

Dušan Medveď

## Vodíkový palivový článok (SOFC) v prostredí Matlab

Tento príspevok sa venuje analýze správania sa distribučnej siete, v prípade aplikovania vodíkového článku ako prosumera elektrickej energie. Vodíkový článok bol vybraný typu SOFC (Solide Oxide Fuel Cell). Medzi výhody tohto typu článku patria vysoko potenciálne odpadové teplo, rýchlosť samotnej reakcie, vysoká účinnosť procesu a ďalšie. Tento palivový článok dokáže vyprodukovať elektrický jednosmerný výkon 100 kWe. K sieti bol pripojený pomocou 3 fázového DC-AC meniča riadeného tak, aby bol výkon dodávaný do siete na konštantnej, nastavenej hodnote. Simulácie boli realizované v prostredí Matlab/Simulink.

KLúčové slová: vodíkový článok, dynamický dej, Simulink

This paper is devoted to the analysis of the behavior of the distribution network, in the case of applying the hydrogen cell as a prosumer of electricity. The hydrogen cell was selected as SOFC type (Solid Oxide Fuel Cell). The advantages of this type of cell include high potential waste heat, the speed of the reaction itself, high process efficiency, and more. This fuel cell can produce 100 kWe of DC electrical power. It was connected to the network using a 3-phase DC-AC converter controlled so that the power was delivered to the network at a constant, set value. The simulations were carried out in the Matlab/Simulink environment.

Keywords: hydrogen cell, dynamic phenomena, Simulink

### I. ÚVOD

Vodíkové palivové články vyrábajú elektrinu kombináciou atómov vodíka a kyslíka. Vodík reaguje s kyslíkom v elektrochemickom článku podobnom batérii za vzniku elektriny, vody a malého množstva tepla.

Existuje mnoho rôznych typov palivových článkov pre širokú škálu aplikácií. Malé palivové články môžu napájať prenosné počítače a dokonca aj mobilné telefóny a rôzne iné aplikácie. Veľké palivové články môžu dodávať elektrinu do elektrických rozvodných sietí, dodávať záložnú alebo núdzovú energiu v budovách a dodávať elektrinu na miestach, ktoré nie sú pripojené k rozvodným sieťam.

Vodík sa považuje za alternatívne palivo pre vozidlá. Záujem o vodík ako alternatívne palivo v doprave pramení z jeho schopnosti napájať vozidlá palivom s nulovými emisiami, z jeho potenciálu vyrábať si vodík v domácnostiach a tiež pre jeho vysokú účinnosť. Palivový článok môže byť dvakrát až trikrát účinnejší ako spaľovací motor poháňaný benzínom. Vodík môže tiež poháňať spaľovacie motory, ale spaľovanie vodíka má za následok emisie oxidov dusíka a teda takéto spaľovanie je menej účinné ako použitie v palivových článkoch.

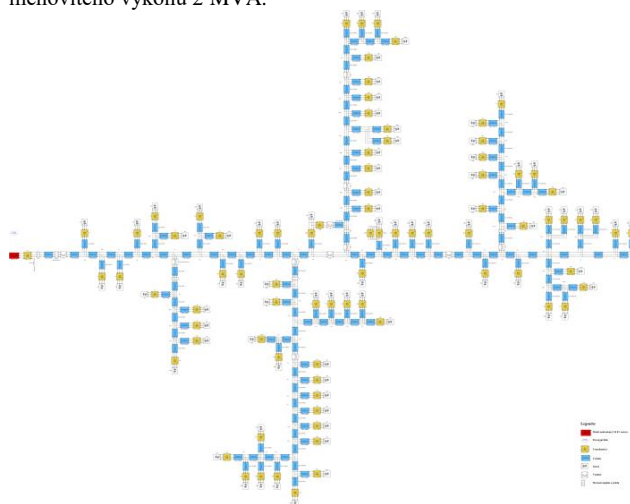
My však v našom príspevku uvidíme využitie vodíkového článku v elektrizačnej sústave ako určitý druh akumuláčného zariadenia, kde v prípade prebytku energie túto uskladníme a v prípade nedostatku energie v elektrickej sieti bude vodíkový článok, využitím DC-AC meniča vyrábať elektrickú energiu. Simulácie sme realizovali na modeli časti distribučnej siete na východnom Slovensku v prostredí Matlab/Simulink.

### II. POPIS MODELU SIETE

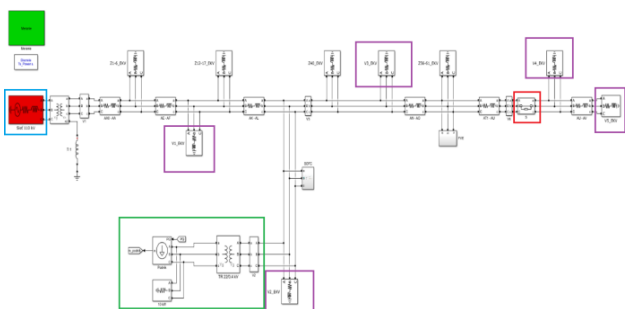
Dynamické deje boli analyzované na vybranej časti vn siete východného Slovenska. Pri simulácii sme uskutočnili niekoľko zjednodušení – sieť bola modelovaná ekvivalentnými záťažami (činné a jalové zaťaženie odpovedá skutočnému činnému a jalovému zaťaženiu danej časti siete – vedenia, skupinové prípojky). Taktiež sa najdôležitejšie úseky vedenia namodelovali iba RL členmi (bez

priečných členov G, C), zodpovedajúcimi skutočným hodnotám daných vedení. Dané deje boli analyzované na 30 minútovom (1800 s simulačný čas) časovom intervale.

Daná sieť bola napájaná vonkajšou nadradenou 110 kV sieťou prostredníctvom znižovacieho transformátora 110/22 kV. V našom prípade do nej ale pribudla nová záťaž – podnik (dynamická záťaž) pripojený na svorkách skupinovej prípojky V2, menovitého odoberaného výkonu na úrovni 1 MVA. Táto záťaž je dobre kompenzovaná,  $\cos \varphi = 0,95$  indukčných. Tento odberateľ je úrovne nn a k sieti je pripojený distribučným transformátorom 22/0,4 kV menovitého výkonu 2 MVA.



Obr. 1. Model distribučnej siete v prostredí Simulink (pred zjednodušením)

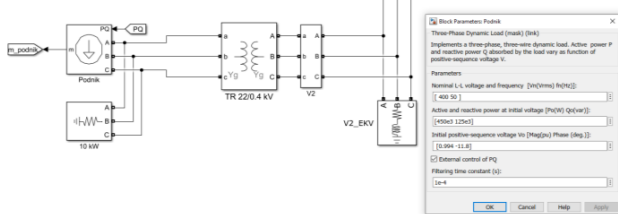


Obr. 2. Model distribučnej siete v prostredí Simulink (po zjednodušení)

Z dôvodov zrýchlenia výpočtov sme pristúpili k zjednodušeniu schémy, kde sme vybrané vetvy vedení a záťaží nahradili ekvivalentným RLC prvkom. Na obr. 2 je vidieť model uvažovanej distribučnej siete po zjednodušení, kde vľavo je nadradená 110 kV sieť, dole (zelené označenie) je zvýraznená dynamická záťaž (podnik, charakteristika odberu je na obr. 4), vpravo (červené označenie) je vypínač S (skupinové pripojky V4,5), a fialovým označením sú znázornené skupinové pripojky V1 – V5.

A) *Dynamická záťaž*

Podnik sme modelovali blokom Three-Phase Dynamic Load z knižnice prvkov Simscape Electrical. Tento blok predstavuje trojfázovú dynamickú záťaž. Charakteristiku jej odberu sme riadili externe, t.j. z .txt súboru sa načítali a vypočítali príslušné hodnoty odberu, zodpovedajúce zaťaženiu v každom 60-sekundovom intervale celkového simulačného času. Táto záťaž je súmerná. Podnik má v prevádzke viacero technologických zariadení – indukčných motorov atď. Táto záťaž nesmie byť pripojená v sérii s indukčným elementom trojfázového vedenia preto bolo potrebné paralelne k nej zapojiť čisto ohmickú statickú záťaž (na obrázku nižšie, označená 10 kW).



Obr. 3. Zapojenie podniku v prostredí Simulink (dynamická záťaž)

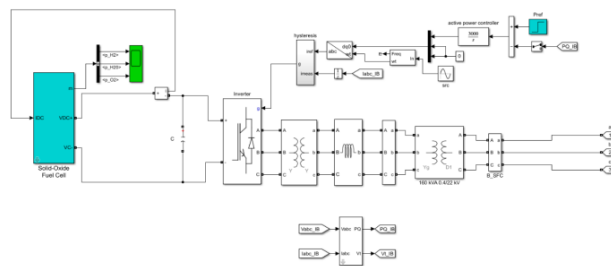


Obr. 4. Charakteristika priebehu odberu podniku

B) *Vodíkový palivový článok (SOFC)*

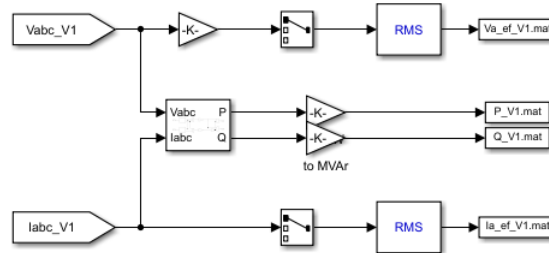
Vodíkový palivový článok sme modelovali konkrétneho typu, s elektrolytom na báze pevného oxidu, známy ako SOFC (Solide Oxide Fuel Cell). Medzi výhody tohto typu článkov patria vysoko potenciálne odpadové teplo, rýchlosť samotnej reakcie, vysoká

účinnosť procesu a ďalšie. Tento palivový článok dokáže vyprodukovať elektrický jednosmerný výkon 100 kWe. K sieti bol pripojený pomocou 3 fázového DC-AC meniča riadeného tak, aby bol výkon dodávaný do siete na konštantnej, nastavenej hodnote (1 pomerná jednotka). V modeli sme použili dva transformátory – zvyšovací (na obrázku zľava, na AC výstupe meniča) a sieťový (na obrázku vpravo).



Obr. 5. Model vodíkového článku SOFC

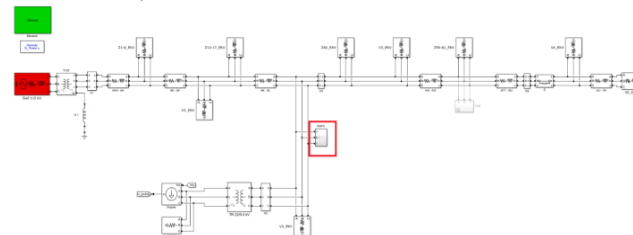
Vo vybraných, dôležitých bodoch siete sme merali napätia v týchto bodoch a prúdy, tečúce týmito bodmi blokom „Three-Phase V-I Measurement“. Následne sa z odmeraných napätí a prúdov vypočítali príslušajúce prenášané činné, jalové výkony. Z odmeraných napätí a prúdov sa vypočítali ich efektívne hodnoty blokom RMS. Keďže naša sieť je súmerná (súmerne zdroje, zaťaženie), zapisovali sme efektívne hodnoty iba vo fáze A. Odmerané výsledky sa následne zapisovali do .mat súborov, ktoré sa dajú jednoducho otvoriť a spracovať/analyzovať.



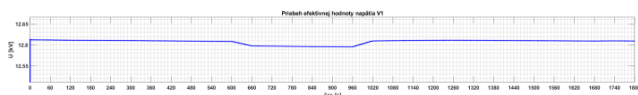
Obr. 6. Úprava a zapisovanie skúmaných veličín do .mat súborov v prostredí Simulink

III. VÝSLEDKY SIMULÁCIE PREVÁDZKY SOFC VODÍKOVÉHO ČLÁNKU V DISTRIBUČNEJ SIETI

Popis deja: V tomto prípade sa v sieti prevádzkuje len podnik (dynamická záťaž) a zariadenie D-STATCOM. V 17. sekunde sa na 1 s rozpojí vypínač S, čo presne korešponduje s časom v simulácii 1800 s. V tomto prípade je hlavné napájanie siete bolo realizované z vonkajšej siete napäťovej úrovne 110 kV. V sieti pracuje obnoviteľný zdroj – SOFC pripojený v uzle pripojenia podniku (na obrázku nižšie).

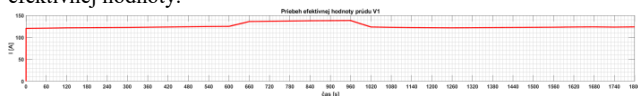


Obr. 7. Zapojenie siete v prostredí Simulink



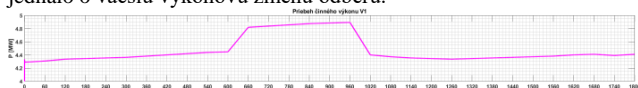
Obr. 8. Priebeh efektívnej hodnoty napätia V1

Na priebehu efektívnej hodnoty napätia v tomto bode vidieť, že napätie sa ustálilo okolo 12,6 kV. V prípade väčších zmien odberu záťaže sa mení zanedbateľne, v podstate ho môžeme považovať za konštantné. Vysvetľujeme to tým, že v sieti sa neprevádzkovala FVE, teda tvrdá sieť od začiatku dodávala potrebný vyšší prúd (výkon) a väčšia zmena v spotrebe ju už nezasiahla. Celkovo bola hodnota napätia v tomto bode stanovených normou STN EN 50160 a taktiež možno hovoriť v súlade s normou iba o prevádzkovom kolísaní jeho efektívnej hodnoty.

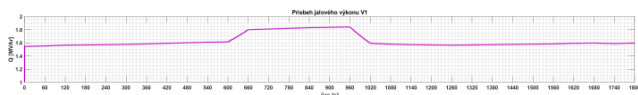


Obr. 9. Priebeh efektívnej hodnoty prúdu V1

Tvrdá sieť v tomto prípade dodávala mierne vyšší prúd, nakoľko bola jediným významným zdrojom v sieti. Krivka dodávaného prúdu kopíruje charakteristiku odberu dynamickej záťaže (podniku), nakoľko ostatné zaťaženie je statického charakteru (konštantný odber činného a jalového výkonu). Zmena prúdu medzi 960. ÷ 1020. sekundou bola výraznejšia ako medzi 600. ÷ 660. sekundou, keďže sa jednalo o väčšiu výkonovú zmenu odberu.

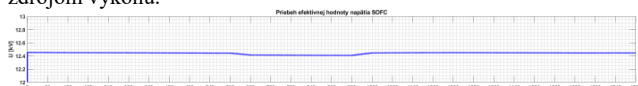


Obr. 10. Priebeh činného výkonu V1



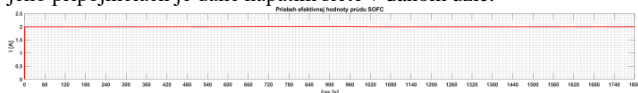
Obr. 11. Priebeh jalového výkonu V1

Priebehy činného a jalového výkonu v tomto bode zodpovedajú odberu dynamickej záťaže, keďže tvrdá sieť je jediným významným zdrojom výkonu.



Obr. 12. Priebeh efektívnej hodnoty napätia v mieste pripojenia SOFC

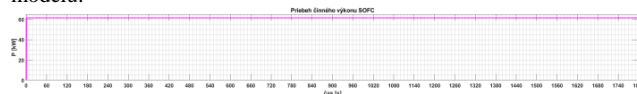
Keďže je tento zdroj pripojený v rovnakom uzle ako náš podnik, napätie na jeho prípojnicach je zhodné s napätím v bode pripojenia podniku do siete, nakoľko je tento zdroj voči tvrdej sieti obrovského výkonu malý a teda s malým príspevkom do uzla. Teda, napätie na jeho prípojnicach je dané napätím siete v danom uzle.



Obr. 13. Priebeh efektívnej hodnoty prúdu v mieste pripojenia SOFC

Z dôvodu, že tento zdroj pracuje v napäťovej úrovni VN a dodáva relatívne malý výkon (60 kW), je efektívna hodnota ním dodávaného prúdu nízka, ako je vidieť na grafickom priebehu. Teoreticky je počas celej simulácie konštantná, riadenie výkonového meniča je nastavené tak, aby udržiavalo dodávaný výkon na nastavenej 1 pomernej

jednotke (obr. 14). Mierny šum v priebehu je spôsobený stavbou modelu.



Obr. 14. Priebeh činného výkonu v mieste pripojenia SOFC

#### IV. ZÁVER

Na základe prezentovaných výsledkov sme zaznamenali, že zmeny v napätiach, pri daných dynamických dejoch, boli najnižšie na svorkách tvrdej siete, nakoľko je to zdroj veľmi veľkého výkonu. Čím ďalej sme boli od tvrdého zdroja, tým boli tieto zmeny výraznejšie. Vidíme, že v prípade napájania takto tvrdou sieťou sa napätie menilo minimálne. Takáto tvrdá sieť vie ľahko reagovať na ľubovoľne veľkú zmenu v spotrebe siete, no v prípade citlivých nn odberateľov je ľahšie predvídať správanie sa a eliminovať prípadné nepriaznivé vplyvy lokalizáciou zdrojov. Tie pracujú na úrovni VN distribučnej sústavy (FVE, SOFC) a teda sú bližšie k odberateľom, nakoľko väčšina spotreby ES sa rozprestiera na napäťovej úrovni nn.

Aby sme v budúcnosti dokázali pokryť základné pásmo zaťaženia s masívnejším nasadením OZE v energetickom mixe, tieto zdroje budú musieť spolupracovať s akumuláciami prostriedkami v sieti (ESS dostatočnej kapacity a výkonu, prípadne stlačený vzduch, PVE a pod., ktoré dokážu na náhle zmeny reagovať v dostatočne rýchlym požadovanom čase a s požadovaným výkonom). Na spojitú prevádzku vhodnejší jednoznačne SOFC, nakoľko jeho výroba je stála, kým má k dispozícii potrebné palivo a vzduch produkuje výkon. Taktiež je to vďaka jeho modulovateľnosti, pomocou istého počtu článkov si taktó dokážeme namodulovať potrebný výkon na relatívne malej ploche. Týmto zdrojom, rovnako ako v prípade FVE však nedokážeme ovplyvniť bilanciú jalových výkonov v sieti, ktorá má priamy vplyv na kvalitu napätia v sieti. Implementácia týchto OZE sa predpokladá väčšinou na úrovni distribučnej sústavy, čiže tieto zdroje pracujú väčšinou lokálne. To má svoje výhody aj nevýhody pre sústavu (sieť). Jednak v prípade nečakaných, väčších dynamických dejov v sieti sú schopné v prípade prevádzky zareagovať na zmeny rýchlejšie ako vonkajšie napájanie, a tým obmedziť, aby citliví odberatelia nn neutrpeli väčšie škody. Taktiež je to z hľadiska siete hospodárnejšie, vďaka nižším stratám vo vedeniach, ktoré by inak pri napájaní z vonku vznikali. Implementácia týchto zdrojov, v blízkosti už spomínaných nn odberateľov, si ale vyžaduje dostatočné opatrenia, aby vyššie neharmonické, vznikajúce ich prevádzkou, neboli „zanesené“ do tejto siete (nn), kde by to znamenalo škodlivé zníženie kvality energie (napätia).

Medzi hlavné výhody použitia SOFC typu článku v elektroenergetike patria jednoznačne efektívnosť, stálosť výroby na rozdiel od iných obnoviteľných zdrojov (veterné, fotovoltaické) a samozrejme environmentálny aspekt, t.j. nízke emisie, nezaberá veľkú plochu. Jeho ďalšia veľká výhoda spočíva jednoznačne v jeho „modulovateľnosti“, teda od rádo jednotiek kW môžeme dosiahnuť výkony až rádo desiatky MW, ktoré sú schopné pracovať v spojitý prevádzke. Ich odpadové teplo by sa taktiež dalo zužitkovať z energetického hľadiska na lokálne vyhrievanie, čím by sa zasa zväčšila efektívnosť technologického procesu, prípadne by sa dalo použiť v hybridných turbínach. Ich zrejme jedinou veľkou nevýhodou je samozrejme potreba výkonovej elektroniky na spojenie so sieťou, čo prináša do siete negatívne vplyvy v podobe vyšších harmonických napätia.

**POĎAKOVANIE**

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu č. APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou“, ako aj projektu č. APVV-21-0312 „Dynamické pridelovanie kapacít elektrickej energie“.

**LITERATÚRA**

[1] Šárpataky, L., Medveď, D.: *Možnosti využitia palivových článkov*. In: Electrical Engineering and Informatics 9: proceedings of the Faculty of

Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. Košice: FEI TU, 2018, pp. 314-317. ISBN 978-80-553-2713-6.

[2] Szathmáry, P.: *Kvalita elektrickej energie*. 1. vydanie. Bratislava: PRO, 2003. 122 s. ISBN 80-89057-04-7.

[3] STN EN 60909-0. *Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách. Časť 0: Výpočet prúdov*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.

[4] Kolcun, M., Medveď, D.: *Skúmanie prechodných javov v elektrizačnej sústave*. In: Elektroenergetika. Roč. 14, č. 1 (2021), s. 5-8. - ISSN 1337-6756.

**ADRESY AUTOROV**

doc. Ing. Dušan Medveď, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk