

Оцінювання значень параметрів моделі конденсаторного збуджувача асинхронного генератора

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.020>

Святослав Василець

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
s.vasylets@nuwm.edu.ua

Катерина Василець

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
k.s.vasylets@nuwm.edu.ua

Володимир Ільчук

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua

Анотація—Запропоновано принцип побудови конденсаторного збуджувача для асинхронного генератора. Збільшення ступенів регулювання ємнісного струму досягається змінною топологією збуджувача. Шляхом регресійного аналізу оцінено значення параметрів математичної моделі збуджувача, яка враховує дію трьох факторів (кількість груп конденсаторів, кількість суміжних конденсаторів) та їх взаємодії. Встановлено несуттєвість впливу кроку зміни ємностей конденсаторів на параметри регулювання. Застосування збуджувача зі змінною топологією підвищить ефективність керування рівнем збудження автономного асинхронного генератора при зміні частоти обертання турбіни або потужності електричного навантаження.

Keywords—асинхронний генератор; збудження; конденсаторні батареї; дискретне регулювання; змінна топологія

I. АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАННЯ

Пошкодження тепло- та гідроелектростанцій внаслідок бойових дій суттєво впливають на стан енергосистеми України. При відбудові генеруючих потужностей передбачається інтенсивний розвиток відновлюваних джерел енергії [1]. Відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2050 року», встановлена потужність вітроустановок має бути збільшена до 140 ГВт, гідроенергуючих об'єктів – до 9 ГВт.

У складі малих ГЕС, когенераційних та вітроустановок використовуються асинхронні генератори (АГ). Глобальний ринок таких генераторів оцінюється у 2,1 млрд доларів США за 2024 р. АГ може працювати у мережевому або автономному режимі [2], але у обох випадках генератор потребує джерела реактивної потужності

для збудження. У випадку роботи у складі автономної електромережі АГ обладнують конденсаторними батареями. Однак, при зміні частоти обертання турбіни або потужності електричного навантаження реактивний струм збудження має змінюватися для підтримання сталої величини вихідної напруги. Для розв'язання такої задачі пропонується використовувати компаундні конденсатори [3]. Однак, такий спосіб характеризується обмеженим діапазоном регулювання. Також відомо для використання перетворювача STATCOM для зміни струму збудження [4], однак якість регулювання є недостатньою. Відомо про використання напівпровідникового перетворювача [5], однак це погіршує гармонійний склад вихідного струму генератора.

На основі аналізу стану питання можна встановити, що актуальною є задача стабілізації величини вихідної напруги асинхронного генератора при зміні частоти обертання турбіни та потужності навантаження.

Мета – підвищення якості вихідної напруги асинхронного генератора при дії збурень за рахунок обґрунтування структури та параметрів конденсаторного збуджувача зі змінною топологією, що забезпечує дискретне регулювання струму збудження.

II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – конденсаторний збуджувач для асинхронного генератора. Предмет – процес дискретного регулювання ємності конденсаторного збуджувача зі змінною топологією. Розглядається трифазний збуджувач, з'єднаний за схемою трикутника. Фаза збуджувача включає декілька груп паралельно з'єднаних конденсаторів, кожен з яких

зашунтовано розрядним резистором. В межах групи число підключених конденсаторів може змінюватися за рахунок застосування напівпровідникових ключів. Суміжні групи конденсаторів з'єднуються міжгруповими комутаторами послідовно або паралельно. Сукупна ємність фази змінюється при комутації конденсаторів в мержах кожної групи та зміни схеми з'єднання суміжних груп [6]. Основна гіпотеза дослідження полягає у можливості мінімізації середнього кроку зміни ємності збуджувача при комутації ключів та комутаторів. Для визначення допустимих станів конденсаторного збуджувача розроблено алгоритм, який реалізовано як комп'ютерна програма CEVT, рис. 1.

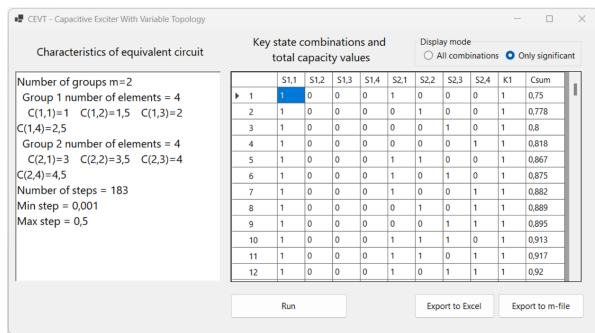


Рис. 1. Комп'ютерна програма CEVT

Параметри математичної моделі збуджувача оцінювалися за результатами чисельного експерименту, що проводився з використанням програми CEVT. Було проведено повний факторний експеримент типу 2^3 . Досліджувався вплив трьох факторів на збуджувач: x_1 – кількість груп конденсаторів; x_2 – кількість конденсаторів в кожній групі; x_3 – крок зміни ємностей суміжних конденсаторів. Функцією цілі обрано математичне сподівання кроку зміни ємності збуджувача.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Встановлено суттєвий вплив кількості груп конденсаторів та числа конденсаторів у кожній групі на параметри збуджувача: їх збільшення суттєво збільшує загальну кількість допустимих станів збуджувача й верхню межу діапазону регулювання та зменшує математичне сподівання абсолютної величини кроку зміни ємності збуджувача. Шляхом регресійного аналізу оцінено значення параметрів математичної моделі збуджувача, табл. I:

$$\bar{\delta} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Значення коефіцієнта детермінації 0,9 та скоригованого коефіцієнта детермінації 0,725 свідчать про достатню точність регресії. З аналізу асимптотичної значимості можна встановити, що фактор x_3 суттєво не впливає на функцію цілі самостійно і у взаємодії з іншими факторами, тому може бути виключений. Дисперсійний аналіз свідчить, що переважний вплив на функцію цілі

мають фактори x_1 та x_2 порівняно з впливом їх взаємодії $x_1 \cdot x_2$.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ МОДЕЛІ (6) ШЛЯХОМ РЕГРЕСІЇ ЕМПІРИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ

Коефіцієнт моделі	Оцінка коефіцієнта	Стандартна похибка	Асимптотична значимість p
b_0	1,0066	0,2848	0,0241
b_1	-1,3246	0,3488	0,0191
b_2	-1,1768		0,0279
b_3	-0,0958		0,7973
b_{12}	1,1019		0,0342
b_{13}	0,0767		0,8367
b_{23}	0,0465		0,9004
b_{123}	-0,0317		0,9319

Несуттєвість впливу фактора x_3 на функціонування збуджувача підтверджується одержаними регулювальними характеристиками

IV. ВИСНОВКИ ТА НАПРЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті оцінювання значень параметрів регресійної моделі конденсаторного збуджувача підтверджено значимість впливу кількості груп та числа конденсаторів у кожній групі на ширину діапазону та крок регулювання. Зокрема, збільшення величин вказаних факторів з 2 до 4 розширює діапазон регулювання в 16 разів, а кількість кроків – у 827 разів (з 22 до 18209). Збільшення кількості ступенів регулювання дозволить підвищити точність формування ємнісного струму збудження генератора та компенсації індуктивної складової струму навантаження. Це підвищить ефективність керування рівнем збудження автономного асинхронного генератора при дії зовнішніх збурень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Кабінет Міністрів України (2024). Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року (Затв. розп. КМУ від 13.08.2024 р. № 761-р). <https://surl.li/liijcp>
- [2] Markov, V.S., Honcharov, Ye.V., Kriukova, N.V., & Poliakov I.V. (2024). Simulation of an induction generator for a wind farm. Bulletin of the National Technical University "KhPI", Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice, 1 (11). 24–27. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.05>
- [3] Khan, M.F., Khan, M.R., & Iqbal A. (2022). Effects of induction machine parameters on its performance as a standalone self excited induction generator. Energy Reports, 8, 2302–2313. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.023>
- [4] Negi, G. S., Gupta, M. K., Saxena, N. K., & Mohan, H. (2024). Squirrel cage induction generator based micro grid voltage assessment with STATCOM using different metaheuristic approaches. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 9, 100736. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100736>
- [5] Guettat, A., Boudjema, Z., Bounadja, E., & Taleb, R. (2022). Improved control scheme of a dual star induction generator integrated in a wind turbine system in normal and open-phase fault mode. Energy Reports, 8, 6866–6875. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.048>
- [6] Vasylets S., Vasylets K., Ilchuk V. Determination of regulation characteristics of capacitor exciter with variable topology for self-excited induction generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2(8) (134). Pp. 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.32617>