

FCGEN - razvoj in izvedba sistema vodenja za pomožni agregat z gorivnimi celicami na dizelsko gorivo

Boštjan Pregelj, Gregor Dolanc, Janko Petrovčič
Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana
bostjan.pregelj@ijs.si, gregor.dolanc@ijs.si, janko.petrovcic@ijs.si

FCGEN – development of diesel-powered fuel-cell based auxiliary power unit.

For truck applications the increasing demand for electrical power when the vehicle stands still has led to an increasing need for an onboard electric power generator which operates with high efficiency and very low emissions. A fuel cell based auxiliary power unit (APU), with a diesel fuel processor is regarded as one of the most interesting options since it combines high efficiency, low emissions and the use of the same fuel as the main engine. The overall objectives of FCGEN are to develop and demonstrate a proof-of-concept complete fuel cell auxiliary power unit in a real application, possibly onboard a truck. The APU system consists of a low-temperature PEM fuel cell, a complex diesel fuel processor and necessary balance of plant components designed to meet automotive requirements regarding e.g. size, mechanical tolerances, durability etc. The task of JSI group, presented in this paper, comprise both hardware and software work, which due to complex system and numerous and versatile inputs and outputs represented ad very interesting challenge. The software part represents development of the control system for the entire APU, while the hardware part is twofold: first the power converter and second the electronic control unit for the APU.

Kratek pregled prispevka

Na tovornjakih, zlasti v ZDA, pa tudi po Evropi narašča povpraševanje po električni energiji v času, ko vozilo miruje. To je pripeljalo do večje potrebe po pomožnih generatorjih električne energije, ki bi delovali z visokim izkoristkom in zelo nizkimi emisijami. Pomožni agregati, ki temeljijo na gorivnih celicah s procesorjem dizelskega goriva, zato štejejo kot ena od bolj zanimivih možnosti, saj združujejo visoko učinkovitost, čiste izpuste in uporabljajo enako (dizelsko) gorivo kot glavni motor. Glavni cilji projekta FCGEN so razviti in izdelati prototip celotnega pomožnega agregata z omenjeno tehnologijo in ga prikazati njegovo delovanje. Sistem sestoji iz nizkotemperaturne PEM gorivne celice, procesorja dizelskega goriva in podpornih komponent (BoP) in je zasnovan tako, da v veliki meri že izpolnjuje zahteve avtomobilskih standardov. Naloga skupine IJS vključuje razvoj in izdelavo strojne in programske opreme, ki zaradi zapletenega sistema ter številnih in raznolikih vhodov in izhodov predstavlja velik izziv. Programska oprema obsega nadzorno-regulacijski sistem za celotni agregat, medtem ko se strojna oprema deli na dva dela: močnostni pretvornik, ter namenski krmilnik za agregat z vgrajenimi vhodno/izhodnimi moduli.

1 Uvod

Gorivne celice s protonsko prevodno membrano [1], [2] se kot čist in učinkovit vir električne energije z visoko energijsko gostoto, nizkimi obratovalnimi temperaturami in tihim obratovanjem pojavljajo kot možen konkurent danes uporabljanim sredstvom. Dandanes tehnologije gorivnih celic v nekaterih primerih že konkurirajo drugim tehnologijam na trgu tako pri stacionarnih kot mobilnih aplikacijah. V želji po množičnejši zastopanosti in konkurenčnosti pa je potrebno znižati ceno ter še izboljšati zanesljivost in trajnost delovanja. Zato je naloga proizvajalca celotnih sistemov pravilna izbira podpornih komponent, dobra uglasitev sistema vodenja [3], [4] ter uporaba diagnostičnih pristopov [5] za doseganje najboljše izkoriščenosti vseh komponent in doseganja optimalnega delovanja sistema kot celote.

Namen projekta FCGEN [6] je bil razviti, zgraditi in prikazati delovanje agregata z gorivnimi celicami na dizelsko gorivo, ki bi ga uporabljali na tovornjakih kot pomožni vir električne energije v času mirovanja. Bistveno pri tem je da bi deloval na enako gorivo, uporabljal že obstoječi akumulator, imel mnogo višjo učinkovitost, čistejše izpuste ter bi zagotavljal tiho delovanje. Oblikovan je tako, da bi bil lahko umeščen na mesto enega od rezervoarjev za gorivo.

Kot izhodišče so uporabljeni reaktorji (Raziskovalni institut Jülich, institut za mikrotehniko Mainz) in katalizatorji (Johnson-Matthey) zadnjih tehnologij [7], ter v projektu še nekoliko izboljšani, v celoti pa so razviti močnostni DC/DC pretvornik, krmilnik, ter sistem vodenja, kar je naloga naše skupine. Integracija celotnega sistema skupaj z gorivno celico [8] je naloga partnerja PowerCell, laboratorijski končni preizkus bo izveden na Institutu Jožef Stefan. Trenutno je projekt v fazi testiranja procesorja goriva (Volvo Technology, IJS) in integracije modula z gorivno celico.

V nadaljevanju prispevka so kratko predstavljeni gradniki celotnega sistema ter bolj podrobno sistem vodenja, njegove funkcije in delovanje.

2 Agregat z gorivnimi celicami na dizelsko gorivo

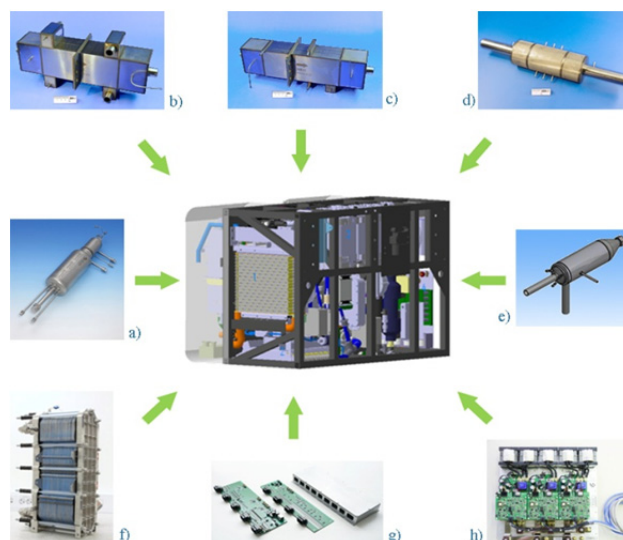
Agregat sestavlja dva glavna podsklopa:

- procesor za dizelsko gorivo,
- močnostni modul z gorivno celico,

njegovo delovanje pa omogočajo

- podporne (angl. balance of plant - BoP) komponente, ter
- krmilnik, ki skrbi za vodenje celotnega sistema in nadzira obratovalne parametre.

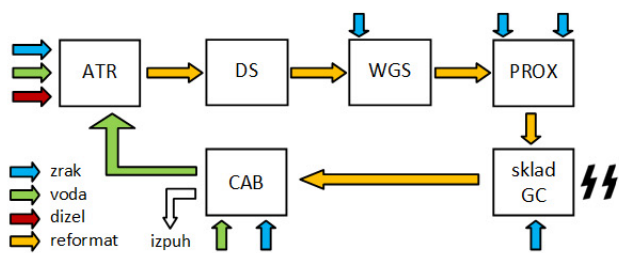
Akumulator za zagon, zaustavitev in premostitev prehodnih pojavov ob prilagajanju odjemni moči, je nujen del, ki pa ga agregat, prikazan na Sliki 1 deli z vozilom/tovornjakom.



Slika 1: Prikaz pomembnih gradnikov sistema: a) avtotermni reformer, b) razžvepljevalnik, c) reaktor za vodno-plinsko pretvorbo, d) PrOx, e) katalitski gorilnik, f) sklad z gorivnimi celicami, g) namenski krmilnik in h) DC/DC pretvornik.

2.1 Procesor za dizelsko gorivo

Ta del pretvarja dizel v produktni plin, imenovan reformat. Sestavlja ga pet reaktorjev: avtotermni reformer, reaktor za čiščenje žvepla, dva reaktorja za pretvorbo in čiščenje ogljikovega monoksida, ter katalitski gorilnik za končno izgorevanje nereagiranih komponent v izpuhu in predgrevanje pare. Poenostavljena procesna shema je prikazana na Sliki 2.



Slika 2: Poenostavljen shematski prikaz dovajanih reagentov brez hladilnih zank

Bistvo razgradnje dizla je t.i. reforming



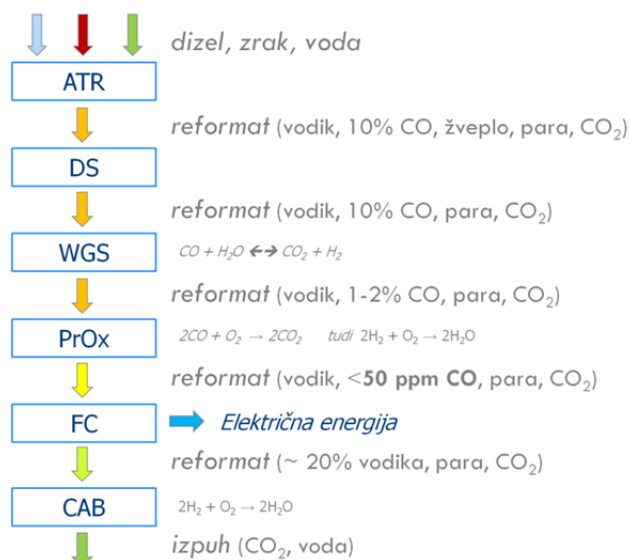
endotermna reakcija, pri kateri se molekule dizelskega goriva na katalizatorju ob prisotnosti zraka in pare razgradijo na vodik, ogljikov monoksid, ter ogljikov dioksid. Ker je sama reakcija reforminga endotermna, je potrebno energijo zanj dovajati. Glede na način dovajanja energije ločimo:

- parne reformerije, kjer potrebno energijo dovedemo s predgrevanjem reaktantov (goriva in pare) ter segrevanja reaktorja od zunaj, in
- avtotermne reformerije (ATR, uporabljen v tem primeru), kjer energijo za reakcijo zagotovimo znotraj reaktorja, z dodajanjem presežka zraka in posledično (eksotermno) delno oksidacijo dizla. Z uravnavanjem presežka zraka lahko zagotovimo optimalno temperaturo za potek reforminga v reaktorju. Posledično so ti reaktorji lahko precej manjši.

Za reformerjem v reformatu v opzanih količinah ostaneta še žveplo (v kolikor gre za navadni dizel), ter ogljikov monoksid. Za prvega poskrbi reaktor za »lovljenje« žvepla (angl. desulphurisation, DS), načrtovan tako da zadrži količino predvideno za celotno življenjsko dobo agregata. Drugi, ogljikov monoksid, pa najprej v reaktorju za vodno-plinsko pretvorbo (angl. water-gas-shift, WGS) v veliki meri reagira z vodo in se pretvori v vodik, preostanki le-tega pa se oksidirajo do neškodljivih vrednosti v reaktorju za preferenčno oksidacijo (PROX), kar omogoča njegov selektivni katalizator.

Na koncu verige je katalitski gorilnik (angl. catalytic burner, CAB), kamor vstopa izrabljeni reformat iz gorivne celice, ki med normalnim obratovanjem vsebuje še cca. 20-30% vodika. Tu izgorijo vse gorljive komponente, nastala toplota pa se izkorišča za predgrevanje pare, pred vstopom v ATR.

Pred proženjem reakcije je potrebno ATR predgreti na vsaj 350°C, ostale reaktorje pa za preprečitev kondenzacije nad 100°C. Za predgrevanje je uporabljen t.i. zagonski gorilnik njegov izpuh je speljan prek toplotnih izmenjevalnikov, prek katerih se z zrakom segreva reaktorje. Za hitrejše segrevanje je le-to izvedeno v dveh vejah. V prvi ATR, DS, WGS in PROX, v drugi pa CAB.



Slika 3: Prikaz postopka pretvorbe dizla in čiščenja reformata.

2.2 Močnostni modul z gorivno celico

Ta del sestavljajo sklad z gorivnimi celicami, močnostni pretvornik, ter napajalnik podpornih komponent.

Skład ima nazivno moč 5kW, sestavlja pa ga 50 nizekotemperaturnih PEM gorivnih celic, ki zagotavljajo delovno napetost med 50 in 30 V. Med delovanjem se predvideva 70-80% izraba vodika. Stopnja kompleksnosti tega dela je precej manjša od procesorja goriva, saj so dinamike hitrejše in bolj vodljive.

Namenski močnostni pretvornik za sisteme z gorivnimi celicami je »step-down« tipa z

učinkovitostjo 96% in skrbi za pretvorbo spreminjajoče se napetosti sklada na napetost akumulatorja, ter njegovo nadzorovano polnjenje oziroma praznjenje. S krmiljenjem močnostnega pretvornika direktno vplivamo na tok in s tem delovno točko sklada, zato je zelo pomembno, da le-to nastavljamo usklajeno s trenutno proizvodnjo vodika.

Napajalnik podpornih komponent je bil zasnovan za napajanje številnih BoP komponent z različnimi delovnimi napetostmi in močmi. Prilagojen je tako da je skupna poraba energije čim manjša.

2.3 Podporne (BoP) komponente

Stanje prototipnega agregata beleži 40 temperaturnih senzorjev, 8 merilnikov pretoka, 7 merilnikov tlaka, lambda sonda ter 3 javljalniki vodika oziroma ogljikovega monoksida.

Delovanje agregata pa omogoča 16 kompresorjev, 12 črpalk in 8 ventilov, ki dovajajo reaktante in poganjajo hladilne ali ogrevalne kroge.

2.4 Krmilnik

Namensko razviti krmilnik se sestoji iz 4 procesorjev. Glavni (ARM cortex M4) skrbi za izvajanje programa vodenja, trije pomožni pa za zajem in filtriranje temperaturnih senzorjev, za komunikacijo ter za dodatne preračune. Vhode in izhode predstavlja 9 konektorjev, na katerih je preko 120 vhodnih/izhodnih sponk. Le-te obsegajo

- 10 digitalnih vhodov,
- 64 analognih vhodov,
- 36 digitalnih izhodov manjše moči,
- 8 močnostnih digitalnih izhodov in
- 22 analognih izhodov.

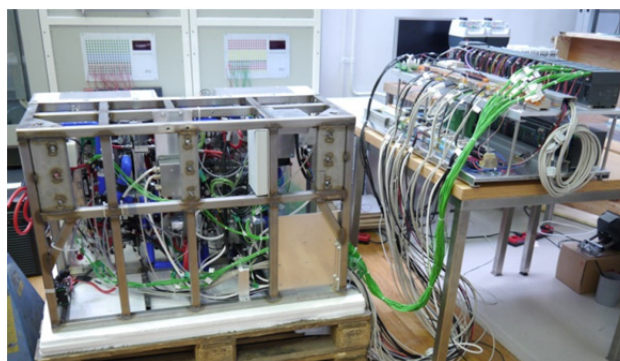
3 Sistem vodenja

S stališča vodenja gre za proces z visoko stopnjo kompleksnosti tako po številu merilnih mest, aktuatorjev in regulacijskih zank, kot tudi po zahtevanem zaporedju akcij pri zagonskih in

zaustavitvenih procedurah. Nekaj njegovih glavnih značilnosti je:

- proces z velikim številom vhodov / izhodov,
- multivariabilnost – sovpliv aktuatorjev,
- več zagonskih in zaustavitvenih procedur iz različnih delovnih stanj,
- velik razpon časovnih dinamik procesov,
- visoka občutljivost nekaterih zank,
- težko vodljiva stanja zaradi velikih mas reaktorjev in majhnih energij,
- možne trajne poškodbe reaktorjev ob prekoračitvi temperaturnih limit,
- možni nepričakovani vžigi ogljikovih usedlin,
- veliko število senzorjev in aktuatorjev zgoščenih na majhnem prostoru.

Tak kompleksen proces pri načrtovanju vodenja zahteva celosten, sistemski pristop. To pa pri delu narekuje modularnost hierarhičnost, standardizacijo in dobro dokumentacijo. Na razvoj sistema vodenja je ključno vplival še en dejavnik – prototip agregata je bil načrtovan vzporedno s sistemom vodenja. Pri izvedbi slednjega tako ni bila optimizirana le učinkovitost, temveč tudi prilagodljivosti, saj je vzporedno nastajajoči proces, zahteval mnoge sprotne prilagoditve. Zaradi omogočanja večje prilagodljivosti je bil v prvi fazi sistem vodenja realiziran na industrijskem krmilniku Simatic (Slika 4) in šele kasneje prenešen na namenski krmilnik.



Slika 4: Procesor goriva z BoP komponentami v fazi testiranja s Simatic krmilnikom.

3.1 Struktura sistema vodenja

Sistem vodenja ima 4-nivojsko hierarhično modularno strukturo, prikazano tudi v Tabeli 1.

reformerju. Reagenti, dizel, zrak in vodna para določajo delovne pogoje in neposredno vplivajo na učinkovitost pretvorbe. Z uravnavanjem faktorja presežka kisika določamo razmerje med potekoma vzporednih reakcij delne oksidacije in parnega reforminga. ter faktorja presežka pare. Zelena delovna temperatura je čim bližje limiti 1000°C, ki pa je ne smemo preseči. Proces je zelo občutljiv, saj že se majhna sprememba v pretokih reaktantov takoj odrazi v opazno spremenjeni temperaturi v reaktorju. Zato je pomembno natančno in usklajeno dovajanje reaktantov, kar ob uporabi industrijskih črpalk in kompresorjev predstavlja poseben izziv. Natančno ugaščevanje delovne temperature pri določeni delovni točki dosežemo s pripravo pare določene temperature, ki jo ustvarimo z mešanjem hladne vode in v katalitskem gorilniku predgrete pare. Pri tem mora skupni pretok vode ostati konstanten.

3.2.3 Reaktor za vodno-plinsko pretvorbo

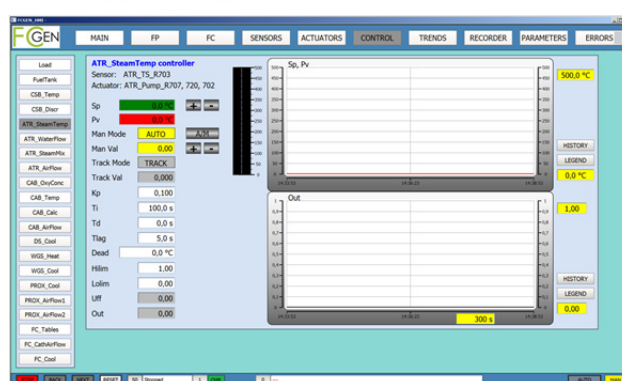
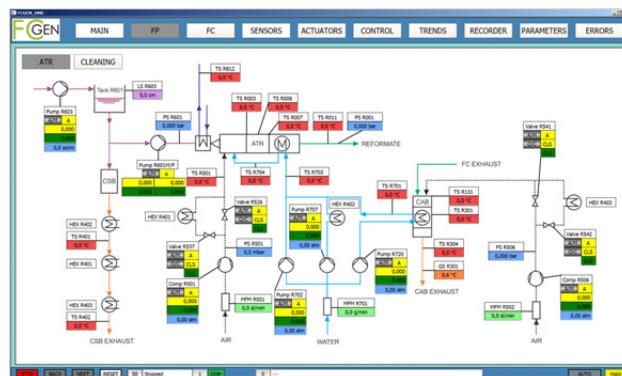
V tem reaktorju ogljikov monoksid reagira z vodo v vodik in ogljikov dioksid, vendar je ta reakcija reverzibilna, zato želimo v prvem delu reaktorja imeti visoko temperaturo, da reagira čim večji delež monoksida, v drugem pa precej nižjo, da preprečimo povratno reakcijo. Zato takoj po zagonu procesa nekaj časa vhodni del reaktorja grejemo z dodajanjem zraka (oksidacija), izhodni del pa ves čas hladimo na konstantno temperaturo.

3.2.4 Reaktor za preferenčno oksidacijo

V PROX reaktorju je selektivni katalizator, ki ob dodajanju kisika iz refomata oksidira še preostali ogljikov monoksid, hkrati pa preprečuje reakcijo kisika z vodikom. Reaktor ima tri regulirne veličine: dva kompresorja za dovajanje zraka ter črpalko hladilne vode. Pri vodenju se srečamo z več izzivi. Prvi je izjemno majhna energija reakcije, drugi velika masa reaktorja in tretji izbira primerne lege senzorja, saj ima tisti z najhitrejšim odzivom slabo občutljivost na regulirni signal, tisti z najboljšo občutljivostjo pa izjemno počasen odziv – tog sistem.

3.3 Uporabniški vmesnik

Za potrebe testiranja in spremljanja delovanja v razvojnem obdobju je bil razvit podroben uporabniški vmesnik. Obsega 40 zaslonov, ki vključujejo *procesne sheme* (procesor goriva (Slika 7) in katalitski gorilnik, čistilni reaktorji, gorivna celica), *avtomate stanj*, *delovanje regulatorjev povratnih zank*, *procesne vrednosti*, *aktuatorje*, *varnostna opozorila in napake*, ter *shranjevalnik podatkov*.



Slika 7: Primeri zaslonov uporabniškega vmesnika.

Z njim je mogoče spremljati vse merjene veličine, delovanje regulacijskih zank in procedur, preklapljati med avtomatskimi in ročnimi režimi procedur, regulacijskih zank in

posameznih aktuatorjev. Poleg tega ima vgrajene tudi nadzorne funkcije, opozorila o napakah, ter beleženje zgodovine vseh podatkov.

Razvit v programskem okolju Beijers IX developer in teče na osebni računalniku, ki je prek ethernet kabla povezan s Simatic krmilnikom ali namenskim krmilnikom (FCGEN ECU) in omogoča tudi upravljanje na daljavo.

4 Zaključek

V prispevku so opisani gradniki agregata, predvsem pa značilnosti in koraki, ki jih je bilo potrebno izvesti na področju vodenja za doseg delujočega razvojnega sistema.

Razvoj celotnega sistema je zahteval izjemno usklajeno delo in komunikacijo med geografsko oddaljenimi partnerji projekta z vse Evrope.

Z našega stališča pa je poleg delujočega sistema izjemnega pomena izkušnja uporabe najnovejših tehnologij na področju reforminga in gorivnih celic, ter doseganje zanesljivega, varnega in trajnega delovanja le-teh ob uporabi standardnih komponent (materialov, senzorjev in aktuatorjev) iz avtomobilske ali procesne industrije. Na vseh nivojih se je namreč tudi tu zelo jasno pokazalo, kako daleč je laboratorijsko okolje od pogojev vsakodnevne uporabe.

5 Zahvala

Za finančno podporo se zahvaljujemo EC, ki v okviru FCH-JU financira projekt FCGEN

[277844], ter Programu [P2-0001] ki ga financira Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo.

6 Literatura

- [1] Lee J.S., Quan N.D., Hwang J.M., Lee S.D., Kim H., Lee H., Kim H.S. (2005). Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12(2), 175-183.
- [2] Barbir. F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice, 2005
- [3] Ramos-Paja C. A., Bordons C., Romero A., Giral R., Martínez-Salamero L. (2009). Minimum Fuel Consumption Strategy for PEM Fuel Cells. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56, 3.
- [4] J, T, Pukrushpan, A, G, Stefanopoulou, h, Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer-Verlag, London, 2, Izdaja, 2005.
- [5] Debenjak, A., Boškoski, P., Musizza, B., Petrovčič, J., Juričić, Đ. (2014). Fast measurement of proton exchange membrane fuel cell impedance based on pseudo-random binary sequence perturbation signals and continuous wavelet transform. *Journal of Power Sources*, 254, 112–118.
- [6] FCGEN (Fuel Cell Based On-board Power Generation) (2011). FCH JU European project. Available at: <http://www.fcgen.com>
- [7] Pasel, J. , Samsun, R. C., Peters, R., Stolten, D. (2013). Fuel processing of diesel fuel and kerosene for auxiliary power unit applications. *Energy and Fuels*, 27, 4386–4394.
- [8] S1 Fuel Cell Data Sheet, Powercell AB (no date). Available at: http://www.powercell.se/wp-content/uploads/2010/09/Datasheet_FuelCell-rev-100909.pdf.