



Tüzelőanyag-elemmel hajtott kisautó

A korábban általunk is ismertetett tüzelőanyag-elemes kerékpár kifejlesztése után sem pihentek a tajvani Mingdao Egyetem kutatói, és továbbléptek egy hasonló meghajtású kisautó kidolgozásának irányába. A rendszer felépítése, részegységeinek működése. A 100 km-es próbaüzem tapasztalatai, fejlesztések a kerékpár megoldásaihoz képest.

Tárgyszavak: tüzelőanyag-elem; protoncserélő membrán; gépjármű.

A nagy autógyártók világszerte aktív fejlesztőmunkát folytatnak a jövő autóiába szerelhető tüzelőanyag-elemek és megfelelő járművek prototípusainak létrehozására. Ennek kapcsán a környezetszennyezés kiküszöbölése mellett az olajfüggőség csökkentése is vezérli a kutatókat, akik különösen a jövő hidrogénre támaszkodó energiagazdaságában is fontos szerepet játszó hidrogén tüzelőanyag-elemek alkalmazásában látnak nagy fantáziát. Ezen az úton indult el a tajvani Mingdao Egyetem szakértőgárdája is, amikor 2000-ben egy 300 W-os tüzelőanyag-elemes meghajtású elektromos kerékpárt („dongót”) szerkesztett, majd

a program második szakaszában megszületett a Mingdao kisautó is. A kerékpárról beszámoltunk tavaly novemberi számunkban (Tüzelőanyag-elemes kerékpár = Energiaellátás, energiatakarékosság világszerte, 2004. 11. sz. p. 47–55.), az utóbbi fejlesztőmunka eredményeiről ad számot ezen összeállítás.

Az elő-prototípusnak tekinthető MHV-ben (Mingdao hydrogen vehicle, Mingdao hidrogénes jármű) még nem törekedtek a tömeg, a méretek és a karosszéria formájának optimalizálására, arra viszont igen, hogy a felhasznált alkatrészeket és alrendszereket lehetőség sze-

rint a kereskedelem kínálatából válasszák ki. A kifejezetten helyi forgalomra szánt kiskocsi hajtására 5 kW-os, protoncserélő membránnal működő tüzelőanyag-elemes rendszert alakítottak ki és építettek be az autóba. Ezután a kocsi egy sor próbapados és menet közben végrehajtott teszten, majd megfelelő módosításokon esett át, és számos népszerűsítő bemutató főszereplője is volt. A fejlesztés végső célja gyártható tüzelőanyag-elemes technológia létrehozása, és annak hasznosítása a közlekedésben, illetve a villamosenergia-termelésben.

A tüzelőanyag-elemes rendszer felépítése

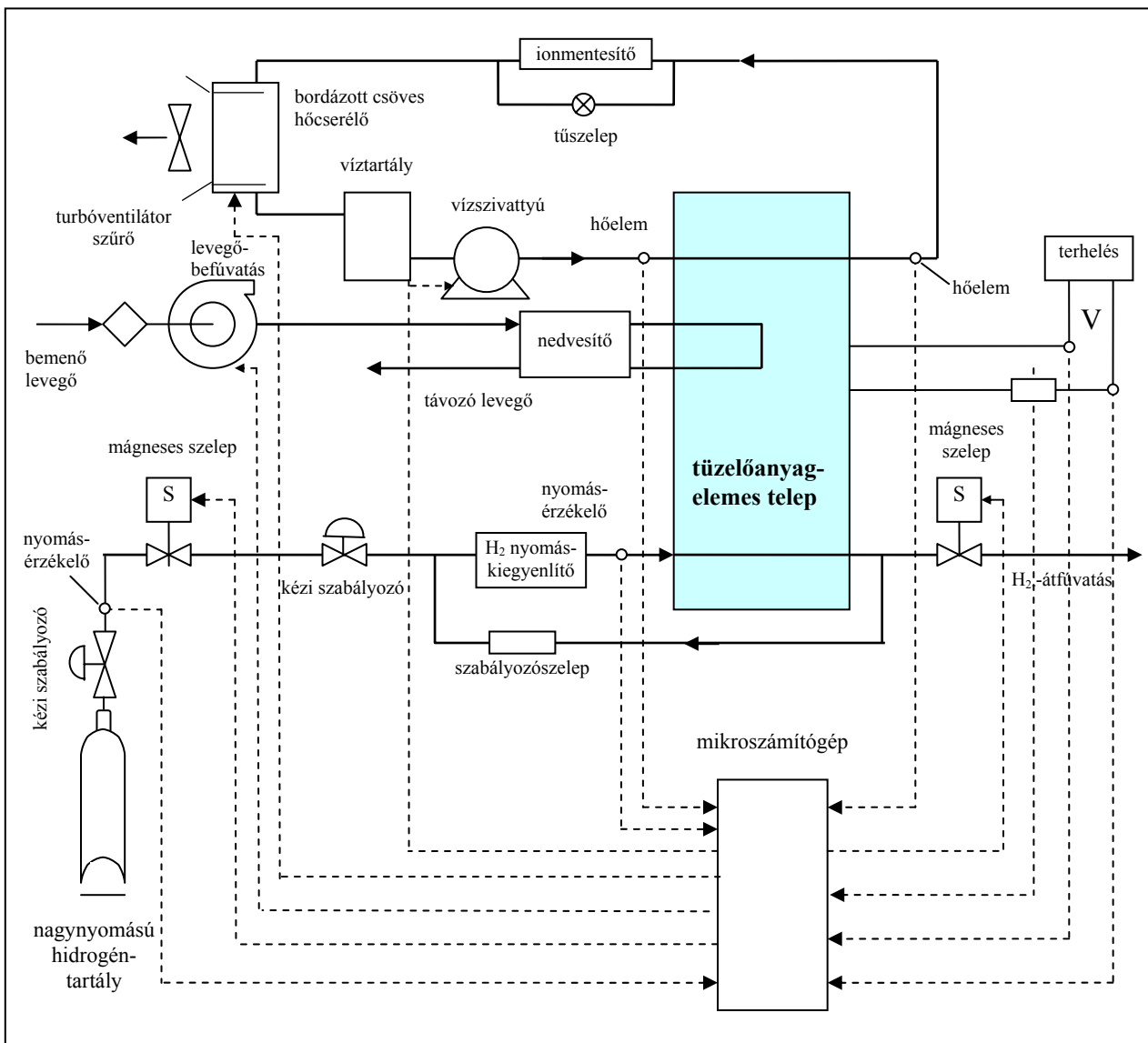
A jármű „lelkét” képező tüzelőanyag-elemes rendszer működéséhez számos kiegészítő részegységre van szükség, ezért a rendszer sikeres integrálása számottevő mértékben függ az egyes alkatrészek minőségétől. A jelenlegi rendszer felépítését szemléltető *1. ábrán* látható, hogy nagynyomású hidrogéntartály, ventilátor, nedvesítő készülék, mágneses szelepek, nyomásszabályozók, érzékelők (hőmérséklet, nyomás, feszültség és áramerősség), hűtőradiátor, valamint számos cső és kötőelem tartozik hozzá. A tüzelőanyag-elemes konstrukció négy, egymáshoz illeszkedő alrendszerre bontható: hidrogénadagolás, levegőbefúvatás, hűtés és mikrovezérlő. Az

alrendszereket a tüzelőanyag-elemes rendszernek az *1. táblázatban* látható paramétereiből kiindulva tervezték, illetve méretezték.

1. táblázat
A tüzelőanyag-elemes telep paramétere

Specifikáció	
a cellák száma	70
névleges teljesítmény (0,7 V cellafeszültségnél)	3,2 kW
névleges feszültség	48 V
névleges áramerősség	68 A
csúcsteljesítmény (0,6 V cellafeszültségnél)	5,0 kW
aktív terület	150 cm ²
Működési feltételek	
anód (tiszta H ₂)	
nyomás	40 kPa
hőmérséklet	70 °C
relatív páratartalom	100%
katód (levegő)	
nyomás	40 kPa
hőmérséklet	70 °C
relatív páratartalom	100%
sztoichiometrikus arány	2,5

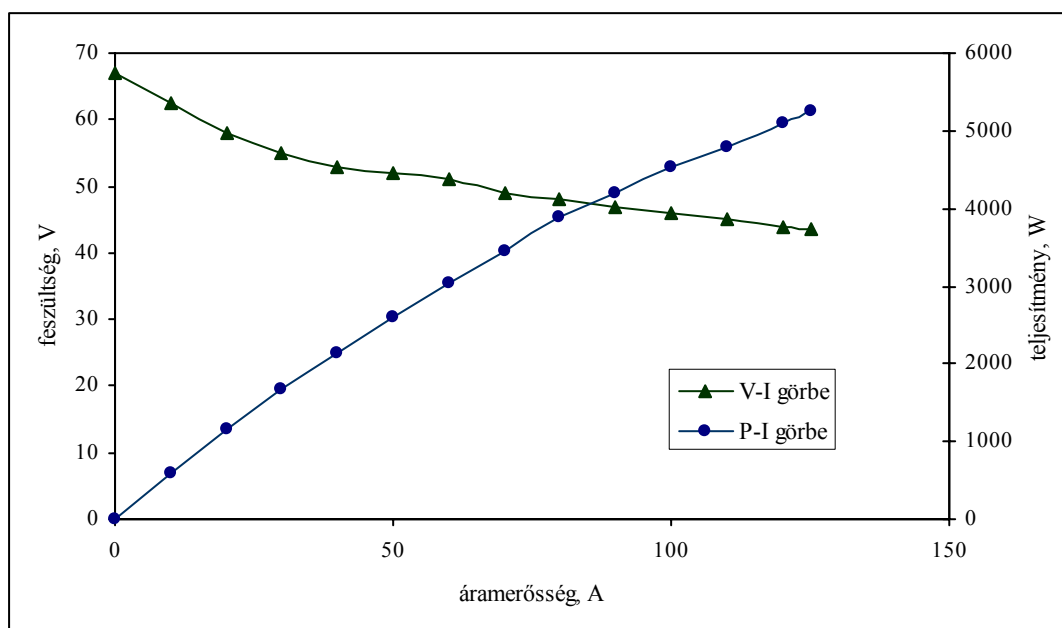
A tajvani kutatók megállapították, hogy a légellátó rendszer, a vízűtés és a hidrogénkezelés minden egyes alkatrészét rozsdamentes acélból, titánból vagy speciális gumból/teflonból kell elkészíteni – ellenkező esetben a cellák elszennyeződhetnek. E követelmény kielégítése gondos válogatást, saját előállítás, vagy laboratóriumi felszerelést gyártó cégektől eszközölt beszerzést igényelt. Az Asia-Pacific Fuel Cell Ltd. cégtől beszerzett *tüzelőanyag-elemes telep* 70 cellájának aktív területe 150 cm², névleges kapacitása 3,2 kW (0,7 voltnál), csúcsteljesítménye pedig 5,0 kW (0,6 voltnál). A telep *2. ábrán* látható



1. ábra A tüzelőanyag-elemes rendszer vázlata

polarizációs görbéjét a kereskedelemben kapható, optimális vizsgálati feltételeket (hőmérsékletet, nyomást, páratartalmat stb.) nyújtó standard próbapadon vették fel. Ebből azonban nem következik, hogy a telep a jármű üzemeltetésének reális feltételei között is követni fogja ezt a jelleggörbét, mivel a forgalomban kialakuló feltételek korántsem ideálisak.

A tüzelőanyag-elemes telep az elektromos hajtás mellett táplálja a vízszivattyút és az összes többi villamos egységet is. Mivel a hajtómotor üzemi feszültsége széles tartományban (38–56 V) változtatható, energiaellátását közvetlenül a telep dinamikusan változó feszültségével oldották meg. A többi részegység számára szükséges állandó feszültségű táplálást feszültség szabályozók szolgáltatják.

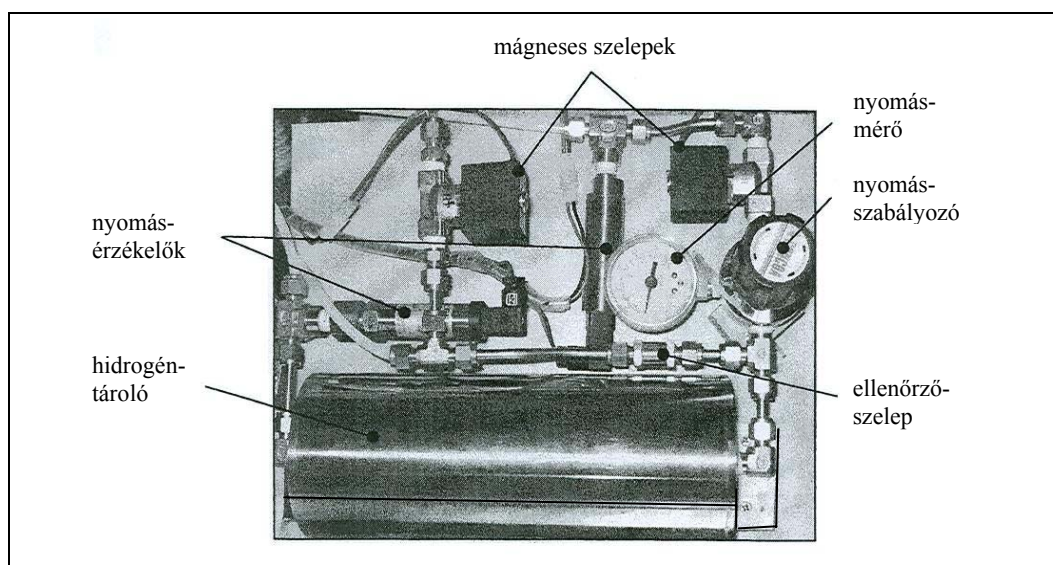


2. ábra A protoncserélő membrános tüzelőanyag-elemes telep polarizációs görbéje

A hidrogénellátó alrendszer

A tüzelőanyag-elemek tiszta hidrogént (99,99%) használnak fel a villamos energia előállítására. A gáz halmazállapotú hidrogént egy palackban, mérsékelt nyomás alatt (20 MPa) tárolják. Az egyszerű megoldás azonban fejlett technológiát takar. Mielőtt a hidrogén a tüzelőanyag-elemes telepbe jut, nyomását egy kézi működtetésű szabályozóval tovább csökkentik, így adagolása kiegészítő energiaforrást nem igényel. Mint a 3. ábrán is látható, a hidrogén a nagynyomású palackból az üzemanyag-kezelő alrendszeren keresztül a tüzelőanyag-elemes telephez jut, majd annak anódjától vagy újra a bemenetre, vagy pedig a levegőbe kerül. A körülbelül 40 kPa-os rendszernyomást egy nyomásszabályozó állítja be. Ezt az előzetesen beállított nyomást a központi

mikroszámítógép szabályozza utólagos beavatkozásra lehetőséget adó érzékelők segítségével a rendszer többi elemeiben is. Ha az elektrokémiai reakció következtében a nyomás az előre beállított érték (20 kPa) alá csökken, a H₂ nyomáskiegyenlítő elé kapcsolt, normál állapotban zárt mágneses szelep kinyílik. Az anód kimeneténél az üzemanyag-kezelő rendszerbe egy passzív hidrogén-visszakeringető szelepet szereltek be a telep gázkivezetése és a H₂ nyomáskiegyenlítő tartály közé. A hidrogén visszaáramoltatására az üzemanyag-felhasználás és a rendszer hatásfokának maximális szinten tartása érdekében van okvetlenül szükség. Mint az 1. és a 3. ábrán is látható, az anód gázvisszakeringető körét még egy mágneses szeleppel látták el, hogy a telep feszültségének meghatározott szint (pl. 44 V) alá csökkenése esetén kiöblítse az anódon felszabaduló gázt.



3. ábra Az üzemanyagrendszer

A levegőellátó alrendszer

A tüzelőanyag-elemes telep számára oxidálószerként szükséges tiszta (80%-nál nagyobb relatív páratartalmú) levegőt egy motoros kompresszor nyomja a port és az olajat felfogó egyedi tervezésű szűrőn keresztül a reakcióterbe. Az oxidálószer szolgáltató alrendszert úgy tervezték, hogy a kompresszor változtatni tudja a levegő áramlási sebességét az elektrokémiai reakció terhelés miatt változó igényeinek megfelelően. Kis teljesítményfogyasztásnál a levegő áramlási sebessége állandó, és megfelel az elektrokémiai reakció fenntartásához szükséges alacsony szintnek. Ha viszont a teljesítményfelvétel megnő, az alrendszer növeli a levegő áramlási sebességét is, hogy a kompresszor motorjának gyorsításával biztosíthassa a katódnál nagyobb mennyiségben (a

gyártó által ajánlott 2,5-ös sztöchiometrikus arányban) szükséges oxidálószer. Amikor a rendszert indítják vagy leállítják, a kompresszor rövid ideig teljes teljesítménnyel üzemel, hogy eltávolítsa a katódnál összegyűlt vízpárát és/vagy semleges gázt. A kompresszor motorját impulzusszélesség-modulációs (PWM) inverter táplálja.

A vázolt algoritmusú szabályozás feltételei mellett a szükséges oxidálószer mindig 2,5-nél nagyobb sztöchiometrikus arányban van jelen a katódnál, amire a megfelelő mennyiségű oxigén biztosítása mellett a reakciótermék (víz) hatékony eltávolítása miatt is szükség van. A levegő megfelelő nedvességtartalmának fenntartása egyébként kritikus a protoncserélő membránnal működő tüzelőanyag-elemes telepek üzemeltetése szempontjából. A

kialakított rendszerben a katód bemenetére kerülő oxidálószer nedvesítését egy entalpiakerék rendszerű készülékkel oldották meg. Mint az 1. ábrán látható, a telep katódjáról a meleg és párás levegő a nedvesítőbe kerül, ahol egy forgó dob a vízpárát elnyeli és a vizet a bemeneti hideg és száraz levegőhöz továbbítja. A dob felületére felvitt szárítószer csak a vízpárát tudja felvenni, ezért az elhasznált gázok kilépnek a nedvesítőből. Mivel ezzel a megoldással a vízpára soha nem csapódik ki, újra gőzzé alakítása nem igényel többlet-energiát.

A hűtő alrendszer

A tüzelőanyag-elemes telep vízhűtésű, a hűtő alrendszerhez vízszivattyú, ionmentesítő, víztartály, két hőelem, egy ventilátor és egy bordázott csöves hőcserélő tartozik. A lehűtött vizet a tartályból szivattyú juttatja vissza a tüzelőanyag-elemes telephez. A bordázott csöves hőcserélő 316 darab rozsdamentes cső és rézből készült bordák összehegesztésével készült, a közönséges ventilátor fűvató üzemmódban működik. A telep ki- és bemeneténél elhelyezett hőelemek a telep hőmérsékletének emelkedését regisztrálják, és meghatározzák a radiátor révén eltávolított hőenergia mennyiségét. A ventilátort egyébként a mikroszámítógép akkor is működésbe hozza, ha az elekt-

rokémiai reakció miatt a hűtővíz hőmérséklete meghaladja a 45 °C-ot. Ha a kimeneten a víz-hőmérséklet 40 °C alá csökken, a ventilátor leáll. Amikor az tüzelőanyag-elemes rendszert újraindítják vagy leállítják, a ventilátor és a vízszivattyú azonnal (mintegy 20 másodperc-re) bekapcsol.

A mikroszámítógép

A tüzelőanyag-elem működésének irányításához fejlett mikrovezérlő és megfelelő algoritmus szükséges, amely utóbbi képes az tüzelőanyag-elem biztonságos indítására bármilyen üzemmódban, működésének nyomon követésére és leállítására. A jelenleg alkalmazott megoldásban a rendszer kulcseleme egy Intel 8051-es mikroprocesszor, amely képes a beérkező hőmérséklet, áramerősség, hőmérséklet és nyomás adatok megfelelő értelmezésére, nemkülönben a külső részek (kompresszor, mágnesszelep, vízszivattyú és ventilátor) vezérlésére is. A rendszer állapotát leíró információkat a mikroszámítógéppel összekötött, a műszerfalon elhelyezett folyadékkristályos kijelző jeleníti meg. Az imént említett jellemzőkön túl a mikrovezérlő a telep minden egyes cellájának feszültségét egy 70-csatornás analóg multiplexeren keresztül kíséri figyelemmel, hogy az egyes helyi meghibásodásokat időben lehessen észlelni. A mikroszámító-

gépet a tüzelőanyag-elemes telep viszonylag nagy feszültségű kimenetétől speciálisan tervezett analóg elválasztó erősítő áramkörök szigetelik el. Üzemzavar vagy lekapcsolás esetén a mikroszámítógép rögzíti az aktuális paramétereket, amelyek leolvashatóak a kijelzőről, vagy letölthetők a beépített RS232-es szabványú kommunikációs porton keresztül személyi számítógépre is.

A karosszéria és az erőátvitel

Karosszériaként egy kereskedelemben kapható akkumulátoros elektromos autót használtak, alapjában megtartva annak szerkezeti felépítését, nemkülönben világítási, fék- és kormányrendszerét is. A meghajtást viszont egy folyamatosan változtatható konstrukcióval cserélték fel, a 4 kW/48V-os egyenáramú villanymotort közvetlenül a meghajtó áttételre telepítették. A motor a meghajtott tengelyre rugalmas tengelykapcsolón keresztül csatlakozik. A készen kapható sebességváltó teljesen szinkronizált, változtatható forgási sebességű csatlakozó tengelyét az áttételi arányt kiválasztó egységgel és a differenciálművel együtt egy fröccsöntött alumínium házban helyezték el. A sebességváltási és a szabályozási feladatokat külön motorszabályzó egység látja el, a + 10 V és - 10 V közötti analóg bemenő feszültséggel előre- és hátramenetben egyaránt lehet szabá-

lyozni a motort, ezért tolató áttételre nincs szükség. A szabályzó mind a kapocsfeszültséget, mind a gerjesztőfeszültséget szolgáltatja az egyenáramú motor számára. A motor percnként 2800-as fordulatszámom 23 Nm forgatónyomaték leadására képes, maximális sebessége percnként 4000 fordulat, legmagasabb működési hatásfoka pedig 96%. A motor elektronikus kommutációjához szükséges időzítési információt egy a Hall-effektust hasznosító érzékelő szolgáltatja. A motorszabályzó a motor túlmelegedését észlelve automatikusan korlátozza az áramerősséget. A karosszéria, a sebességváltó és a tüzelőanyag-elemes rendszer együttes tömege (vagyis a jármű önsúlya) körülbelül 800 kg.

Eredmények, értékelés

A tüzelőanyag-elemes rendszer hatásfokát a telep áramtermelési hatékonysága mellett a hajtás teljesítmény-átalakításának hatásfoka és a belső fogyasztók (részegységek) fogyasztása határozza meg. A 2. táblázatban a tüzelőanyag-elemes telep által kiszolgált részegységek külső szállítók által megadott villamos jellemzői szerepelnek. A kutatók azonban mégsem az általuk képviselt terhelés stb. összegzésének útját követték, mivel igen nehéz lenne minden egyes villamos fogyasztó esetében meghatározni a teljesítmény-átalakítás és

A tüzelőanyag-elemes áramellátó rendszer által táplált részegységek tipikus teljesítményfelvétele vagy átalakítási hatásfoka

Részegységek	Mennyiség	Villamos specifikáció*	Maximális teljesítményfelvétel	Átalakítási hatásfok (%)
I. motor	1	48 V/9,5 A	4 kW	–
II. motor	1	12 V/0,8 A	10 W	–
Kompresszor	1	24 V/10 A	250 W	–
Mágneses szelepek	2	12 V/0,12 A	2,8 W	–
Hűtőventilátorok	1	12 V/0,15 A	7,2 W	–
Vízszivattyú	1	24 V/0,8 A	20 W	–
Mikroszámítógép	1	12 V/2A	24 W	–
I. konverter	1	48–24 V egyenáram	–	90
II. konverter	1	48–12 V egyenáram	–	90

* A gyártók adatai

a fogyasztás hatásfokát. A teljesítményhez igazodóan üzemelő kompresszor esetében például nehéz lenne megállapítani a ténylegesen felhasznált teljesítményt, mivel az a motor sebességétől függően ingadozik. Ebből kiindulva a rendszer hatásfokának becslésére a tüzelőanyag-elemes telep által a hajtómotorra átadott nettó villamos teljesítmény és a felhasznált hidrogén entalpiájának hányadosát tekintették, az alábbiak szerint:

$$\varepsilon = \frac{I \times U}{\dot{n} \times \Delta h}$$

A fenti képlet számlálójában a jármű hajtásához leadott, közvetlenül mért nettó villamos teljesítmény a motoron mért feszültség és áramerősség szorzataként szerepel. A nevezőben szereplő \dot{n} , a teszt ideje alatt (Δt) a hidrogént tartalmazó palacktól a tüzelőanyag-

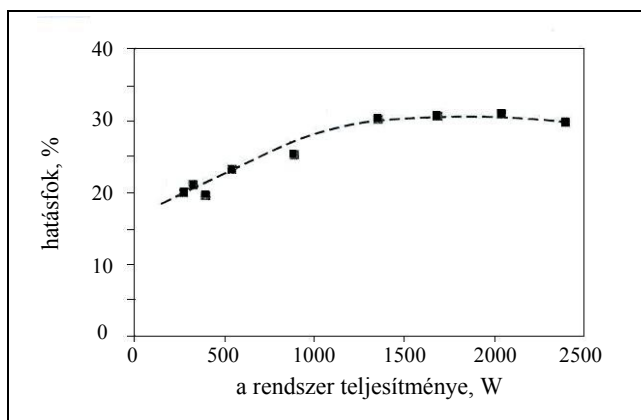
elemekhez áramló gáz mólbán kifejezett mennyise:

$$\dot{n} = \frac{1}{RT} \frac{P_{\text{induló}} - P_{\text{záró}}}{\Delta t},$$

ahol $P_{\text{induló}}$ és $P_{\text{záró}}$ a hidrogén nyomása a palackban a teszt indításakor, illetve végén.

A 4. ábrán a tüzelőanyag-elemes rendszer hatásfoka szerepel a telep által leadott bruttó teljesítmény függvényében. A rendszer hatásfokára vonatkozó adatok állandó terhelés mellett születtek, ami jó feltételeket teremt az tüzelőanyag-elem különböző teljesítmények melletti működésének ellenőrzéséhez. Megállapítható, hogy az általános, más kutatók által is kimutatott trendnek megfelelően a hatásfok a bruttó kimeneti teljesítmény emelkedésével nő. Utazósebességen a rend-

szer hatásfoka elérheti a 30%-ot, ami meghaladja a belsőégésű motorok hatásfokát. Ennek ellenére az első laboratóriumi próbálkozásnak tekinthető konstrukción még bőven van javítani való.



4. ábra A tüzelőanyag-elemes hajtású villamos autó rendszerhatásfoka

Miután az tüzelőanyag-elemes telepet a járműbe szerelték, és elvégezték a szükséges módosításokat, a rendszert a Mingdao egyetemi negyedének 1,6 kilométeres próbapályáján, valamint több bemutató során menet közben is tesztelték (5. ábra). A jármű sebességét 18 km/h körül tartották, megállapítva, hogy az egyórás teszt alatt megbízhatóan működött a rendszer, ami arra enged következtetni, hogy a működés stabilitása és megbízhatósága megfelelő. A kísérleti jármű adatait a 3. táblázat tartalmazza. A tesztek és bemutatók során a kísérleti autó mintegy 100 kilométert futott különböző problémák nélkül.



5. ábra Bemutató próbaúton (a Taiwan Times riportjából, az egyik utas Taiwan elnöke)

Ami az üzembiztonságot és a megbízhatóságot illeti, erre hidrogén hajtású járművek esetében különös hangsúlyt kell fektetni. Az MHV összeszerelése és tesztelése során baleset, veszélyes vagy potenciálisan veszélyes helyzet nem merült fel. Minden egyes próbaüzem előtt rendszeres szivárgás-ellenőrzést végeztek az egész hidrogénkörben – például a csöveknél, a kötőelemeknél, a szelepeknél és a tüzelőanyag-elemes telepnél. Amennyiben valamilyen paraméter eltér az előre megadott sávtól, a mikrovezérlő automatikusan leállítja a rendszert. A tesztek során volt néhány ilyen hirtelen leállítás, ami a hajtó villanymotor túlmelegedése, valamint a tüzelőanyag-elemes telep feszültségének csökkenése vagy a hidrogén fogyása miatt következett be.

A kísérleti jármű jellemzői

Jármű	méretek, h/sz/m tömeg maximális terhelés	3120/1350/2030 mm 800 kg 400 kg
Általános jellemzők	átlagos utazósebesség az ehhez szükséges elektromos teljesítmény maximális sebesség indítás/leállítás időtartama kibocsátás zaj üzembiztonság	18 km/h 2 kW 40 km/h 10/20 s tiszta H ₂ O 80 dB 1 m távolságban baleset és veszélyes helyzetek nélkül
Hajtás	típus	farmotor és hátsókerék-hajtás
Hajtómotor	típus maximális teljesítmény maximális nyomaték	48 V-os egyenfeszültség, állandó mágneses, szinkron 4,0 kW 23 kgm/2800 rpm
Erőátvitel	áttételi arány kerekek távolsága egyéb	1:22 950 mm a dobfeket is tartalmazza
Tüzelőanyag-elem	típus névleges teljesítmény/feszültség	protoncserélő membránnal (PEM) 3,2 kW/0,7 V cellafeszültség
Hidrogéntároló	típus méretek, átmérő/magasság a tárolható hidrogén mennyisége	nagynyomású hidrogén palackok 150/670 mm 1400 liter

Egészében a Mingdao Egyetem tüzelőanyag-elemes járműfejlesztési programja sikeresnek minősíthető. A prototípus tervezése és tesztelése során szerzett információ és tapasztalat elő fogja segíteni a tüzelőanyag-elemes technológia további tanulmányozását. A most kapott eredményeket a program I. fázisában (a kerékpár fejlesztésével) szerzett információval egybevetve, több javítás, továbbfejlesztés történt:

- a levegőt szolgáltató rendszerben alkalmazott katódnedvesítés (ami a kisteljesítményű kerékpárhajtás esetében még nem került szóba) sikeresnek bizonyult;

- a most kialakított hidrogén-visszakeringtetéses rendszer javítja az üzemanyag-hasznosítás hatásfokát;
- a jelenlegi 5 kW-os tüzelőanyag-elemes telepnél vízhűtést alkalmaztak, míg a kerékpár esetén még csak léghűtés volt;
- a kerékpárnál korábban alkalmazott két, állandó sebességgel üzemelő szivattyú helyett az oxidálószer (levegő) adagolásánál már a teljesítményhez igazodó, folyamatosan szabályozott megoldást alkalmaztak.

A fejlesztés következő szakaszában olyan hibrid rendszert alakítanak ki, amelyben akkumulátorok is helyet kapnak a járműben. Ezzel nő a teljesítmény és lehetőség nyílik a fékezési energia visszanyerése révén a hatásfok további javítására is.

Összeállította: Dr. Balog Károly

Irodalom

- [1] Hwang, J. J.; Wang, D. Y.; Shih, N. C.: Development of a lightweight fuel cell vehicle. = Journal of Power Sources, 141. k. 1. sz. 2005. febr. p. 108–115.
- [2] Hwang, J. J.; Wang, D. Y. stb.: Development of fuel-cell-powered bicycle. = Journal of Power Sources, 133. k. 2. sz. 2004. jún. p. 223–228.

Röviden...

Előrelépés a tüzelőanyag-elemek fejlesztésében

Környezetbarát áramtermelésük és a tüzelőanyaggal kapcsolatos rugalmasságuk miatt a szilárd oxidos tüzelőanyag-elemek (SOFC, solid-oxide fuel cell) vonzó megoldást kínálnak. Kevésbé kellemes viszont az a tulajdonságuk, hogy magas hőmérsékleten üzemelnek, a 800–1000 °C-os hőmérséklet nagy kihívást jelent a szerkezeti anyagok számára, és ez magas költségeket okoz. A kutatók szeretnék ezt a hőmérsékletet legfőleg 500 °C-ra csökkenteni, de ekkor a hagyományosan az oxigén elektrokémiai oxidálására katódként alkalmazott anyagok romló mutatói okoznak nehézségeket. Ennek kiküszöbölésére vállalkoztak most a Caltech (Kaliforniai Műszaki Egyetem, Pasadena) kutatói, akik egy perovszkit nevű anyagból – amely bárium, stroncium, kobalt és vas oxidjaiból áll – készítettek alacsonyabb hőmérsékleten is használható katódot. A BSCF rövidítésével is emlegetett anyag nedvesített hidrogén tüzelőanyag és levegő mint katódgáz esetén magas áramsűrűséget tesz lehetővé a cellában, ami annak köszönhető, hogy az oxigén ezen az anyagon át igen gyorsan diffundál.

Egy BCSF vékonyréteggel bevont cérium-oxid katódú tüzelőanyag-elem 600 °C-on 1010 mW/cm² teljesítménysűrűséget tesz lehetővé, 500 °C-on pedig 402 mW/cm²-t, ami több mint kétszerese a stroncium-ón-kobalt-oxid vékonyréteggel bevont cérium-oxid katóddal elérhető teljesítménynek. Kétkamrás cellakonfigurációnál a tüzelőanyag-elem teljes belső ellenállásának mintegy 74%-a a 20 µm vastag elektrolitnak tulajdonítható. Amennyiben sikerülne az elektrolit anyagának összetételét és szintetizálásának módját optimális feltételek mellett megoldani, vagy pedig 10 µm-ra csökkenteni az elektrolit vastagságát, úgy az elérhető teljesítmény 500 °C-on is 600 mW/cm² lehetne. További javulás lesz elérhető a katód szerkezetének megfelelő kialakításával, aminek az a célja, hogy az oxigén a lehető legnagyobb felületen tudjon reakcióba lépni. Mindenesre a kísérletek biztatóak, a további kutatások jó eredményekkel kecsegtetnek a gyakorlati felhasználás számára is.

(Inside R and D, 33. k. 37. sz. 2004. szept. 15.)