $Curr$, включає дві нечітких змінних {допустимий, недопустимий} або в вигляді терм множини $Curr=\{p, np\}$, представлені Z та S функціями належності. Графічне представлення розміщення терм множини лінгвістичної змінної «Струм» на прийнятному діапазоні $[0,1]$ в відносних одиницях показано на рис.3б.

Вхідна лінгвістична змінна «коефіцієнт потужності», яка позначена термом cos включає три нечітких змінних {низький, середній, високий} або в вигляді терм множини $cos=\{l, m, h\}$. Нечіткі змінні nvh та pvh представлені Z та S сплайн-функціями належності, а m – трикутною. Графічне представлення розміщення терм множини лінгвістичної змінної « cos » на прийнятному діапазоні $[0,1]$ в відносних одиницях показано на рис.3в.

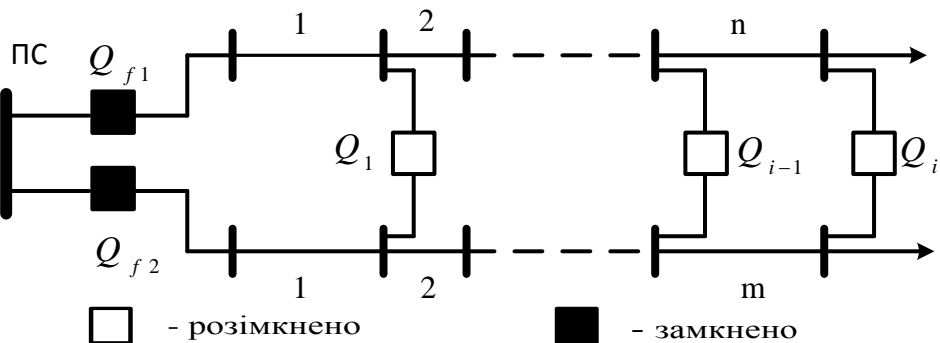


Рисунок 1 – Схема мережі з двома фідерами живлення в нормальному режимі

База знань включає 16 правил, 15 з яких представлено в таблиці, і додатково введено правило реагування контролера на недопустимі значення струму: Якщо $Curr \in np$, тоді $rating \in l$. Всі правила мають ваговий коефіцієнт на рівні одиниці.

Приклад процедури визначення рейтингу вимикача перемички від режимних параметрів відхилення напруги в найвіддаленому пункті мережі в післяаварійному режимі, струм та коефіцієнт потужності на головній ділянці нечітким логічним контролером представлено на рис.4.

Передатна характеристика синтезованого нечіткого логічного контролера дозволяє визначити по вхідних розрахункових параметрах мережі рейтинги комутаційних елементів резервних перемичок для різних конфігурацій схем мережі та сформувані дві резервні перемички з максимальними значеннями рейтингів, для яких уточнюються втрати потужності, і за мінімальним значенням втрат приймається рішення щодо використання даної перемички.

Розроблений метод реконфігурації схеми розподільної мережі в післяаварійному режимі на основі синтезу нечіткого логічного контролера дає можливість на етапі проектування розподільної мережі визначити місце резервної перемички між двома фідерами на основі нечіткого логічного висновку щодо рейтингу комутуючих елементів в резервних перемичках та сформувати конфігурацію розподільної мережі з оптимальним поточкорозподілом при мінімальному значенні втрат електроенергії з урахуванням характеру навантаження в мережі за допустимості режиму.

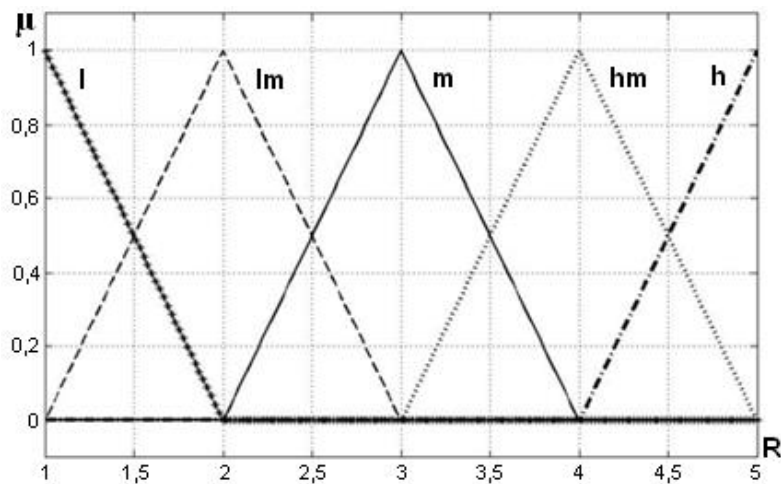


Рисунок 2 – Терм-множина лінгвістичної змінної R «rating»

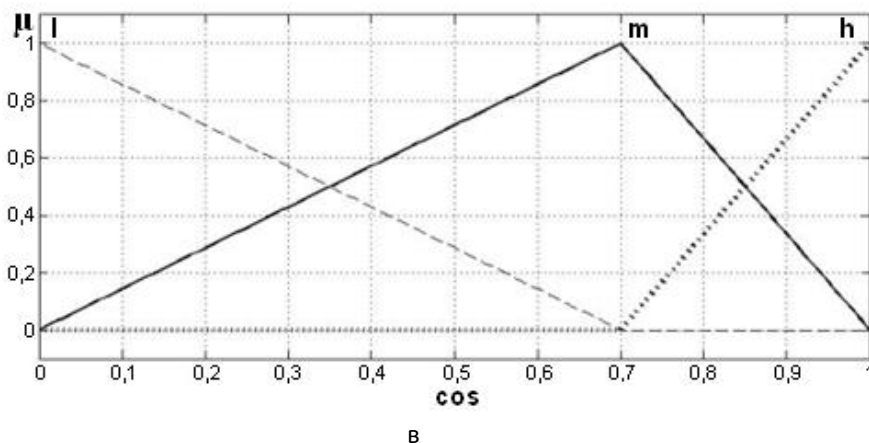
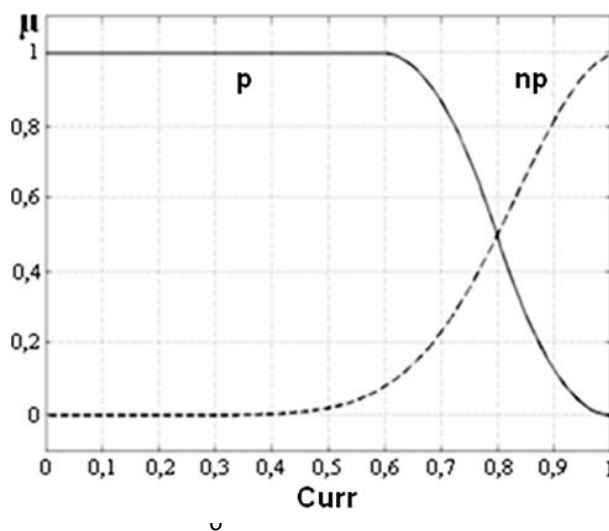
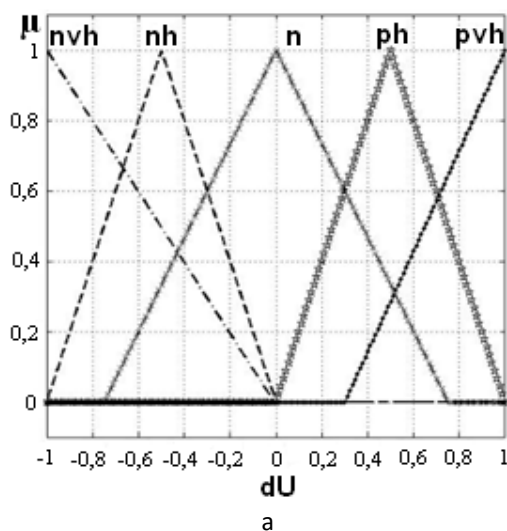


Рисунок 3 – Терм-множина лінгвістичних змінних: а – відхилення напруги; б – струм; в – коефіцієнт потужності

Таблиця 1 – Правила роботи нечіткого логічного контролера

dU	curr{p}		
	cos		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>h</i>
<i>nvh</i>	<i>l</i>	<i>lm</i>	<i>m</i>
<i>nh</i>	<i>lm</i>	<i>m</i>	<i>hm</i>
<i>n</i>	<i>m</i>	<i>hm</i>	<i>h</i>
<i>ph</i>	<i>lm</i>	<i>m</i>	<i>hm</i>
<i>pvh</i>	<i>l</i>	<i>lm</i>	<i>m</i>

Метод визначення місць розміщення резервних комутаційних перемичок для забезпечення мінімальних втрат електроенергії при реконфігурації схеми у разі аварійних вимикань фідерів використано для реконфігурації розподільної електричної мережі СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго» в проектній схемі переведення існуючої мережі 6 кВ на клас напруги 20 кВ.

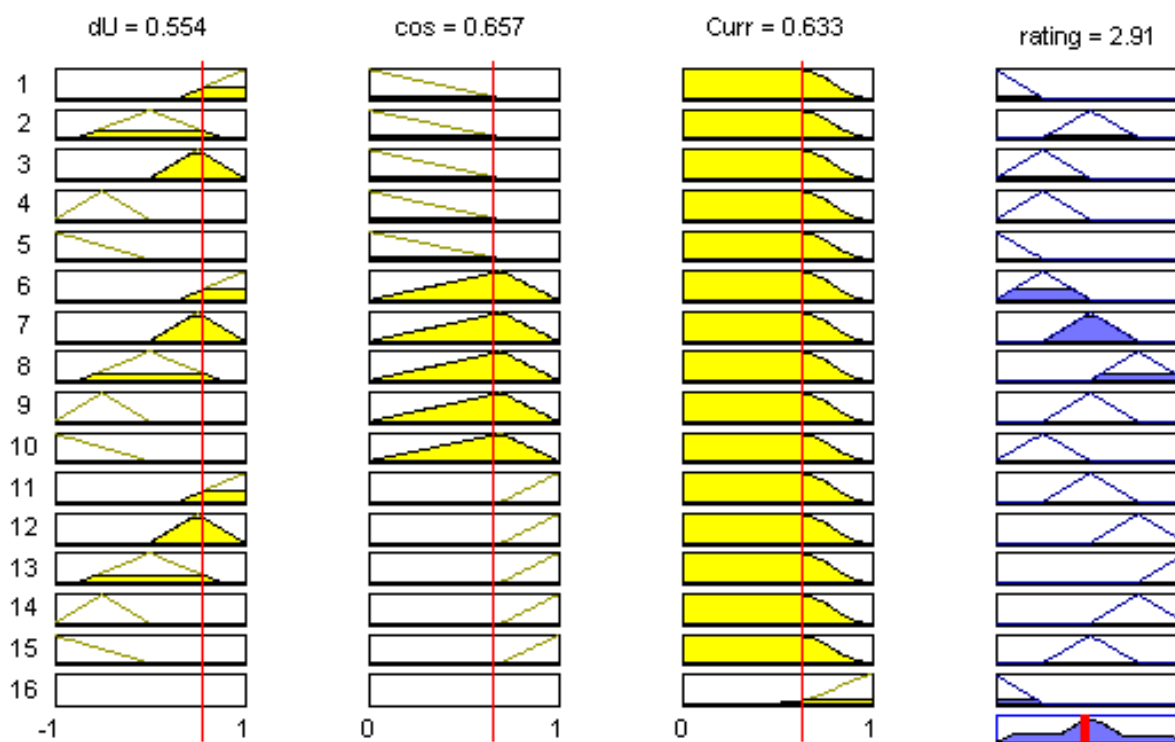


Рисунок 4 – Процедура прийняття рішення щодо рейтингу вимикача нечіткими логічним контролером

Висновки

Використання представленого методу дає можливість на етапі проектування розподільної мережі визначити місце вимикача резервної перемички між двома фідерами на основі нечіткого логічного висновку щодо рейтингу вимикачів з наступним визначенням мінімальних втрат потужності в післяаварійному режимі для вимикачів резервних перемичок мережі, що дозволяє сформувати конфігурацію радіальної розподільної мережі в післяаварійному режимі з оптимальним поточкорозподілом при мінімальному значенні втрат електроенергії з врахуванням характеру навантаження в мережі за допустимості режиму.

Апробація методу підтвердила ефективність його використання при визначенні місць розташування резервних перемичок у розподільних мережах.

Список використаної літератури

1. Комар В.О, Петрушенко Ю.В. Комплексна оцінка місць секціонування розподільної електричної мережі / Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Том.1-2016.-№6.- С.67-70

2. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2005. – № 4. С. 58-62.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде МАТЛАБ и fuzzyTECH.–СПб.: БХВ-Петербург, 2003.–736 с.–ISBN 5-94157-087-2
4. Щерба А. А. Системи з нечіткою логікою регулювання електроенергетичних режимів / А. А. Щерба, В. В. Кирик. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – 329 с. – ISBN 978-966-02-5988-1
5. Aoki K., Kuwabara H., Satoh T., and Kanezashi M. "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE PES Summer Meeting, 1987, paper no: 87SM 543-2
6. Civanlar S., Grain&r J. J., Lee S. H., "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1987, paper no: 87WM 140-7.
7. Merlin A.and Back H. "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in Urban Power Distribution Systems", Proc. of5 th Power Systems Comp. Con., Cambridge, U.K., Sept. 1-5,1975
8. Ross D. W., Carson M., Cohen A., et al., "Development of Advanced Methods for Planning Electric Energy Distribution Systems", DEO final report no SCI-5263, Feb 1980
9. Solanki J.M., Solanki S.Kh., Schulz N. Multi-agent-based reconfiguration for restoration of distribution systems with distributed generators // Journal Integrated Computer-Aided Engineering – Multi-Agent Systems for Energy. – 2010. – Vol. 17, iss. 4. – P. 331–346. – doi: 10.3233/ICA-2010-0351.

B.V. Tsyhanenko,

National commission that carries out government control in the spheres of energy and building services

V.V. Kyryk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

METHOD OF LOCATION OF ESTABLISHMENT OF RESERVE BRIDGES OF DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORK

The method of multi-purpose optimisation of a configuration of a distributive power network in post fault modes with use of the theory of fuzzy sets is presented. The fuzzy logic controller for definition of ratings of switches of reserve crosspieces taking into account pressure losses in the most remote site, power factor on the main site is synthesised at a mode admissibility on a current. The transfer characteristic of the synthesised fuzzy logic controller allows to define on entrance design variables of a network ratings of switching elements of reserve connectors for different configurations of system diagrammes and to generate two reserve connectors with the maximum meanings of ratings for which power losses are specified and on the minimum meaning of losses the solution of use of the given connector is made.

Keywords: distributive networks, reconfiguration, optimization, fuzzy logic

References

1. Komar V.O., Petrusenko U.V. Kompleksna ocinka misc sekcionuvannia rospodilnoi electrychnoi mereji // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypysk.–Vol.1.–2016.–№6.–pp.67-70. (Ukr)
2. Lezhniuk P.D., Kulik V.V., Burykin O.B. Funkcionalna salejnist skladovykh vtrat potujnosti u vitkakh electrychnoi mereji vid potujnosti u vuslakh // Visnyk Vinnyckogo politekhnichnogo instytutu.–2005.–№4.–pp.58-62 (Ukr)
3. Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in the environment of MATLAB and fuzzyTECH.– SPb.: BKhV-Peterburh, 2003.–736 p.–ISBN 5-94157-087-2 (Rus)
4. Scherba A. A. Systems with fuzzy logic regulation mode of electricity / A. A. Scherba, V. V. Kyryk. – Kyiv. 2011. – 329 p. – ISBN 978-966-02-5988-1 (Ukr)
5. Aoki K., Kuwabara H., Satoh T., and Kanezashi M. "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE PES Summer Meeting, 1987, paper no: 87SM 543-2
6. Civanlar S., Grain&r J. J., Lee S. H., "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1987, paper no: 87WM 140-7.
7. Merlin A.and Back H. "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in Urban Power Distribution Systems", Proc. of5 th Power Systems Comp. Con., Cambridge, U.K., Sept. 1-5,1975
8. Ross D. W., Carson M., Cohen A., et al., "Development of Advanced Methods for Planning Electric Energy Distribution Systems", DEO final report no SCI-5263, Feb 1980
9. Solanki J.M., Solanki S.Kh., Schulz N. Multi-agent-based reconfiguration for restoration of distribution systems with distributed generators // Journal Integrated Computer-Aided Engineering – Multi-Agent Systems for Energy. – 2010. – Vol. 17, iss. 4. – P. 331–346. – doi: 10.3233/ICA-2010-0351.

УДК 621.311.1

Б.В. Цыганенко,
Национальная комиссия, осуществляющая государственное
регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг,

В.В. Кирик,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА УСТАНОВКИ РЕЗЕРВНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Представлен метод многоцелевой оптимизации конфигурации распределительной сети в послеаварийных режимах, с использованием теории нечетких множеств. Синтезирован нечеткий логический контроллер для определения рейтингов выключателей резервных перемычек с учетом потерь напряжения в наиболее удаленном участке, коэффициента мощности на главном участке при допустимости режима по току. Передаточная характеристика синтезированного нечеткого логического контроллера позволяет определить по входным расчетным параметрам сети рейтинги коммутационных элементов резервных перемычек для разных конфигураций схем сети и сформировать две резервные перемычки с максимальными значениями рейтингов, для которых уточняются потери мощности, и по минимальному значению потерь принимается решение использования данной перемычки.

Ключевые слова: распределительные сети, реконфигурация, оптимизация, нечеткая логика

Надійшла 08.09.2016

Received 08.09.2016

УДК 621.314

С.В. Казанський, канд. техн. наук, доц., В.І. Моссаковський, інженер, А.В. Яковенко, магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДИНАМІЧНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СИЛОВИХ ОЛИВНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянуто особливості дослідження внутрішнього теплового стану силових оливних трансформаторів. Наведено послідовність динамічного 3D-моделювання теплових режимів за різних умов експлуатації силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Мета дослідження: визначення найвищого значення температури ізоляції обмоток для підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж і систем за рахунок інтенсифікації навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів.

Методика реалізації: запровадження новітніх алгоритмів і програм динамічного 3D-моделювання термодинамічних процесів нагрівання оливи та ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів для автоматизованого контролю внутрішнього теплового стану.

Результати дослідження: визначено доцільність застосування програмного пакету SolidWorks для проведення динамічного 3D-моделювання теплових режимів силових оливних трансформаторів; проаналізовано отримані результати щодо уточнення навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів.

Висновки: показано, що впровадження сучасних програмних пакетів динамічного 3D-моделювання дозволяє побудувати ефективну систему автоматизованого контролю внутрішніх теплових режимів силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Ключові слова: силовий трансформатор, динамічне моделювання, тепловий режим, навантажувальна здатність.