III. Секція «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

УДК 620.93:662.769.21

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ВОДИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ

Володимир МАРТИНЕНКО

Кандидат технічних наук, доцент

Миколаївський національний аграрний університет

м. Миколаїв, Україна

Анотація: *Порівняно AEL, PEM, AEM та SOEC для трьох енергетичних сценаріїв України: промислового базового навантаження, мінливої генерації ВДЕ та гібридної децентралізованої системи. Оцінювання враховує вартість водню, операційну вуглецеву інтенсивність, гнучкість, технологічну зрілість і експлуатаційну придатність. Встановлено, що вибір електролізера визначається умовами роботи, а не одним показником ефективності.*

Ключові слова: *електроліз води, водень, AEL, PEM, AEM, SOEC, ВДЕ, енергетична стійкість.*

Електролітичне виробництво водню є перспективним інструментом декарбонізації промисловості та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Для України важливо оцінювати електролізери не лише за питомим споживанням електроенергії, а й за здатністю працювати в умовах змінної генерації, перерв електропостачання, обмеженої сервісної логістики та різної доступності теплової енергії. Тому доцільним є сценарний підхід, що поєднує економічні, екологічні та експлуатаційні критерії [1, 2].

У роботі зіставлено лужний електроліз (AEL), електроліз із протон-обмінною мембраною (PEM), аніон-обмінною мембраною (AEM) та твердооксидний електроліз (SOEC). Системні межі прийнято однаковими: від подачі змінного струму й очищеної води до одержання сухого водню на виході. Зберігання, компримування, транспортування та кінцеве використання водню не враховувалися. Розглянуто три сценарії: промисловий, роботу з мінливою генерацією ВДЕ та гібридну стійку систему. Економічний критерій визначено

за нормованою вартістю виробництва водню (LCOH) з урахуванням CAPEX, експлуатаційних витрат, заміни стека, ефективного часу роботи та вартості електричної і теплової енергії.

Для промислового сценарію за наявності безперервної подачі пари й дешевого корисного тепла найнижчу розрахункову LCOH має SOEC - 5,01 дол. США/кг H_2. Для AEL отримано 5,40, PEM - 6,15, AEM - 7,16 дол. США/кг H_2. Перевага SOEC пов'язана з нижчим електроспоживанням завдяки підведенню частини енергії у вигляді високотемпературного тепла. Однак цей результат справедливий лише для об'єкта зі стабільним тепловим режимом; без доступного джерела тепла технологічна перевага SOEC суттєво зменшується [3].

За мінливої сонячної або вітрової генерації найменшу LCOH має AEL - 5,93 дол. США/кг H_2, тоді як для PEM вона становить 6,68, SOEC - 6,86, AEM - 8,03 дол. США/кг H_2. Водночас за багатокритеріальним оцінюванням PEM посідає перше місце з інтегральною оцінкою U = 0,784, якщо гнучкість є домінуючим критерієм. Це пояснюється кращою пристосованістю PEM до швидких змін потужності, широкого діапазону регулювання та частих перезапусків [4]. Отже, мінімальна собівартість не завжди відповідає найвищій системній придатності.

У гібридному сценарії AEL і SOEC мають майже однакову LCOH - близько 5,68 дол. США/кг H_2, проте AEL отримує найвищу інтегральну оцінку U = 0,840 завдяки технологічній зрілості, ремонтопридатності, надійнішому перезапуску та нижчій залежності від критичних матеріалів. AEM за прийнятих припущень доцільніше розглядати як дослідний і демонстраційний напрям. Аналіз чутливості показав, що економічна рівність AEL і SOEC у промисловому сценарії досягається за вартості корисного тепла близько 53 дол. США/МВт·год. Для PEM у сценарії ВДЕ ефективне використання має зрости приблизно до 54,8 %, щоб досягти модельної LCOH AEL, для якого відповідне значення становить 40,5 %.

Таким чином, універсальної найкращої технології електролізу для енергетичних систем України немає. SOEC є доцільним для теплоінтегрованого промислового виробництва, PEM - для режимів із високими вимогами до динамічної гнучкості, AEL - для гібридних децентралізованих систем, де важливі зрілість і простота обслуговування. Отримані результати мають характер попередньої техніко-економічної оцінки. Перед інвестиційним проєктуванням необхідно використовувати фактичні погодинні профілі електроенергії, локальний тепловий баланс, параметри конкретного електролізера, деградацію стека, вимоги до тиску і чистоти водню та умови сервісного забезпечення.

Список використаних джерел

1. Vedros K., Christian R., Yang Hui Otani C. Probabilistic Risk Assessment of a Light Water Reactor Coupled with a High Temperature Electrolysis Hydrogen Production Plant. OSTI, 2022. DOI: 10.2172/1903606.

2. Ginsberg M. J., Esposito D. V., Fthenakis V. M. Designing off-grid green hydrogen plants using dynamic polymer electrolyte membrane electrolyzers to minimize the hydrogen production cost. Cell Reports Physical Science. 2023. 101625. DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101625.

3. Sadovoy, O., Koshkin, D., Martynenko, V., & Sokolik, V. (2025). Electricity generation from biogas: Modern technologies and prospects for Ukraine’s energy independence. Machinery & Energetics, 16(1), 173-185. https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.173

Abstract. *AEL, PEM, AEM and SOEC technologies were compared for industrial baseload, variable renewable generation and hybrid decentralized operation in Ukraine. The results show that SOEC is preferable when continuous low-cost heat is available, PEM when flexibility is the dominant criterion, and AEL in hybrid resilient systems where maturity and maintainability are prioritized.*

Keywords: *water electrolysis, hydrogen, AEL, PEM, AEM, SOEC, renewable energy, resilience.*