



Кафедра агроінженерії

УДК 621.316:621.311.1:519.85

Багатокритеріальної оптимізації електричних апаратів в умовах децентралізованих енергетичних систем

Садовий О.С.

доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет м. Миколаїв, Україна

Анотація: У роботі досліджено особливості функціонування електричних апаратів в умовах децентралізованих енергетичних систем та сільських електромереж, які характеризуються значною варіативністю режимів, втратами напруги та нерівномірністю навантаження. Запропоновано метод багатокритеріальної оптимізації на основі узагальненої цільової функції, що використовує безрозмірні показники технічного рівня та інваріантні керовані змінні. Математична модель враховує простір режимів електроенергетичної системи, що дозволяє перейти від локальної до інтегральної оптимізації електричних апаратів. Введено систему критеріїв, яка охоплює енергетичні втрати, масо-габаритні показники, теплову стійкість та адаптивність до змінних умов роботи. Показано, що врахування специфіки сільських мереж дозволяє підвищити ефективність та надійність електричних апаратів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні електротехнічного обладнання для автономних та агроенергетичних систем.

Ключові слова: електричні апарати, децентралізовані енергосистеми, сільські електромережі, багатокритеріальна оптимізація, узагальнена цільова функція, енергоефективність

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується переходом до децентралізованих систем електропостачання, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії, систем накопичення та локальних енергетичних вузлів. Особливо складними умовами функціонування відзначаються сільські електромережі, які характеризуються значною протяжністю ліній, підвищеними втратами напруги, нерівномірністю навантаження та обмеженою пропускну здатністю. У таких умовах електричні апарати працюють у змінних режимах, що істотно відрізняються від номінальних, і це обумовлює необхідність використання узагальнених методів оптимізації, здатних враховувати багатофакторність процесів.

Зниження напруги в сільських електромережах описується співвідношенням

$$U(t) = U_0 - \Delta U_{\text{line}}(t),$$

де $U(t)$ - напруга на затискачах апарата, U_0 - напруга джерела, а $\Delta U_{line}(t)$ - падіння напруги в лінії. Це падіння визначається добутком струму та повного опору лінії

$$\Delta U_{line} = I(t) \cdot Z_{line},$$

що відображає фізичний зв'язок між навантаженням і втратами напруги. Таким чином, напруга живлення стає функцією режиму, а не сталою величиною.

Стан децентралізованої системи описується простором режимів

$$\mathbf{r}(t) = \{U(t), I(t), P(t), f(t), \cos \varphi(t), \Delta U(t), L\},$$

який включає електричні, енергетичні та мережеві параметри. Це означає, що електричний апарат функціонує в багатовимірному просторі станів, що змінюються в часі, і оптимізація повинна враховувати весь цей простір.

У роботі використано метод узагальненої цільової функції (Generalized Objective Function Method), який базується на переході від абсолютних показників до безрозмірних індикаторів технічного рівня. Кожен критерій оптимізації подається у нормованому вигляді

$$\Pi_i = \frac{J_i}{J_{i,ref}},$$

де J_i - значення відповідного критерію, а $J_{i,ref}$ - базове або еталонне значення. Така нормалізація забезпечує інваріантність оцінювання та дозволяє об'єднати різнорідні критерії в єдину систему.

Згідно з методом GOFM, технічний рівень електричного апарата визначається узагальненим показником

$$F_{kii} = f(P_d, K_{cmp}, P_{kii}^*),$$

де P_d - фактор вихідних даних, що враховує електромагнітні навантаження, K_{cmp} - коефіцієнти, що характеризують властивості матеріалів, а P_{kii}^* - безрозмірна складова, яка враховує масу, вартість та втрати. Цей вираз відображає інтегральний підхід до оцінювання технічного рівня апарата як функції конструктивних і фізичних параметрів.

У рамках методу вводяться керовані змінні

$$\mathbf{G} = \{B_m, J, k_1, k_2, \alpha\},$$

де B_m - магнітна індукція, J - густина струму, k_1, k_2 - геометричні коефіцієнти, α - конструктивний параметр. Ці змінні визначають геометрію та електромагнітний стан апарата і є основою для оптимізації.

Енергетичні властивості електромагнітної системи описуються співвідношенням

$$Q_n = f(B_m, J, f_1),$$

де Q_n - номінальна реактивна потужність, B_m - індукція, J - густина струму, f_1 - частота. Ця залежність показує, що потужність апарата визначається електромагнітними навантаженнями та частотними умовами.

Критерії оптимізації формуються відповідно до фізичних процесів. Інтегральні втрати енергії визначаються як

$$J_1 = \int_0^T P_{\text{loss}}(t) dt,$$

що враховує змінність режимів. Масо-габаритний показник

$$J_2 = \frac{m}{P}$$

характеризує матеріалоємність. Тепловий стан визначається через

$$J_3 = \Delta T,$$

що відображає теплову стійкість. Чутливість до змін напруги задається

$$J_4 = \max \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)^{-1},$$

що показує здатність апарата працювати в умовах коливань напруги.

Усі критерії об'єднуються в узагальнену цільову функцію

$$F = \sum_{i=1}^n w_i \Pi_i,$$

де w_i - вагові коефіцієнти. З урахуванням децентралізованого характеру системи функція набуває інтегрального вигляду

$$F = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{1}{T} \int_0^T \Pi_i(\mathbf{G}, \mathbf{r}(t)) dt \right),$$

що означає усереднення критеріїв у просторі режимів.

Оптимізаційна задача формулюється як пошук таких керованих змінних, при яких цільова функція досягає мінімуму

$$\mathbf{G}^* = \arg \min F(\mathbf{G}),$$

що відповідає визначенню оптимальної конструкції електричного апарата.

Таким чином, інтеграція методу узагальненої цільової функції з урахуванням простору режимів децентралізованої та сільської енергосистеми дозволяє перейти від локальної оптимізації до системного підходу. Це забезпечує узгодження електромагнітних, теплових і конструктивних параметрів та дозволяє створювати електричні апарати, адаптовані до реальних умов експлуатації. Отримані результати

підтверджують ефективність підходу та його доцільність для проєктування сучасних енергетичних систем.

Список використаних джерел:

1. Wang, Y., Guo, L., Ma, Y., Han, X., Xing, J., Miao, W., Wang, H. Study on operation optimization of decentralized integrated energy system in northern rural areas based on multi-objective. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 3063–3084. DOI: 10.1016/j.egyр.2022.01.246. (ScienceDirect)
2. Fan, G., Liu, Z., Liu, X., Shi, Y., Wu, D., Guo, J., Zhang, S., Yang, X., Zhang, Y. Energy management strategies and multi-objective optimization of a near-zero energy community energy supply system combined with hybrid energy storage. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 83. Article 103970. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103970. (ScienceDirect)
3. Ahmadi, B., Giraldo, J. S., Hoogsteen, G., Gerards, M. E. T., Hurink, J. L. A multi-objective decentralized optimization for voltage regulators and energy storage devices in active distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2023. Vol. 153. Article 109330. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109330. (research.utwente.nl)
4. Anjaiah, K., Dash, P. K., Bisoi, R., Dhar, S., Mishra, S. P. A new approach for active and reactive power management in renewable based hybrid microgrid considering storage devices. *Applied Energy*. 2024. Vol. 367. Article 123429. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123429. (ScienceDirect)
5. Zhang, S., Chen, S., Cai, Y., Liu, Y., Fan, K., Tan, Y., Li, W. Hierarchical Distributed Optimization of Rural Integrated Energy Systems Considering Energy Storage Aggregation. *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 22. Article 4473. DOI: 10.3390/electronics14224473.

Abstract: This paper investigates the operation and optimization of electrical apparatus under the conditions of decentralized energy systems and rural electrical networks, which are characterized by voltage instability, distributed generation, and variable load profiles. A multi-criteria optimization method based on the generalized objective function approach is proposed. The method utilizes dimensionless technical indicators and invariant controlled variables to ensure a consistent evaluation of design alternatives. The mathematical model incorporates the concept of the operating space, representing the set of possible system states defined by voltage, current, power, and network parameters. This enables a transition from single-point optimization to integral optimization over the entire operating range. A system of optimization criteria is formulated, including energy losses, mass-to-power ratio, thermal performance, and adaptability to variable operating conditions. The influence of rural network characteristics, such as voltage drops and line impedance, is explicitly taken into account within the objective function. This allows improving the stability and efficiency of electrical apparatus in non-ideal power supply conditions. The proposed approach provides a systematic framework for the design of energy-efficient and reliable electrical equipment for decentralized and agricultural energy applications.

Keywords: electrical apparatus, decentralized energy systems, rural power networks, multi-criteria optimization, generalized objective function, energy efficiency