

Tüzelőanyag-cellás járműhajtások architektúrája és szabályozása

Architecture and control of fuel cell vehicle powertrains

BARTHA Tibor¹, DR. KUTASI Dénes Nimród²

¹Sapientia EMTE, Számítógépes irányítási rendszerek, bartha.tibor@student.ms.sapientia.ro

²Sapientia EMTE, Egyetemi docens, kutasi@ms.sapientia.ro

SAPIENTIA Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi kar, Calea Sighişoarei nr. 2, Tel: +40 265 206 210, fax: +40 265 206 211, E-mail: office@ms.sapientia.ro, Honlap: ms.sapientia.ro

Abstract

Hydrogen and fuel cells are emerging as key technologies for sustainable transportation, offering a clean alternative to fossil fuels. This thesis focuses on the foundations of hydrogen-based powertrains and their simulation. It introduces the main hydrogen production methods, the most relevant fuel cell and battery technologies, and presents a Simulink model that currently implements motor drive from the battery and regenerative braking.

Keywords: hydrogen, fuel cell, battery technology, FCEV, regenerative braking

Kivonat

A hidrogén és a tüzelőanyag-cellák a jövő közlekedésének meghatározó technológiai lehetnek, mivel tiszta és fenntartható energiaforrást kínálnak. A dolgozat célja a hidrogén alapú hajtáslánc működésének vizsgálata és szimulációs alapjainak megteremtése. Bemutatásra kerülnek a hidrogén előállítási lehetőségei, a legfontosabb tüzelőanyag-cella- és akkumulátortechnológiák, valamint egy Simulink modell, amely jelenleg az akkumulátoros motorhajtást és a regeneratív fékezést valósítja meg.

Kulcsszavak: hidrogén, tüzelőanyag-cella, akkumulátortechnológia, FCEV, regeneratív fékezés

1. HIDROGÉN ÉS TÜZELŐANYAG-CELLÁK

1.1. A hidrogén típusai – színekódolt osztályozás

A hidrogén különböző előállítási módjai alapján az iparban gyakran színekódokkal jelölik a hidrogén típusait, melyek nem a molekuláris szerkezetre, hanem az előállítás technológiájára és környezeti hatásaira utalnak.[8][9] Az egyes "színes" hidrogéntípusok a következők:

- Szürke hidrogén (Grey Hydrogen):

A legelterjedtebb típus, melyet földgázból állítanak elő gőzreformálás (steam reforming) segítségével. A folyamat során jelentős mennyiségű szén-dioxid keletkezik, amelyet nem hasznosítanak vagy tárolnak.

- Kék hidrogén (Blue Hydrogen):

Ugyanúgy földgázból készül gőzreformálással, mint a szürke hidrogén, de a keletkező CO₂-t megfogják és tárolják (CCS – Carbon Capture and Storage), így kisebb a környezeti terhelése.

- Zöld hidrogén (Green Hydrogen):

Megújuló energiaforrások (pl. szél- vagy napenergia) felhasználásával végzett elektrolízis útján állítják elő. Ez a legkörnyezetbarátabb forma, mivel a hidrogén előállítása során nincs CO₂-kibocsátás.

- Fekete hidrogén (Black Hydrogen):

Szénből nyerik ki gázosítással (gasification), ami jelentős CO₂- és más szennyezőanyag-kibocsátással jár. Ez az egyik legszennyezőbb előállítási mód.

- Rózsaszín hidrogén (Pink Hydrogen):

Elektrolízissel állítják elő, de az ehhez szükséges elektromos energiát atomerőműből származó nukleáris energia szolgáltatja. Karbonsemleges, de a nukleáris hulladék kezelése kérdéseket vet fel.

- Türkiz hidrogén (Turquoise Hydrogen):

Földgáz pirolízisével (magas hőmérsékletű hőbontás) állítják elő. A keletkező szén szilárd halmazállapotú, így könnyebb tárolni vagy újrahasznosítani, azonban a módszer még fejlesztési fázisban van.

- Sárga hidrogén (Yellow Hydrogen):

Napenergiával működő elektrolízis során keletkezik, tehát a zöld hidrogén egy alműfajának is tekinthető, amely kizárólag napenergiát használ

1.2. Tüzelőanyag cellák

A tüzelőanyag-cellák több szempontból is osztályozhatók, így például működési hőmérséklet, az alkalmazott elektrolit, szerkezeti kialakítás, valamint az üzemanyag típusa szerint. Két fő csoportot különböztetünk meg: alacsony hőmérsékleten működő cellákat, mint például a PEMFC és a DMFC, illetve magas hőmérsékletű cellákat, mint az MCFC és a SOFC.

Az alacsony hőmérsékletű cellák előnye a gyors indítási képesség és a gyors teljesítményváltozás, ezért járművekben különösen hasznosak. A magas hőmérsékletű cellák ezzel szemben jobb hatásfokkal és stabilabb működéssel rendelkeznek, így inkább telepített energiatermelő rendszerekben használatosak. [1]

A legismertebb cellatípusok:

- AFC (alkáli tüzelőanyag-cella):
Olcsó, de CO₂-re érzékeny, ezért csak speciális környezetben alkalmazzák.
- PEMFC (polimer-elektrolit membrános cella):
Gyors reakcióidejű, járművekben gyakran használt, de tiszta hidrogént igényel.
- DMFC (direkt metanol cella):
Metanollal működik, kisebb teljesítményű és specifikus célokra megfelelő.
- PAFC (foszforsavas cella):
Közepes hőmérsékleten működik, elsősorban telepített rendszerekhez alkalmazzák.
- MCFC (olvadékos karbonát cella):
Nagy hatásfokú, üzemanyag-független, erőművi alkalmazásra alkalmas.
- SOFC (szilárdoxid-cella):

Széles teljesítménytartományban működik, hosszú élettartamú, háztartási és ipari használatra is alkalmas.

A legelterjedtebb és legígéretesebb technológiák jelenleg a PEMFC és SOFC típusok. [5][6]

2. AKKUMLÁTORTECHNOLÓGIÁK

Az akkumulátorok alapvető szerepet játszanak az elektromos és hidrogénhajtású járművek működésében. Típusuk nagyban befolyásolja a jármű teljesítményét, élettartamát és biztonságát. Az alábbiakban a legelterjedtebb akkumulátorfajták kerülnek röviden bemutatásra. [1][3]

1. Lítium-ion (Li-ion):

Előnyei közé tartozik a magas energiasűrűség, gyors töltési lehetőség és hosszú élettartam. Hátrányai a túltöltés és a magas hőmérsékletre való érzékenység, valamint a magas ár. Pontos töltéskezelés szükséges.

2. Lítium-vas-foszfát (LFP):

Stabilabb és biztonságosabb, hosszabb ciklushosszúságot biztosít, viszont kisebb az energiasűrűsége. Kevésbé érzékeny a lemerülésre, gyorsan tölthető.

3. Ólom-sav:

Olcsó, de nehéz és alacsony energiasűrűséggel rendelkezik. Rövid élettartamú, a lassú töltés ajánlott.

4. Nikkel-fém-hidrid (NiMH):

Környezetbarátabb, mint a NiCd, közepes energiasűrűségű, viszont gyorsabban önkisül. Mérsékelt gyors töltést elvisel.

5. Nikkel-kadmium (NiCd):

Tartós és alacsony hőmérsékleten is működik, de a kadmium tartalom miatt környezetkárosító. A memóriaeffektus csökkentése érdekében gyakori mélykisütés szükséges.

6. Szilárdtest-akkumulátorok:

Még fejlesztés alatt állnak, de nagy jövő előtt állnak a biztonság és élettartam szempontjából. Drágák és technológiailag még kiforratlanok.

Jelenleg a Li-ion és LFP akkumulátorok a legelterjedtebbek, különösen az elektromos járművek és a fogyasztói elektronika területén.

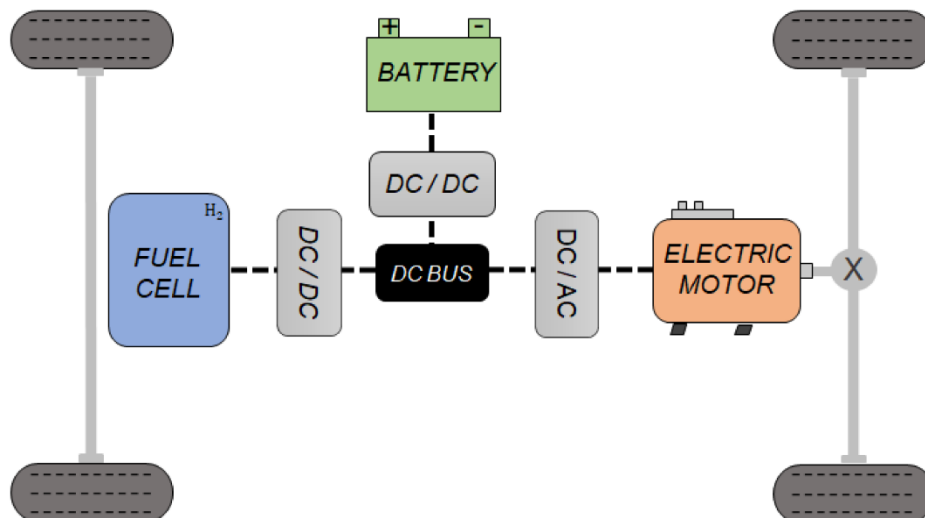
3. FCEV TECHNOLÓGIA ÉS ARCHITEKTÚRÁI

A hidrogéntekológiák alkalmazásai egyre nagyobb figyelmet kapnak, hiszen a megújuló energiaforrások terjedésével az energiatárolás kulcsfontosságúvá vált. A járműhajtások területén két fő irányvonalban jelenik meg a hidrogén szerepe: az egyik a belsőégésű motorok mintájára működő hidrogénüzemű motor, a másik pedig, amelyhez a fentebb tárgyalt témakörök is kapcsolódnak, a tüzelőanyag – cellás elektromos járművek (FCEV).

3.1 FCEV technológia ipari fejlesztései

A közlekedés szén-dioxid-kibocsátásának csökkentése napjaink egyik fő célja. A technológia úttörői közé tartozik a Toyota, amely a Mirai modellel az elsők között lépett a piacra sorozatgyártású FCEV-vel. A Hyundai szintén jelentős erőforrásokat fordít a terület fejlesztésére, különösen a NEXO modell révén, míg a Honda a Clarity Fuel Cell bemutatásával kapcsolódott be aktívan a kutatásba és fejlesztésbe. [7]

Ezek a fejlesztések különösen fontos szerepet kaphatnak a közúti áruszállítás jövőjében, hiszen a tüzelőanyag-cellás megoldások gyors tankolást és hosszú hatótávot kínálnak, ami nagy előnyt jelent a nehézjárművek számára. A hajtáslánc felépítésében hangsúlyos elem a regeneratív fékezés, amely a lassítás során keletkező mozgási energiát hasznosítja újra az akkumulátor töltésére. Az energiamenedzsment szempontjából a tüzelőanyag-cella is hozzájárulhat az akkumulátor töltéséhez, általában egy DC/DC konverter közbeiktatásával.

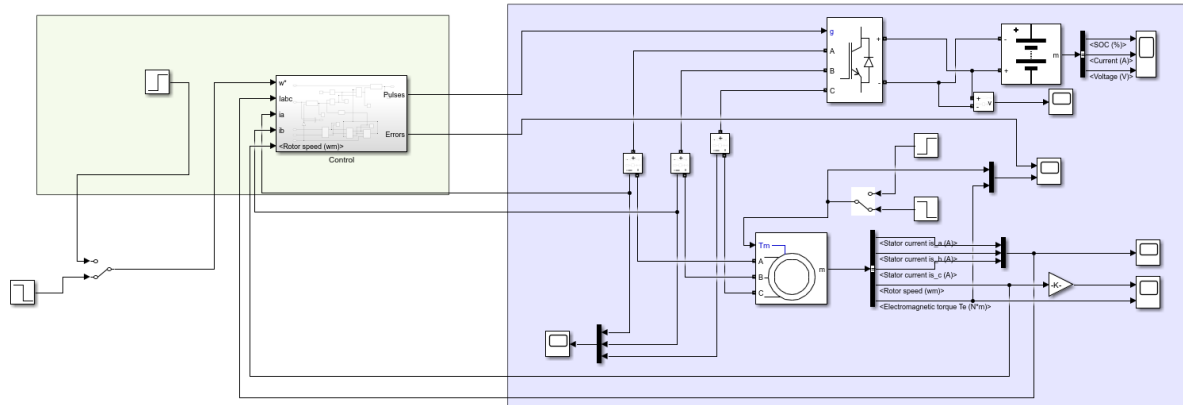


1. ábra. FCEV architektúra

A tüzelőanyag-cellás járműveket tekinthetjük úgy is, mint az akkumulátoros elektromos autók (BEV) egy sajátos változatát, ahol a hidrogén alapú energiatárolás biztosítja a nagyobb hatótávolságot. A különbség a két rendszer között főként az akkumulátor méretében rejlik: az FCEV esetében jóval kisebb kapacitásra van szükség, mivel az energiaellátás nagy részét a tüzelőanyag-cella veszi át. Az architektúra három fő egységre bontható, amelyeket egy közös egyenáramú sín kapcsol össze. Az első egység a hajtásrendszer a villamos motorral, amely leggyakrabban állandó mágneses szinkron gép, de bizonyos esetekben aszinkron motor is alkalmazható. A második egységet az akkumulátor és a hozzá tartozó töltőelektronika alkotja, míg a harmadik rész a tüzelőanyag-cella és a hidrogéntartály együttese. Ezek összehangolt működése biztosítja az energia folyamatos rendelkezésre állását a járműben.

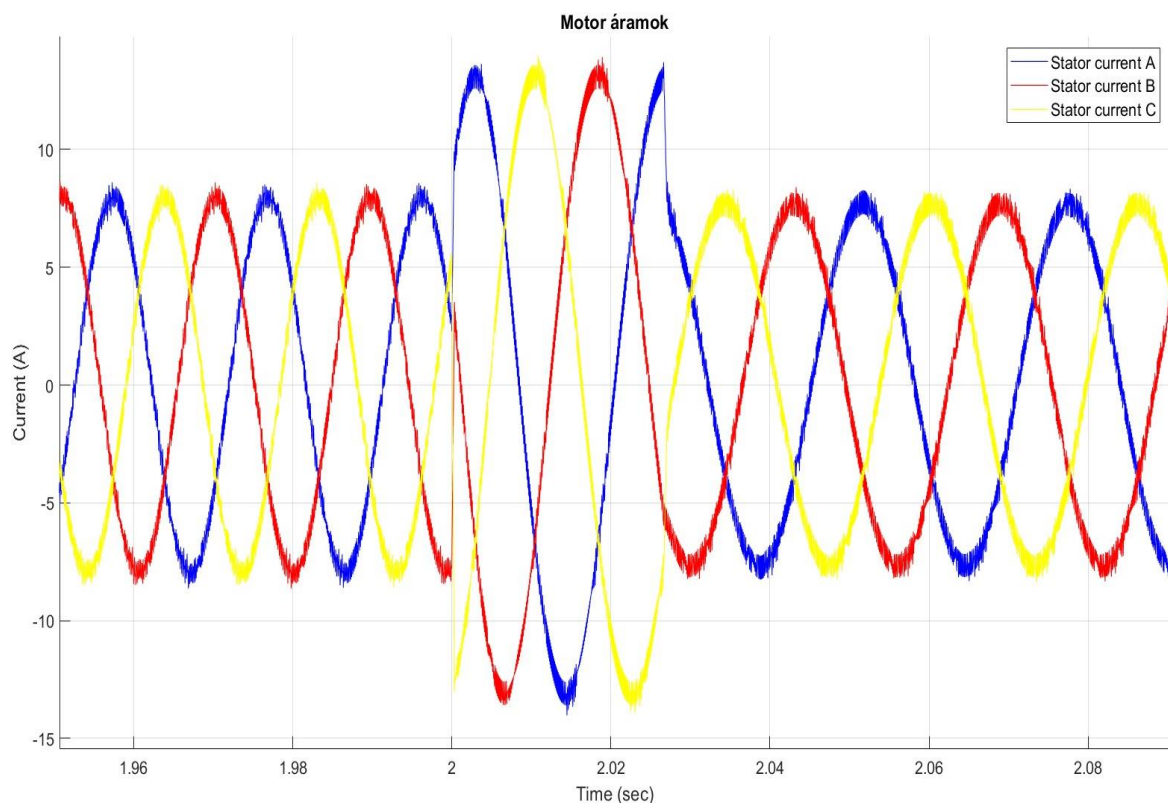
3.2 Aszinkron gép generátor üzem módja és regeneratív fékezés szimulációja

Az aszinkron motorokat a tüzelőanyag-cellás járművek hajtásláncában ritkán alkalmazzák, ugyanakkor az akkumulátoros elektromos járművekben – különösen többmotoros rendszereknél – előfordulhat a használatuk. Mivel a kalickás forgórészű aszinkron gép kefe mentes felépítésű, és nem igényel ritkaföldfém alapanyagokat, elméleti szempontból érdekes lehet a lehetőségeit FCEV rendszerekben is megvizsgálni. [3]



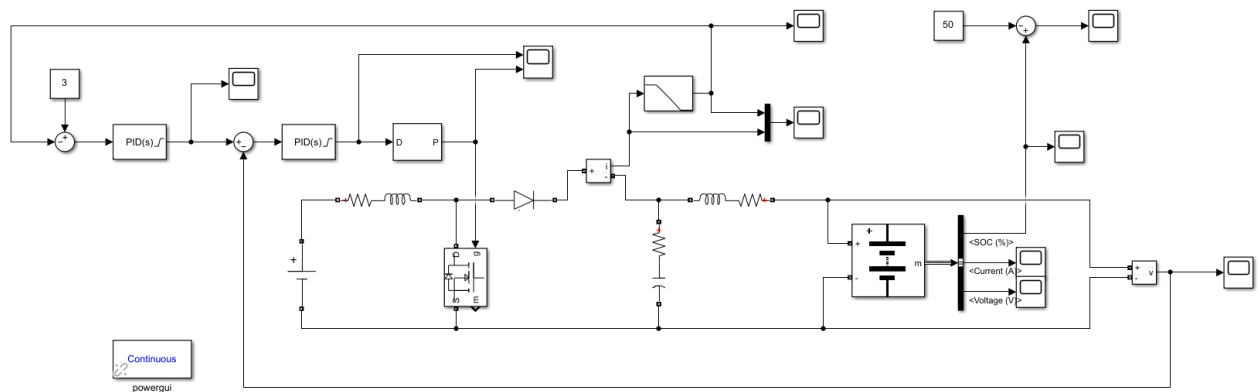
2. ábra. Aszinkron motor és hajtása

A szimuláció célja az aszinkron gép motor- és generátorüzemének vizsgálata volt, különös tekintettel a regeneratív fékezésre. A modell szemléletesen bemutatja, hogyan képes a gép negatív nyomatékkal villamos energiát termelni, amely az akkumulátorban tárolódik. A töltöttségi állapot változása jól nyomon követhető: motor üzemben csökken, generátor módban pedig növekszik. A vizsgálat során a fordulatszám és a nyomaték alakulása egyértelműen mutatja a két üzem közötti átmenetet, míg az áramok és feszültségek elemzése rávilágít a visszatáplálás dinamikájára. Az eredmények hasznos alapot adnak a regeneratív fékezés gyakorlati alkalmazásának és az energiamenedzsment szempontjainak értékeléséhez. [7]



2. ábra. Fázisváltás a motor áramokban

3.3 DC/DC Konverter tervezése az akkumulátor töltéséhez



2. ábra. Használt feszültség növelő DC-DC konverter

A DC/DC konverter alapvető szerepet játszik a tüzelőanyag-cellás járművekben, mivel a központi DC sínhez kapcsolódva szabályozza a feszültség szinteket és biztosítja az energia áramlását a fő egységek – a tüzelőanyag-cella, az akkumulátor és a villanymotor – között. A szimulációban egy boost típusú konverter került alkalmazásra, amely a bemeneti feszültséget az akkumulátor töltéséhez szükséges szintre emeli. A szabályozást kétlépcsős: egy külső szabályozó referenciaáramot ad, amelyet a belső kör feszültség szabályozója követ. Így az akkumulátor állandó árammal tölthető, ami egyszerre hatékony és kímélő megoldás. A zárt hurkú visszacsatolás biztosítja, hogy a rendszer folyamatosan alkalmazkodjon a forrás és az akkumulátor változó körülményeihez. [2][4][6][10]

ÖSSZEGZÉS

A jelenlegi modell fontos lépést jelent a hidrogén alapú hajtásláncok vizsgálatában, ugyanakkor a teljes rendszerhez még szükséges a tüzelőanyag-cella integrálása. Ennek megvalósításakor várhatóan újraméretezésre lesz szükség, hogy a szimuláció jobban közelítsen egy valós FCEV architektúrához. A jövőbeli munkák között szerepel a rendszer kipróbálása állandó mágneses szinkronmotorral (PMSM) is, amely összhangban van a jelenlegi iparági irányokkal. [7]

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sandu V., Chiru, A. *Automotive fuels*, Matrix Rom, Bukarest, 2007.
- [2] BENDAOUD, K., et al.: Design and simulation DC-DC power converters buck and boost for mobile applications using Matlab/Simulink. In: 2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [3] FERENCZ, J., KELEMEN, A., IMECS, M.: Control of an Electric Vehicle Hybrid Energy Storage System. *Papers on Technical Science*, 2021, 14, pp. 77–88.
- [4] KUMAR, S., et al.: Efficient DC–DC power converters for fuel-cell electric vehicle: A qualitative assessment. *IET Power Electronics*, 2024, 17(16), pp. 3166–3204.
- [5] MEBARKI, N., et al.: PEM fuel cell/battery storage system supplying electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(45), pp. 20993–21005.
- [6] PRIYA, R. P., et al.: Review of fuel cell power converter topologies for electric vehicles. In: IECON 2023 – 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [7] YAZDANI, A., SHAMEKHI, A. H., HOSSEINI, S. M.: Modeling, performance simulation and controller design for a hybrid fuel cell electric vehicle. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2015, 37, pp. 375–396.
- [8] Előállítás, elektrolízis. HFC Hungary. Elérve: <https://www.hfc-hungary.org/elektrolizis/> (Utolsó letöltés: 2025.09.18)
- [9] SCHERMANN, Sándor: Hidrogéngyártás: Milyen színű a hidrogén? Rolling Tons, 2023.03.28. Elérve: <https://rollingtons.hu/2023/03/28/milyen-szinu-a-hidrogen/> (Utolsó letöltés: 2025.09.18)
- [10] Boost Converter – MATLAB & Simulink. MathWorks. Elérve: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/boost-converter/> (Utolsó letöltés: 2025.09.18)