

Endrődi Balázs¹–Szén István²–Bakos Imre²–Kádár Krisztina¹–Janáky Csaba¹¹ Szegedi Tudományegyetem² Bükkábrányi Fotovoltaikus Erőmű Kft.

Innováció és fenntarthatóság: napenergiát hasznosító, hidrogénalapú energiatároló technológia fejlesztése Bükkábrányban és a Szegedi Tudományegyetemen

Az Európai Unió klímacéljai, különösen a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére és a karbonsemleges gazdaság megteremtésére irányuló törekvések kulcsszerepet játszanak a hidrogénalapú technológiák fejlődésében. A hidrogén technológiai jelentősége abban rejlik, hogy hozzájárulhat a nehézipar és a szállítási szektor dekarbonizációjához, miközben lehetőséget kínál az időszakosan elérhető megújuló energia hatékony tárolására. Az EU olyan szakpolitikai eszközökkel támogatja a hidrogénteknológiák fejlesztését, mint a „nettó zéró” technológiai termékek európai gyártási ökoszisztémájának megerősítését célzó rendelet (Net-Zero Industry Act), amely keretet biztosít az ipari zöldhidrogén-termelés számára.

Ezen célok eléréséhez járul hozzá „A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése” című, 2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00003 azonosító számú projekt, mely során egy innovatív energiatárolási megoldást fejlesztettünk ki a Bükkábrányi Fotovoltaikus Erőmű Projekt Kft. és a Szegedi Tudományegyetem együttműködésében. A projekt során egy 22 MWp csúcsteljesítményű naperőműhöz kapcsolt, 1 MW-os protoncseres-membrános (PEM) elektrolízisrendszert telepítettek, amely az időszakosan rendelkezésre álló megújuló villamos energiát hidrogén formájában tárolja. Ez a „power-to-gas” (P2G) technológia nemcsak a hálózati termelési ingadozások kezelésére nyújt megoldást, hanem elősegíti a megújuló energiaforrások maximális kihasználását is. Ezenkívül elkészült a hidrogén gazdaságos, palackos értékesítéséhez szükséges nyomásfokozó rendszer, valamint a teljes technológia biztonságos és szabályos üzemelését lehetővé tevő infrastruktúra.

A projekt kutatási fókuszja kiterjedt számos, a pilot üzem működése szempontjából kulcsfontosságú területre, ilyenek a teljes folyamat szerződéses rendszere és gazdasági környezete, az energiakonverziós folyamatok, a mérési és adattovábbítási rendszer, a jogszabályi környezet, a PEM elektrolízis berendezések szakaszos működésének technológiai kihívásai (beleértve a nyomás-, hőmérséklet- és reakciósebesség-ingadozások hatásait, valamint az anyagok degradációja a megállítási-újraindítási ciklusok során). A PEM vízelektrolízis előnyei közé tartozik a dinamikus működés lehetősége, a viszonylag egyszerű felépítés, a hosszú élettartam és a méretnövelhetőség. Az új technológia képes az elektromos hálózati termelés ingadozásainak kezelésére, ami nagymértékben elősegítheti a fosszilis tüzelőanyag-alapú ener-

giatermelésről a megújuló villamosenergia-rendszerre való átlást. [1,2]

A megújuló erőművek tulajdonosait komoly pénzbüntetés terheli, ha az erőmű által termelt villamos energia mennyisége eltér az előre jelzett ütemezéstől. Amennyiben a fotovoltaikus erőmű kevesebb energiát állít elő a vártnál, pozitív szabályozási igény merül fel. Ezzel szemben ha a tényleges termelés meghaladja az előre jelzett értéket, negatív szabályozási szükséglet lép fel. Ez utóbbi esetben a vízelektrolízáló rendszer alkalmazása hatékony megoldást nyújthat az energiatermelési különbségek kezelésére. [3,4] Emellett számos egyéb forgatókönyv (pl. csak ütemezés, ütemezés + a szabad piacon értékesíthető villamosenergia-fogyasztás kombinálása, hálózati villamos energia felhasználása stb.) mentén hasznosíthatja a villamos energiát a vízelektrolízáló rendszer, melyek esetében eltér a rendszer kihasználtsága, így a megtermelt hidrogén ára is.

A projekt megvalósítása során részletes techno-ökonómiai jellegű elemzés készült, több forgatókönyv mentén. Az elemzés rámutatott arra, hogy a hidrogén előállítási költsége függ az üzemeltetési protokolltól és az előállított mennyiségtől, valamint a felhasznált elektromos áram áráról. A projekt során létrehozott technológiában – az elektrolízáló rendszer és a naperőmű paramétereinek figyelembevételével – a vízelektrolízáló alkalmazásával, historikus adatok alapján, éves átlagban körülbelül 40%-os menetredezéstől való eltéréscsökkenés érhető el. Az elvégzett hatásvizsgálat szerint a kapacitás növelésével a költségek csökkenthetők, míg a villamos energia szabadpiaci ára jelentős mértékben befolyásolja az optimális kihasználást.

A PEM vízelektrolízáló működése leegyszerűsítve: a berendezések ionmentes vízből hidrogént és oxigént állítanak elő, ezeket a gázokat membrán választja el egymástól. Ezen az ioncserélő membránon keresztül történik az ionvezetés, kizárólag az anódon képződő H⁺-ionok katód felé haladásával.

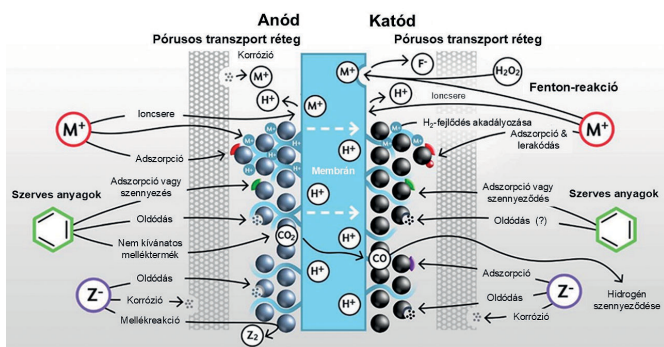
A működésnek ezt a végletekig egyszerűsített leírását azonban számos egyéb hatás árnyalja, melyek közül a fontosabbak:

- A H₂ és O₂ termékgázok egyaránt áthatolnak a membránon, ezért a termékek soha nem 100%-os tisztaságúak.
- A különböző gázok membránon való átjutása erősen függ a működési paraméterektől, mint amilyen a hőmérséklet, a nyomás és az áramsűrűség.
- A H⁺-transzport mindig vízázállítással együtt történik, ezért nagy mennyiségű víz kerül az elektrolízáló katód cellaterébe.



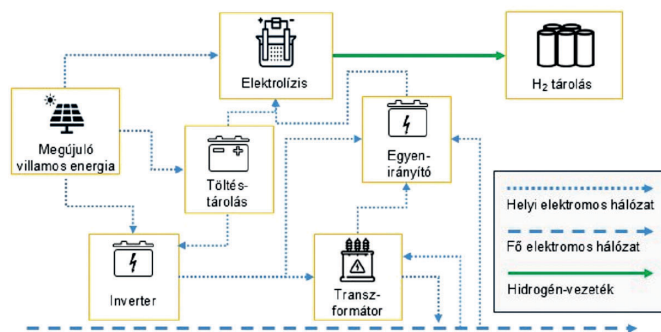
- A katalizátorok, a cella hardverének és/vagy magának a rendszernek a korróziójából származó fémionok elérhetik a membránt, és átjuthatnak a katódra. Ezek későbbi lerakódása az elektrokémiai aktivitás csökkenéséhez, a cellafeszültség növekedéséhez vezet.
- Az ilyen fémionok (kvázi) irreverzibilisen kötődhetnek a membrán töltött csoportjaihoz, ezáltal csökken a vezetőképesség és nő a cella feszültsége.
- Amikor a rendszer nyitott áramköri körülmények között indul, a katalizátorok felülete (és esetleg több cella szerkezeti eleme) oxidálódik vagy redukálódik.
- A buborékképződés sebessége és a képződő buborékok mérete a kísérleti paraméterektől függ. Ez befolyásolja eltávolításuk hatékonyságát.
- Helyi melegedés léphet fel részben az eldugult elektródfelület, a szerkezeti tökéletlenségek vagy egyéb okok miatt. Ez lokális katalizátor- és membrán-túlhasználatához, majd ezt követő membrán-elvékonyodáshoz vezethet.

Ezek a hatások jól ismertek az elektrolizálógyártók számára, így a rendszereket ezek figyelembevételével tervezik, minden rendszerelemet specifikusan az adott elektrolizálóhoz választva és méretezve. Ezenkívül részletes specifikációt adnak a felhasználók számára, hogy milyen körülmények között lehet hosszú távon is stabilan üzemeltetni a rendszert. Még ilyen körülmények között is számos degradációs mechanizmus vezet együtt az elektrolizáló-cellakötegek fokozatos öregedéséhez (1. ábra). A degradációs utak jelentősége nagyban nőhet a megújuló energiaforrás közvetlen felhasználása okozta dinamikus üzemeltetés esetén. A gyakori (naponta legalább egy-egy) leállás és újraindítás, [5,6] az ebből adódó terméktisztaság-romlás, a hőmérséklet-fluktuáció, [7] az elektrolízis során képződő buborékok hatása, [8] valamint a rendszerkomponensek bomlástermékeinek felhalmozódása [9] gyorsabb degradációt, költségesebb hidrogéntermelést eredményez.



1. ábra. PEM vízelektrolizálók degradációjának lehetséges mechanizmusai [10]

A PEM elektrolizálócellák dinamikus üzemeltetése számos technológiai és gazdasági kihívást hordoz. A gyakori leállások és újraindítások nem optimális működést eredményeznek, ami felgyorsíthatja a cellák öregedését, ezáltal növelve a rendszer karbantartási és beruházási költségeit. Emellett a dinamikus működés során a hidrogén tisztaságának fenntartása nagyobb energiaigényt von maga után, és jelentős veszteséggel valósul meg a folyamatos, optimális működéshez képest. Az optimális üzemeltetés érdekében a naperőmű-vízelektrolizáló-hidrogéntároló rendszer működése során kiemelt figyelmet szükséges fordítani a PEM vízelektrolízis rendszerének folyamatos működtetésére és legnagyobb mértékű kihasználására.



2. ábra. Néhány naperőmű-vízelektrolizáló csatlakoztatási lehetőség sematikus folyamatábrája

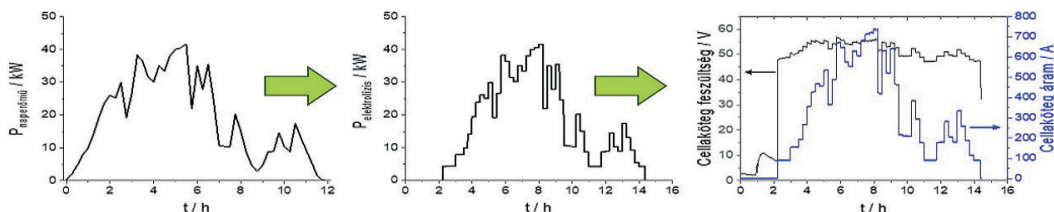
A legkézenfekvőbb üzemeltetési mód, amit a jelenleg telepített vízelektrolizáló rendszerek többsége alkalmaz, a fő elektromos hálózatról való közvetlen üzemelés, míg az ezekhez tartozó megújuló villamosenergia-erőmű is erre csatlakozik. Így a két technológia csak közvetetten, többnyire csak pénzügyi szempontból integrálódik. Ezenkívül számos más integrációs lehetőség kínálkozik (2. ábra), beleértve a két rendszer közvetlen csatlakoztatását (szükség esetén egy megfelelő DC-DC konverteren keresztül). Ez utóbbi megoldást nevezhetjük a vízelektrolizáló szigetüzem jellegű működésének. A megújuló energiatermelés ingadozása ebben az esetben közvetlenül befolyásolja az elektrolizáló teljesítményét. Ezt a hatást (kisméretű) töltéstároló(k) integrálásával vagy a megtermelt villamos energia többszörös inverziója/átalakítása révén csökkenthetjük, de ezek a lépések általában energiavesztéssel járnak.

Ezen hatások tudományos alaposságú vizsgálatára a Szegedi Tudományegyetem Energetikai Innovációs Tesztállomásán (3. ábra) a bükkábrányi beruházással párhuzamosan megépült egy hasonló technológia, ami egy 50 kW-os névleges teljesítményű, napkövető panelekből álló naperőműből, valamint egy szintén 50 kW maximális bemeneti teljesítményű PEM vízelektrolizáló rendszerből áll. Ez a kisebb méretű pilot rendszer lehetővé teszi a dinamikus ingadozó megújuló energiatermelés hatásainak vizsgálatát, megalapozva az 1 MW-os elektrolizáló rendszer optimális működtetését. A rendszeren lehetőség nyílik a különböző működtetési módok közvetlen összehasonlítására a terméktisztaság, az energiahatékonyság, a kihasználtság szempontjából.



3. ábra. Az SZTE Energetikai Innovációs Tesztállomás madártávlatból

A hatásvizsgálat első lépése a telephelyen működő naperőmű adott napi teljesítményprofiljának cellaköteg-teljesítményprofiljává való konvertálása, majd az elektrolízis ilyen körülmények közötti



4. ábra. A megújuló energiatermelés ingadozásának hatás-vizsgálata az elektrolízáló teljesítményére

végrehajtása volt (4. ábra). A mérések során a cellaköteg stabilan működött, a termelt hidrogén tisztasága pedig végig 99,95% vagy afölötti volt. A kísérletek következő lépése az időfelbontás növelése (az ábrán mutatott mérés esetében 15 perces), majd a naperómű által termelt energia valós idejű konverziója (DC-DC konverzió) és annak elektrolízisre való felhasználása lesz.

Az átfogó kutatás és megközelítés célja, hogy példaként szolgáljon a megújuló energiaforrásokat integráló, fenntartható és gazdaságos energiaátmenet megvalósítására. A bükkábrányi projekt keretein belül elért technológiai eredmények és generált tudásbázis nemcsak Magyarország versenyképességét erősíthetik a hidrogénalapú energiarendszerek területén, hanem hozzájárulhatnak az EU klímacéljainak megvalósításához is. ●●●

IRODALOM

- [1] Hirth, L., Ziegenhagen, I., Balancing power and variable renewables: Three links. Preprint at Elsevier Ltd., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.180>
- [2] Al-Shetwi, A.Q., Hannan, M.A., Jern, K.P., Mansur, M., Mahlia, T.M.I. (2020). Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods. Preprint at Elsevier Ltd., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119831>
- [3] Zsiboracs, H., Vincze, A., Pinter, G., Baranyai, N.H., The Accuracy of PV Power Plant

Scheduling in Europe: An Overview of ENTSO-E Countries. IEEE Access (2023) 11, 74953–74979. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3297494>

- [4] Zsiboracs, H., Pinter, G., Vincze, A., Birkner, Z., Baranyai, N.H., Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting. Energy Reports (2021) 7, 3805–3818. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.007>
- [5] Janjua, M., Leroy, R., Electrocatalyst performance in industrial water electrolyzers. Int J Hydrogen Energy (1985) 10, 11–19. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(85\)90130-2](https://doi.org/10.1016/0360-3199(85)90130-2)
- [6] Guruprasad, N., van der Schaaf, J., de Groot, M.T., Unraveling the impact of reverse currents on electrode stability in anion exchange membrane water electrolysis. J Power Sources (2024) 613. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234877>
- [7] Rauls, E., Hehemann, M., Keller, R., Scheepers, E., Müller, M., Stolten, D. Favorable Start-Up behavior of polymer electrolyte membrane water electrolyzers. Appl Energy (2023) 330. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120350>
- [8] Yuan, S., Zhao, C., Cai, X., An, L., Shen, S., Yan, X., Zhang, J. Bubble evolution and transport in PEM water electrolysis: Mechanism, impact, and management. Preprint at Elsevier Ltd., 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101075>
- [9] Staerz, A.F., van Leeuwen, M., Priamushko, T., Saatkamp, T., Endrődi, B., Plankensteiner, N., Jobbagy, M., Pahlavan, S., Blom, M.J.W., Janáky, C., et al., Effects of Iron Species on Low Temperature CO2 Electrolyzers. Preprint at John Wiley and Sons Inc, 2024. <https://doi.org/10.1002/anie.202306503>
- [10] Becker, H., Murawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I.E.L., Hinds, G., Smith, G., Impact of impurities on water electrolysis: a review. Preprint at Royal Society of Chemistry, 2023. <https://doi.org/10.1039/d2se01517j>

Hogyan érhető el a nettó nulla kibocsátási cél a nehezen szén-dioxid-mentesíthető iparágakban?

Ahogy a világ egyre gyorsabban halad az alacsony szén-dioxid-kibocsátású jövő felé, úgy egyre nagyobb nyomás nehezedik a nehéziparra, hogy dekarbonizálja működését. Az ABB gépipari konzern és a Fraunhofer IP közös jelentése betekintést nyújt az öt, nehezen dekarbonizálható ágazat (vas- és acélgégyártás, cementgyártás, vegyipar, bányászat, olaj- és gázipar) kibocsátáscsökkentési trendjeibe, és gyakorlati, rövid és hosszú távú megoldásokat javasol az ipari dekarbonizálás összetett problémakörével szembeesülő vállalkozások számára.

Az ipari ágazat jelenleg a világ összes üvegházhatásúgáz-kibocsátásának mintegy 29%-áért felelős. A kibocsátáscsökkentés gyakorlati útjai már rendelkezésre állnak, amiben az energiahatékonyság és az elektrifikáció kulcsszerepet játszik. Szintén jelentős lehetőség rejlik a villamos hajtásokban és a motorokban – jelenleg a világ ipari motorjainak mindössze 23%-a van hajtással felszerelve. Pedig ha a hajtást egy meglévő motorral kombinálják olyan alkalmazásokban, mint a szivattyúk, ventilátorok vagy kompresszorok, a hajtás általában akár 25%-kal is csökkentheti az energifogyasztást.

Az elemzés meghatározza a legnagyobb károsanyag-kibocsátású folyamatokat az egyes ipari ágazatokon belül, majd kiemeli azokat a technológiákat, amelyek csökkenthetik ezek károsanyag-kibocsátását. Különösen a kulcsfontosságú megoldásokra összpontosít: a technológiai fűtési folyamatok villamosítására, a szén-dioxid-leválasztásra és a hidrogénre. A szén-dioxid-mentesítésre nincs csodafegyver, de vannak könnyen elérhető megoldások. Ez a jelentés megkönnyíti a cégvezetők számára a célhoz vezető legjobb út kiválasztását.

Az olaj- és gázipar fokozza a szivárgások csökkentésére és a folyamatok villamosítására irányuló erőfeszítéseit – ezek a kulcsfontosságú intézkedések jelentős előrelépést jelentenek a szén-dioxid-mentesítés irányába. Ennek eredményeképpen csökken az üzemanyag-fogyasztás, ami az égetésből származó alacsonyabb károsanyag-kibocsátáshoz vezet. Az ágazat olyan alternatív üzemanyagokat is vizsgál, mint a hidrogén. Hasonlóképpen, a vas- és acélipar is olyan technológiákat alkalmaz, mint például a közvetlen redukációs vasgyártás és az elektromos ívkemencék, amelyek a hagyományos termelési módszerekhez képest alacsonyabb kibocsátású alternatívákat kínálnak. A vegyiparban az alacsony hőmérsékletű alkalmazások, például a hőszivattyúk használata lehetőséget kínál a hatékonyság növelésére és a kibocsátás csökkentésére. Az elektrifikáció a bányászat és a cementipar szén-dioxid-mentesítésében is lehetőség kínál. E két iparágban a be rendezések széles skáláját lehet villamosítani – beleértve az összes új és régi bányászati teherautót, szállítójárművet, szállítószalagot, aprítógépet, zúzóművet és szivattyút.

Az ABB és a Fraunhofer közös jelentése rámutat arra, hogy az ipar dekarbonizálásához vezető út összetett, de már ma is léteznek megvalósítható megoldások. Az elektrifikáció, az energiahatékony technológiák és az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásával az iparágak csökkenthetik a kibocsátást, miközben növelhetik a hatékonyságot és a versenyképességet. A jelentésből feltáruló meglátások és felismerések világos úttervet nyújtanak a vállalkozások számára a fenntartható átállás elősegítéséhez és az alacsony szén-dioxid-kibocsátású jövő előmozdításához.