

ОПТИМАЛЬНЕ СЕКЦІОНУВАННЯ СХЕМ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

О.В. Гай¹, канд. техн. наук, **Ю.І. Тугай²**, канд. техн. наук

¹ – Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ-041, 03041, Україна;

² – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто проектну задачу вибору місць оптимального секціонування схеми розподільної електричної мережі. Запропоновано метод і алгоритм оптимізації, що базуються на апараті теорії нечітких множин. Наведено приклад застосування цього алгоритму. Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, оптимізація, проектування, нечіткі множини.

Принципи побудови сучасних і перспективних систем електропостачання, методи і засоби керування їх режимами мають відповідати рівню і темпу загального прогресу техніки і технологій [3]. Як відомо, головними критеріями ефективності при цьому є витрати на транспортування електроенергії, відхилення показників якості електроенергії від нормованих величин, рівень надійності електропостачання. У загальному випадку ці критерії є суперечливими, тому задача оптимізації режимів розподільних електричних мереж є багатокритеріальною. Одним із методів вирішення задач даного типу є перехід до умовної однокритеріальної оптимізації, коли обирають один з критеріїв за головний, а інші записують у вигляді обмежень.

Розподільні мережі працюють за розмікнутими схемами, тому найбільш доцільним засобом впливу на характеристики їх режиму є вибір оптимальної конфігурації шляхом зміни місць секціонування. При експлуатаційній постановці задачі оптимізації за головний критерій доцільно обрати витрати електроенергії на транспорт, оскільки можливі варіації схемних рішень обмежені, а значення інших критеріїв ефективності є відносно стійкими [4]. Але при проектуванні розподільної мережі схема може змінюватись у широкому діапазоні, і вирішальне значення для подальшого процесу експлуатації має отримання максимально можливого рівня надійності постачання споживачів електроенергією.

Слід також відзначити, що розподільна електрична мережа є динамічною системою, яка весь час змінюється як у просторі (поява нових споживачів), так і у часі (добові та сезонні графіки навантажень). На жаль, інформація про ці зміни принципово не може бути повною та абсолютно достовірною. Причому, як відомо з теорії детермінованого хаосу, зі збільшенням інтервалу прогнозування невизначеність інформації зростає як степенева функція. Тому адекватна математична модель для вирішення оптимізаційних задач у розподільних електричних мережах повинна мати у своїй основі методи теорії нечітких множин (НМ) [5, 8]. Апарат теорії НМ призначений для дослідження складних систем, де математичний аналіз в умовах невизначеності не може дати коректного результату. Нечіткі множини дозволяють моделювати нечіткі поняття, якими оперує інтелект (природний чи штучний) при формуванні своїх уявлень, цілей, бажань і обмежень стосовно реальної системи.

Особливість НМ полягає у тому, що існує можливість поступового переходу від повної приналежності до повної неприналежності елемента нечіткій множині. Для характеристики ступеня приналежності вводять поняття функції приналежності (ФП), призначеної для формалізації суб'єктивних уявлень. Так, для класу явища, що вивчається, представленого множиною A , ФП μ показує ступінь приналежності елемента x множині A і може набувати значення від 0 до 1. Якщо елемент x не належить множині A , то його ФП рівна 0; якщо однозначно належить, то функція приналежності дорівнює 1. Решта значень показує, що x на-

лежить множині A в якійсь мірі – $\mu_A(x) = (0,1)$. У цьому полягає відмінність нечітких множин від традиційних, елементи яких можуть або належати, або не належати множині. Якщо всі дані елементи не належать множині A , то це порожня множина – $\mu_0(x) = 0 \quad \forall x \in A$.

Особливе місце у використанні апарата НМ для моделювання реальних систем і процесів займає поняття нечіткого відношення [5, 8]. Нечітке відношення визначається як будь-яка нечітка підмножина довільних наборів елементів, побудованих з елементів тих або інших базисних множин. Нечітким відношенням, заданим на множинах X_1, X_2, \dots, X_k , називається деяка фіксована нечітка підмножина декартового добутку цих множин. Хай Q – довільне нечітке відношення, тоді $Q = \{ \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle, \mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle) \}$, де $\mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle)$ – функція приналежності даного нечіткого відношення.

Всі математичні операції, властиві НМ, справедливі й для нечітких відношень. Проте існують операції, властиві тільки нечітким відношенням, найважливішою з яких є композиційне правило. Воно полягає у тому, що нечітке бінарне відношення, задане на декартовому добутку $X_1 \times X_3$, яке позначається як $Q \circ R$, називається композицією бінарних нечітких відношень Q і R , а його функція приналежності визначається наступним виразом:

$$\mu_{Q \circ R}(\langle x_i, x_k \rangle) = \max_{x_j \in X_2} \{ \min \{ \mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle), \mu_R(\langle x_j, x_k \rangle) \} \}, (\forall \langle x_i, x_k \rangle \in X_1 \times X_3).$$

Основні труднощі постановки і рішення багатокритеріальних оптимізаційних задач в умовах невизначеності пов'язані з нечіткістю як вихідних даних, так і цілей оптимізації та обмежень. У даній роботі розглядаються метод та алгоритм оптимізації при вирішенні проектної задачі, оскільки для експлуатаційної вони є досить відомими [8]. Вхідна інформація містить опис параметрів головних елементів розподільної електричної мережі.

До параметрів вимикачів відносять: наявність резерву в мережі; вибір методики розрахунку ефективності секціонування (за питомими параметрами чи за керівними матеріалами [6]); ціну пункту секціонування і параметри, які визначають питому річну тривалість відключення розподільної мережі.

Головною характеристикою лінії електропередачі (ЛЕП) є її довжина. Крім того, ЛЕП відноситься до магістралі, якщо вона сполучає головний вимикач з пунктом автоматичного вводу резерву (АВР) або, у разі відсутності АВР у схемі мережі, якщо знаходиться по шляху від головного вимикача до найвіддаленішої точки мережі. В іншому разі дана ЛЕП є відгалуженням.

Спосіб завдання параметрів навантажень визначається методом, який використовується для розрахунку ефективності установки секціонуючих комутаційних апаратів (КА). А саме при виборі способу розрахунку за питомими показниками необхідно задати повну потужність; коефіцієнт потужності; коефіцієнт завантаження (використання максимуму); питомий збиток від перерв електропостачання. При виборі способу розрахунку за керівними матеріалами [6] необхідно задати номер навантаження, повну потужність і характер навантаження, підключеного до даного відгалуження.

Основною причиною невизначеності вихідних даних є наближене завдання параметрів навантаження, а саме потужності i -го споживача ($P_{\Sigma i}$), що відключається, яка істотно змінюється протягом дня, та значної залежності питомого збитку (y_p) від перерв електропостачання для різних типів навантаження. Згідно з дослідженнями [5] було одержано графіки навантажень споживачів залежно від сезону і часу доби. З іншого боку, згідно з дослідженнями [7], відомий розподіл аварійних відключень залежно від сезону і розподіл протягом доби, характерний для цього сезону.

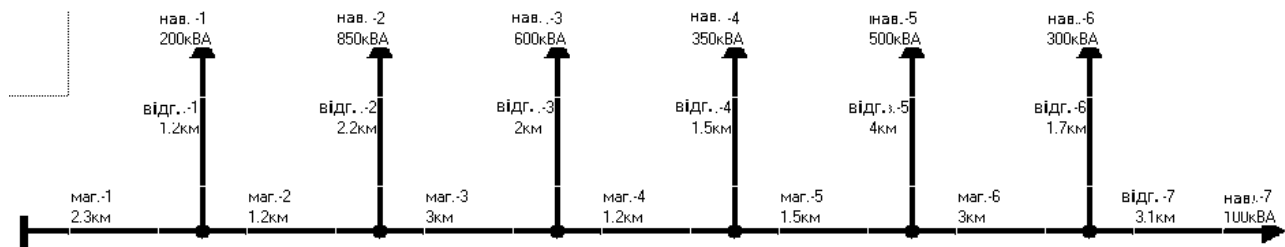
Відповідно вираз для визначення ефекту від секціонування розподільної мережі, що лежить в основі оптимізації при детермінованому підході, в умовах невизначеності початкової інформації набуде такого вигляду:

$$Eff(t) = \alpha_t \cdot L \cdot \sum_{i=1}^{nagr} P_{t,i} \cdot y_{p,i} - \alpha_t \cdot L \cdot \sum_{i=1}^{nagr} P_{y_{t,i}} \quad (1)$$

де $Eff(t)$ – величина ефекту від секціонування залежно від періоду часу, коли відбувається простій, грн/рік; α_t – питома річна тривалість відключення розподільних ліній залежно від періоду часу, коли відбувається простій, час/(рік·км); $P_{t,i}$ – приєднана потужність i -го споживача, змінна в часі, кВт; $y_{p,i}$ – питомий збиток від перерв електропостачання i -го споживача, грн/(кВт·год); $nagr$ – кількість споживачів, підключених до розподільної мережі; $P_{y_{t,i}}$ – величина, що визначає добуток приєднаної потужності на питомий збиток від перерв електропостачання i -го споживача залежно від схеми секціонування.

Перш ніж проводити пошук оптимального рішення задачі, необхідно сформулювати функцію приналежності вірогідності аварійної ситуації залежно від часу доби і періоду року. Методи побудови функції приналежності ФП μ НМ за експертними оцінками діляться на прямі і непрямі.

Розглянемо схему розподільної електричної мережі з довжинами ліній і навантаженнями вузлів.



Для отримання функції приналежності нечіткій множині, елементами якої є чисельні значення кількостей відключень у розподільній мережі, залежно від часу доби, було проведено аналіз інформації, обробленої статистичними методами [7] і використано метод експертних оцінок, що дозволило одержати залежність кількостей відключень від часу доби. Функція приналежності показує ступінь приналежності аварійної ситуації до визначених часових інтервалів у випадку, якщо аварія відбулась. Слід зазначити, що максимальне значення функції приналежності показує, в якому з часових інтервалів спостерігалася найбільша кількість відключень, на думку експертів і за результатами обробки статистичної інформації. Нормалізацію функції приналежності здійснено за рівнянням

$$\mu_t = \frac{\sum W_i}{\sum W_{\max}} \quad (2)$$

Відомо, що при функціонуванні розподільних мереж у сільській місцевості протягом доби і пори року, значення споживаної потужності змінюється, межі зміни визначаються характером споживачів даного відгалуження. Згідно з інформацією у нормативних документах [6], одержано розподіл величини приєднаної потужності для споживачів різного характеру залежно від часу доби і пори року. Знаючи розподіл приєднаної потужності від часу, проведемо моделювання і одержимо варіант установки секціонуючих КА, що є найбільш сприятливим, та відповідні йому значення ефектів від установки КА для схеми, зображеної на рисунку.

Проведено нормування частинних критеріїв і одержано функції приналежності нечіткій множині, елементами якої є чисельні значення критерія секціонування [1, 2]. Нормування здійснено за виразом (2), і відповідні значення функції приналежності наведено в табл. 1.

Таблиця 1

t , год	μ_t	Послідовна 3	Послідовна 35	Послідовна 235	Паралельна 257	Змішана 32	Змішана 1352	Змішана 1232	Змішана 2323
1-4	0,65	0,4937	0,5517	0,6078	0,0000	0,5826	0,6406	0,6353	0,4937
5-8	0,57	0,5075	0,5656	0,6259	0,0000	0,6010	0,6591	0,6579	0,5075
9-12	0,77	0,5619	0,6295	0,7020	0,4322	0,6647	0,7323	0,7312	0,5619
13-16	1	0,6189	0,6962	0,7816	0,4871	0,7356	0,8128	0,8145	0,6189
17-20	0,89	0,7447	0,8559	0,9653	0,6031	0,8888	1,0000	0,9918	0,7447
21-24	0,48	0,6498	0,8518	0,9604	0,5945	0,7979	1,0000	0,9193	0,6498

З метою знаходження оптимального варіанту секціонування розподільних мереж необхідно скласти композицію бінарних нечітких відносин:

$$\mu_{VER \circ EFF}(\langle x_i, x_k \rangle) = \max_{x_j \in X_2} \{ \min\{ \mu_{VER}(\langle x_i, x_j \rangle), \mu_{EFF}(\langle x_j, x_k \rangle) \} \};$$

$$(\forall \langle x_i, x_k \rangle \in X_1 \times X_3, x_i \in X_1, x_k \in X_3),$$

де $\mu_{VER}(\langle x_i, x_j \rangle)$ – функція приналежності нечіткій множині, елементами якої є чисельні значення кількостей відключень у розподільній мережі залежно від часу; $\mu_{EFF}(\langle x_j, x_k \rangle)$ – функції приналежності нечіткій множині, елементами якої є чисельні значення ефектів секціонування від часу.

Розглянемо, яким чином виходить шукана композиція бінарних нечітких відносин. Спочатку знаходимо мінімальні значення функцій приналежності $\min\{ \mu_{VER}(\langle x_i, x_j \rangle), \mu_{EFF}(\langle x_j, x_k \rangle) \}$. Відповідно бінарна композиція нечітких відносин набуває вигляду згідно з табл. 2.

Таблиця 2

Послідовна 3	Послідовна 35	Послідовна 235	Паралельна 257	Змішана 32	Змішана 1 352	Змішана 1 232	Змішана 2 323	Послідовна 3	Послідовна 35
0,7447	0,8559	0,8541	0,8989	0,4590	0,4871	0,8888	0,8989	0,8989	0,7447

Аналіз одержаних результатів (табл. 2) показує, що найефективнішими варіантами секціонування сільських розподільних ліній будуть варіанти з максимальним значенням бінарної композиції нечітких відносин: 1) установка трьох КА за послідовною схемою на ділянки після 2, 3 і 5 магістралей; 2) установка трьох КА за змішаною схемою – двох за послідовною схемою на ділянки після 3 і 5 магістралей і одного за паралельною схемою на 2 відгалуження; 3) установка трьох КА за змішаною схемою – двох за послідовною схемою на ділянки після 2 і 3 магістралей і одного за паралельною схемою на 2 відгалуження. Таким чином, одержані три однозначні рішення, тому для вибору оптимального варіанту необхідно скористатися допоміжними критеріями, наприклад, сумарною ефективністю, значущістю певних споживачів, простотою експлуатації.

Використовуючи уточнюючі дані з табл. 2 у вигляді сумарного ефекту від секціонування протягом доби, бачимо, що найприйнятнішим способом секціонування буде установка трьох КА за змішаною схемою, зокрема, двох КА на ділянки після 3, 5 магістралей і одного КА на 2 відгалуження.

Окрім використовуваної вище максимінної композиції бінарних нечітких відносин, на практиці [5] для уточнення результатів використовується альтернативна операція композиції у вигляді (max-*)-композиції. Це таке нечітке бінарне відношення, що задане на декартовому добутку $X_1 \times X_3$ і позначається Q^*R , якщо його функція приналежності визначається таким виразом:

$$\mu_{VER*EFF}(\langle x_i, x_k \rangle) = \max_{x_j \in X_2} \{ \mu_{VER}(\langle x_i, x_j \rangle) * \mu_{EFF}(\langle x_j, x_k \rangle) \}; \quad (3)$$

$$(\forall \langle x_i, x_k \rangle \in X_1 \times X_3, x_i \in X_1, x_k \in X_3).$$

Зокрема, якщо у виразі (3) використовувати замість операції "*" операцію алгебраїчного множення, то можемо одержати (max–prod)-композицію.

Проілюструємо результат (max–prod) – композиції для приведеного вище пошуку найприйнятнішого варіанту секціонування. Відмінності з'являться на етапі формування композиції бінарних відношень. На першому етапі композиції знаходимо алгебраїчний добуток значень функцій приналежності $prod\{\mu_{VER}(\langle x_i, x_j \rangle), \mu_{EFF}(\langle x_j, x_k \rangle)\}$. Відповідно бінарна (max–prod)- композиція нечітких відношень набуде значення, наведеного у табл. 3:

Таблиця 3

Послідовна 3	Послідовна 35	Послідовна 235	Паралельна 257	Змішана 32	Змішана 1 352	Змішана 1232	Змішана 2323
0,6628	0,7618	0,8591	0,5368	0,7910	0,8900	0,8827	0,6628

Аналізуючи результати (табл. 2 і 3) різних композицій нечітких відношень, робимо висновок про те, що оптимальні кількість та місця розташування КА, одержані за бінарними (max–prod) та максимінними композиціями, будуть аналогічними, що свідчить про наявність стійкого зв'язку між окремими елементами моделей. Збіг результатів, одержаних на основі різних композицій, дає підставу для обґрунтованих висновків щодо вибору варіанту секціонування.

Таким чином, запропоновано метод вирішення проектної задачі оптимального секціонування розподільної електричної мережі з метою підвищення надійності електропостачання на базі теорії нечітких множин і спосіб отримання однозначного рішення при різних бінарних композиціях нечітких відношень. Показано, що навіть при невизначеному характері початкової інформації, розроблений алгоритм дозволяє оцінити найбільш вірогідну величину ефекту від секціонування і отримати оптимальну проектну схему. Під час подальших досліджень метод буде доповнено умовами, які визначаються критеріями якості електричної енергії та ефективністю її транспортування.

1. Козирський В.В., Гай О.В. Аналіз впливу відхилень вихідних даних на вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв у розподільних мережах // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – № 3. – С. 10–18.
2. Козирський В.В., Гай О.В. Вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв для розподільних мереж напругою 10 кВ // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 12–20.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. Тенденції розвитку систем електропостачання // Електротехніка та електроенергетика. – 2000. – №2. – С. 73–76.
4. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Баженов В.А. Оптимизация режимов электрических сетей. – К.: Наук. думка, 1992. – 218 с.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
6. Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения: Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: Сельэнергопроект, 1981. – 110 с.
7. Рыбаков Л.М., Сошников А.Е., Соловьев Д.Г. Анализ причин аварийных отключений в распределительных сетях 10–35кВ // Электрика. – 2001. – № 3. – С. 16–20.
8. Ekel P.Y. Fuzzy sets and models of decision making // Computers & Mathematics with Applications, 2002. – vol. 44, is. 7. – P. 863–875.

О.В. Гай¹, канд. техн. наук, **Ю.И. Тугай**², канд. техн. наук

1 – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
ул. Героев Оборона, 15, Киев-41, 03041, Украина;

2 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Оптимальное секционирование схем распределительных электрических сетей

Рассмотрена проектная задача выбора мест оптимального секционирования схемы распределительных электрических сетей. Предложены метод и алгоритм оптимизации, базирующиеся на аппарате теории нечетких множеств. Приведен пример использования этого алгоритма. Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, оптимизация, проектирование, нечеткие множества.

O.V. Gay¹, Yu. I. Tugai²

1 – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
st. Geroyev Dnipro, 15, Kyiv-41, 03041, Ukraine;

2 – Institute of electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The optimal points of sectionalization in distributive networks

The choice of optimum sectioning in a distributive electrical network is considered. The method and the algorithm of optimization, which are based on the theory of fuzzy set, are suggested. The example of use of this algorithm is given. References 8, figures 1.

Key words: distributive electrical network, optimization, engineering, fuzzy set.