

Analýza správania sa prosumerov v elektrickej sieti

¹Teodor KISEL, ²Dušan MEDVEĎ

^{1,2} Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzite v Košiciach, Slovenská republika

¹teodor.kisel@student.tuke.sk, ²dusan.medved@tuke.sk

Abstrakt — Tento príspevok sa zaoberá analýzou správania sa prosumerov, resp. on-grid elektrickej siete, ktorá je pripojená do väčšej synchrónnej elektrickej siete, a off-grid systému. Na to boli vytvorené dva modely v programe Simulink (Matlab), kde v jednom prebieha simulácia činnosti on-grid systému elektrickej siete a v druhom prebieha simulácia činnosti off-grid systému elektrickej siete. V rámci oboch systémov hodnotíme v danom simulovanom období správanie sa modelu z pohľadu prechodných stavov a kvalitatívnych ukazovateľov elektrickej energie pri rôznych konfiguráciách zapojenia.

Kľúčové slová — prosumer, on-grid elektrická sieť, off-grid elektrická sieť, Simulink, fotovoltická elektrárňa, veterná elektrárňa

I. ÚVOD

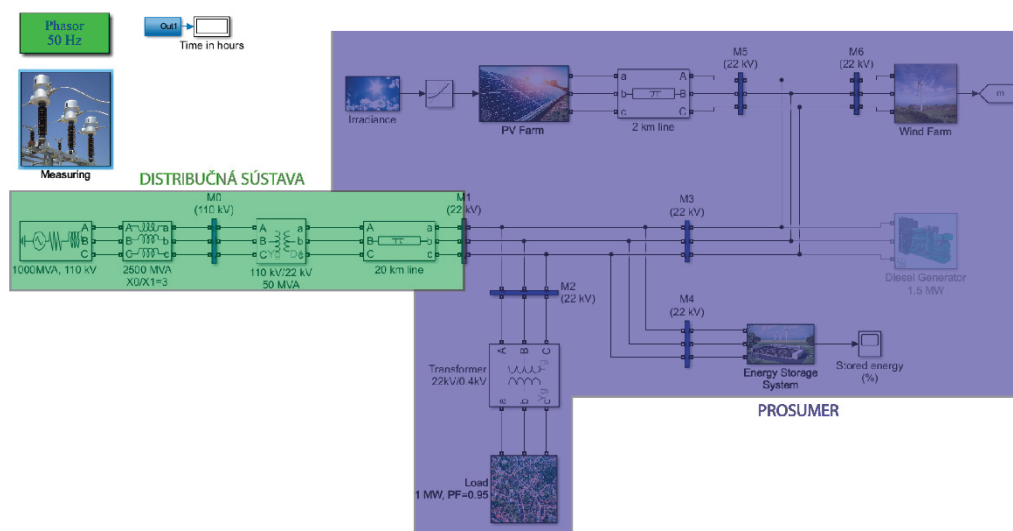
V rámci tohto článku je prezentovaná analýza správania sa prosumerov, resp. elektrickej siete, ktorá je pripojená do väčšej synchrónnej elektrickej siete a off-grid elektrickej siete. Jedná sa o analýzu prechodných stavov a kvalitatívnych ukazovateľov v rámci sledovaného simulačného obdobia pri rôznych konfiguráciách zapojenia fotovoltickej elektrárne, veternej elektrárne, záťaže, diesel-generátora a ESS (Energy Storage System), ktorý môže reprezentovať niekoľko možných spôsobov uloženia energie, ako sú napríklad zotrvačníky, stlačený vzduch, superkondenzátory, batériový systém.

Samotná simulácia jednotlivých prípadových simulácií prebiehala v prostredí programu Simulink (Matlab). Na riešenie prechodných stavov elektrického obvodu bol využívaný tzv. „phasor“ mód, vďaka ktorému bolo možné uskutočniť simuláciu v rozsahu niekoľkých desiatok hodín a ďalej pracovať so získanými údajmi. Medzi najdôležitejšie sledované parametre patrili tok činných výkonov a prúdov, napätie a frekvencia. Na zefektívnenie práce s nameranými dielčmi výsledkami v podobe grafov a hodnôt elektrických veličín bol nami využívaný zdrojový kód v Matlab-e.

II. POPIS JEDNOTLIVÝCH BLOKOV SIMULAČNÉHO MODELU

V prípade on-grid systému (obr. 1) model pozostáva zo zapojenia distribučnej sústavy (DS), ktorú tvorí 110 kV napäťový zdroj, znižujúci transformátor 110 kV/22 kV, 20 km dlhé vedenie a prosumer. Uzol s označením M1 tvorí pripojovací bod prosumera k DS. Prosumer je tvorený fotovoltickou elektrárnou (FVE) s meracím bodom v uzle M5, veternou elektrárnou (VE) s meracím bodom v uzle M6, zásobníkom elektrickej energie (ESS) s meracím bodom v uzle M4, záťažou s meracím bodom v uzle M2.

Model sa vyznačuje komplexným poskytovaním dát merania amplitúd dôležitých parametrov v reálnom čase, ako je napríklad tok prúdov a činných výkonov, sledovanie napätia v jednotlivých uzloch, sledovanie frekvencie, sledovanie stavu SOC ESS, ponúka komparáciu činných výkonov jednotlivých výrobných a nevýrobných jednotiek, sledovanie charakteristických veličín veternej elektrárne, ako napr. natočenie lopatiek turbíny, rýchlosť rotora v pomerných jednotkách, rýchlosť vetra na základe charakteristiky vetra.



Obr. 1 Model zapojenia prosumera k distribučnej sústave

V prípade off-grid systému, systém bol tvorený rovnakými prvkami ako je tvorený prosumer na obr. 1.

A. Blok veternej elektrárne

Samotný subsystém veternej elektrárne (VE) pozostáva z troch logických častí: z *ochrannej časti*, ktorá je súčasťou bloku s označením Wind Turbine Protections, z *bloku elektrárne*, kde sa spracujú vstupné signály (charakteristika vetra) a generuje sa výstupný signál (štandardný blok VE, ktorý ponúka knižnica Simscape) a z *výpočtovej časti*, na základe ktorej dostávame výsledky vektorov s nameranými signálmi (blok Data acquisition).

Ochrany veternej turbíny sú nastavené s automatickým resetom po určitej preddefinovanej dobe. V prípade, ak došlo k prekročeniu medzných hodnôt (výstupom TripStatus bude logická 1), ochrana odpojí veternú turbínu zo siete, následne po určitej nastavenej dobe dôjde k resetu ochrany s možným opätovným pripojením veternej turbíny, v prípade, ak je poruchový stav odstránený.

VE je navrhnutá s inštalovaným výkonom 400 kW. Elektráreň začína vyrábať elektrickú energiu od rýchlosti 5 m/s a pri rýchlosti 9 m/s dosahuje maximálny výkon. Nad touto rýchlosťou dochádza k aktívnej regulácii „Pitch“, t.j. využíva natáčanie celého listu rotora podľa okamžitej rýchlosti vetra tak, aby bol celkový nábeh prúdu v danom okamihu optimálny **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..**

Výstupné napätie generátora VE je 575 V, ktoré je ďalej transformované na napäťovú úroveň 22 kV. Samotná VE je vzdialená od miesta záťaže 2 km dlhým vedením.

Výstupom z VE je merací blok s označením m_wt1, ktorého výstupom sú sledované charakteristické veličiny ako činný a jalový výkon v pomerných jednotkách, natočenie lopatiek a rotorová rýchlosť turbíny. Hodnoty z týchto veličín sú ďalej spracované v bloku Data acquisition, kde dochádza ku konverzii z pomerných jednotiek na jednotky sústavy SI.

B. Blok fotovoltickej elektrárne

Model FVE nie je súčasťou knižnice Simulink. Jedná sa o pomerne zjednodušený model, kde sú vynechané konštrukčné prvky v podobe výkonového meniča. FVE je tvorená prúdovými zdrojmi, ktoré predstavujú zapojenie solárnych panelov, transformátorom 0,4 kV/22 kV, logickými blokmi, kde prebieha výpočet veľkosti injektovaného prúdu jednotlivými prúdovými zdrojmi a výstupnými meracími blokmi. FVE je od miesta záťaže, respektíve distribučnej siete, vzdialená km dlhým vedením.

Samotný model funguje na princípe prúdového zdroja, ktorý injektuje prúd v závislosti od vstupnej charakteristiky slnečného žiarenia a od nastavenej hodnoty účinnosti FVE a užitočnej plochy solárnych panelov.

C. Blok ESS (Energy Storage System)

Samotný subsystém ESS (Energy Storage System), resp. BESS (Battery Energy Storage System) je tvorený 4 blokmi: blok riadenia (ESS Control), výpočet stavu SOC, prúdovými zdrojmi, ktoré simulujú činnosť ESS (rovnaký princíp činnosti, ako v prípade FVE bloku) a transformátorom 0,4 kV/22 kV.

ESS, resp. BESS sa nabíja z DS v čase zopnutia nízkej tarify, čo v danom simulačnom modeli

predstavuje nastavený čas od 24. do 6. hodiny. Samotné nabíjanie je dovolené v prípade, ak kapacita ESS je menšia ako menovitá kapacita ESS.

Do riadiacej časti bloku ESS (ESS Control) vstupuje niekoľko premenných: združené napätia a prúdy v uzle M1 – výpočet činného výkonu, maximálny dovolený odoberaný činný výkon z DS – konštanta a maximálny nabíjací výkon – konštanta.

V riadiacej časti dochádza k porovnaniu parametrov okamžitej nameranej hodnoty činného výkonu s maximálnym dovoleným odoberaným činným výkonom. V prípade, ak dôjde k prekročeniu maximálneho dovoleného odoberaného činného výkonu z DS prosumerom, tak výstupom z bloku regulátora je rozdiel hodnôt medzi okamžitou hodnotou činného výkonu a maximálnou dovolenou hodnotou odoberaného činného výkonu, teda dochádza k vybíjaniu ESS. Táto činnosť riadiaceho člena platí iba v intervale medzi pravidelnými nabíjacími cyklami, t.j. v čase od 6. hodiny do 24. hodiny. Na riadenie logiky nabíjania slúži blok s označením Charging Logic. Výstupom z tohto bloku je v pravidelnom vyhradenom čase nabíjania logická 1, ktorá sa porovnáva so stavom SOC.

V prípade, ak je úroveň SOC nižšia ako nastavený parameter, tak v preddefinovanom intervale dôjde k nabíjaniu ESS.

Samozrejme, aby bolo možné bezchybne odsimulovať správanie sa ESS, je nutné v reálnom čase zaznamenávať stav SOC, na čo nám slúži blok Stored Energy Calculation.

Samotný ESS slúži na pokrytie zaťaženia v prípade, ak dôjde k prekročeniu maximálneho odoberaného výkonu z DS.

D. Blok záťaže

Blok záťaže pozostáva z troch častí: z dynamickej záťaže, ktorá predstavuje zapojenie niekoľkých stoviek domácností a príľahlej priemyselnej časti, statickej záťaže, ktorá predstavuje pripojenie technologických zariadení (napr. niekoľkých elektrických kotlov na výrobu TÚV) v troch stupňoch (3×50 kW), v prípade prebytku činného výkonu na strane prosumera a asynchrónneho motora.

Pri dynamickej záťaži môžeme nastaviť nominálny výkon v MW, účinník, v závislosti od ktorého meníme veľkosť odoberaného jalového výkonu záťažou a charakteristiku zaťaženia. Meranie elektrických veličín prebieha v uzle M2 (22 kV), teda už so zohľadnením strát transformátorom.

V prípade dynamickej záťaže ide podobne ako v prípade FVE bloku alebo ESS bloku o zapojenie prúdových zdrojov, ktoré pracujú na rovnakom princípe (identické zapojenie), avšak riadenie prúdových zdrojov je podmienené charakteristikou zaťaženia a do obvodu dodávajú záporný striedavý prúd, čiže sa správajú ako spotrebič.

E. Blok merania

Blok merania, označený ako Measuring, je najdôležitejším komponentom modelu. Do bloku merania vstupuje množstvo elektrických i neelektrických veličín v podobe ich amplitúd. Meranie elektrických veličín prebieha trojfázovo, ale z dôvodu zapojenia súmerných trojfázových zdrojov napätia, resp. prúdu a súmernej trojfázovej záťaže, vidíme v jednotlivých grafoch iba amplitúdu jednej fázy, nakoľko sa vzájomne prekrývajú. Samotný priebeh meraných veličín je možné sledovať v reálnom čase počas simulácie prostredníctvom bloku Scope. Vybrané dôležité veličiny sú automaticky ukladané do súborov formátu .mat, ktoré využívame pri vykresľovaní grafických priebehov pomocou zdrojového kódu v Matlab-e.

F. Blok diesel-generátora

Model bloku diesel-generátora pozostáva zo štandardných blokov, ktoré sú súčasťou knižnice Simulink, konkrétne zo synchronného generátora s vyjadrenými pólmi, budiaceho systému, bloku, ktorý kontroluje synchronné otáčky (PID regulátor) a transformátora. Pomocou rotorovej rýchlosti diesel-generátora môžeme v celom modeli zaznamenávať frekvenciu v sieti.

Vstupmi bloku synchronného generátora sú mechanický vstup, konkrétne mechanický výkon P_m , a vstup pre budiace napätie s označením V_f . Samotný blok diesel generátora môže pracovať v dvoch prevádzkových režimoch a to v generátorovej a motorovej prevádzke. V prípade zápornej hodnoty mechanického výkonu z PID regulátora (Diesel Engine Governor), pracuje diesel-generátor v motorickej prevádzke a naopak, v prípade kladnej hodnoty na mechanickom vstupe pracuje v generátorovom režime.

Výstupom synchronného generátora je trojfázové napätie, ktoré je vyvedené do bloku transformátora a merací výstup, pomocou ktorého zaznamenávame veľkosť statorového napätia ako spätnú väzbu pre blok budiaceho systému a rotorovú rýchlosť pre PID regulátor, ktorý udržiava synchronné otáčky.

III. SIMULÁCIA MODELU OFF-GRID A ON-GRID SYSTÉMU

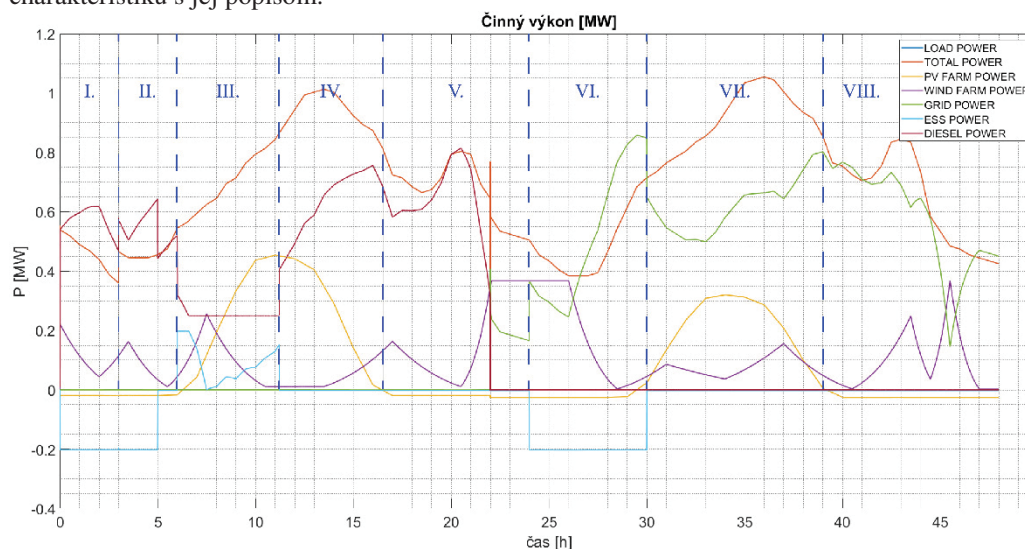
A. On-grid systém

On-grid systém bol odsimulovaný na modeli pri rôznych konfiguráciách zapojenia, kde bolo analyzované správanie sa prosumera z pohľadu prechodných stavov a kvalitatívnych ukazovateľov.

V danej simulácii bolo cieľom odsimulovať činnosť on-grid systému elektrickej siete, ktorá je prepojená v uzle M1 s DS podľa obr. 1. V prípade prebytku výkonu na strane prosumera je výkon dodávaný do DS za účelom dodávky, resp. predaja elektrickej energie a naopak, v prípade nedostatku výkonu, na pokrytie zaťaženia, je potrebný výkon odoberaný z DS. Výstupmi simulácie boli priebehy činných a jalových výkonov, priebehy napätia a prúdu, frekvenčná charakteristika, výpočet spotrebovanej/dodanej elektrickej energie, v prípade VE aj natočenie lopatiek, rotorová rýchlosť turbíny a rýchlosť vetra.

B. Off-grid systém

V danej simulácii bolo cieľom ukázať činnosť off-grid systému (model totožný s obr. 1 bez DS), kde predpokladáme, že v 22. hodine došlo k poruche na diesel-generátore. Chýbajúci výkon v sieti bol zabezpečený pripojením off-grid systému k DS. Nižšie, na obr. 2, môžeme vidieť priebeh činných výkonov s následným popisom prechodných stavov a na obr. 3 frekvenčnú charakteristiku s jej popisom.



Obr. 2 Priebeh činných výkonov pre danú simuláciu

Na začiatku I. intervalu prebieha nabíjanie ESS (počiatočná úroveň SOC = 40 %) v čase nízkej tarify. Na pokrytie zaťaženia sa podieľa hlavne diesel-generátor spolu s veternou turbínou. V II. intervale v 3. hodine došlo k pripojeniu záťaže v podobe asynchrónneho motora s výkonom 100 kW a v 5. hodine k ukončeniu nabíjania ESS (SOC = 95 %). V III. intervale začína svoju činnosť ESS, čím znižuje podiel dodávaného výkonu diesel-generátora až do 11. hodiny. V danom intervale taktiež začína do siete dodávať výkon aj VE. V IV. intervale došlo k odpojeniu ESS z dôvodu vyčerpania menovitej kapacity (úroveň SOC = 10 %), regulácia činného výkonu v sieti je zabezpečená prostredníctvom diesel-generátora. V V. intervale ukončila svoju činnosť aj FVE, na pokrytie zaťaženia slúži iba výkon z VE a diesel-generátora. V 22. hodine došlo k poruche na diesel-generátore, v dôsledku čoho muselo dôjsť k jeho odpojeniu. Chýbajúci výkon v off-grid sieti nemohol byť nahradený žiadnym dostupným zdrojom, ktorý je súčasťou tohto systému. Preto došlo k pripojeniu off-grid siete k DS, čím sa zabezpečila dodávka výkonu bez prerušenia. V uzloch off-grid siete to spôsobilo nárast napätia z hodnoty 21,7 kV na hodnotu 23,5 kV. VI. interval je charakteristický nabíjaním ESS v čase od polnoci do 6. hodiny 2. dňa, kde došlo k jeho odpojeniu. V VII. intervale začína dodávať výkon FVE. Špičkový výkon, približne 0,3 MW, dosiahne v 34. hodine, avšak oproti 1. dňu ide o pokles výroby, čo je dané vstupnou charakteristikou slnečného žiarenia. V poslednom VIII. intervale FVE prestáva dodávať do siete výkon, na pokrytie zaťaženia sa podieľa predovšetkým výkon dodávaný z DS. Za celý sledovaný úsek bolo najviac elektrickej energie dodanej z DS v celkovom množstve 14,32 MWh, následne diesel-generátorom, 11,6 MWh. Celkovo bolo spotrebovanej elektrickej energie v objeme 33,36 MWh.

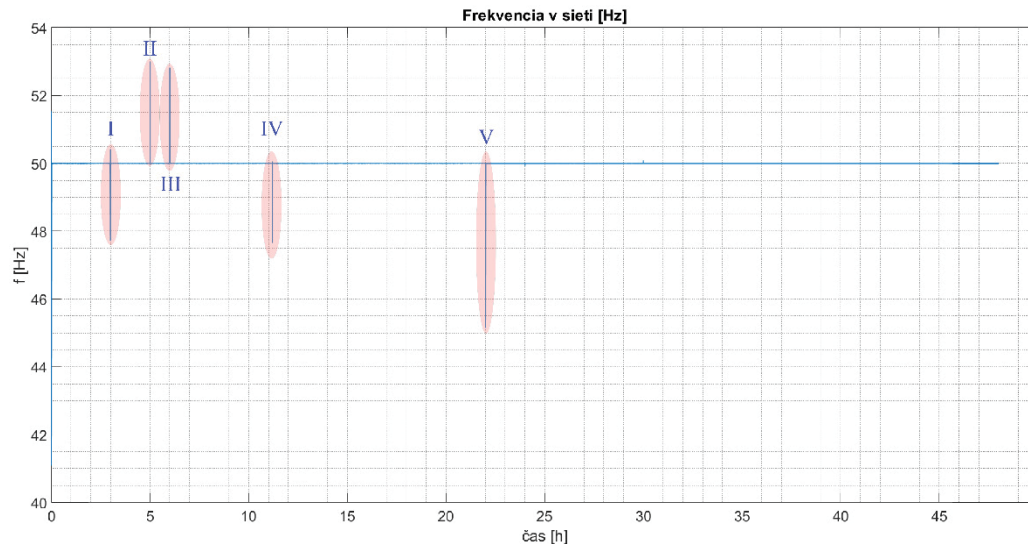
Tabuľka 1
Spotrebovaná, resp. dodávaná elektrická energia pre danú simuláciu

W [MWh]	LOAD	TOTAL	ESS	GRID	PV FARM	WIND FARM	DIESEL
W_{IN}	33,36	0,00	-2,30	0,00	-0,61	0,00	0,00
W_{OUT}	0,00	33,36	0,46	14,32	4,66	5,24	11,60

kde: W_{IN} je elektrická energia spotrebovaná záťažou, resp. vo forme strát.

W_{OUT} je elektrická energia dodávaná výrobnými jednotkami.

TOTAL je elektrická energia vyrobená všetkými výrobnými jednotkami.



Obr. 3 Frekvenčná charakteristika v sieti

Popis frekvenčnej charakteristiky v sieti:

I. – pokles frekvencie pod nominálnu hodnotu f_n na úroveň 47,75 Hz je spôsobený pripojením asynchrónneho motora s nominálnym výkonom $P_n = 100$ kW, k vyregulovaniu siete došlo zvýšením dodávky výkonu diesel-generátorom.

II. – zvýšenie frekvencie nad nominálnu hodnotu f_n na úroveň 53 Hz je spôsobené odpojením záťaže, resp. ukončením nabíjania ESS.

III. – zvýšenie frekvencie nad nominálnu hodnotu f_n na hodnotu 52,8 Hz opäť spôsobené činnosťou ESS, ale už nie ako spotrebič, ale dodávkou činného výkonu.

IV. – k poklesu frekvencie na úroveň 47,65 Hz došlo odpojením ESS, nakoľko hladina SOC ESS dosiahla svoje minimum (SOC = 10 %).

V. – pokles frekvencie na hodnotu 45,15 Hz spôsobený poruchou diesel-generátora (odpojenie v čase 22 hod.), vyregulovanie siete zabezpečené pripojením off-grid systému k distribučnej sústave.

V rámci simulačného obdobia bolo z OZE vyrobené 27,85 % elektrickej energie, prevažná časť elektrickej energie bola dodaná z DS a diesel generátorom.

IV. ZÁVER

Predkladaný článok popisuje činnosť modelu off-grid a on-grid systému elektrickej siete vytvoreného v programe Simulink (Matlab). Na analýzu správania sa prosumerov bol vytvorený model, ktorý pozostával zo zapojenia veternej elektrárne, fotovoltickej elektrárne, systému na uskladnenie elektrickej energie (ESS), záťaže (dynamickej, statickej) a distribučnej sústavy.

Pre off-grid systém bol vytvorený samostatný model, ktorý pozostával z rovnakých komponentov ako zapojenie on-grid systému doplnený o diesel generátor, ako hlavný regulačný člen činného výkonu a frekvencie v danom systéme. V rámci danej simulácie sme taktiež otestovali reakciu systému na poruchu na diesel-generátore s následným prířazovaním off-grid systému elektrickej siete k distribučnej sústave, aby bolo možné porovnať dané systémy v rámci jednej simulácie.

V rámci modelov je možné analyzovať off-grid, resp. on-grid elektrické siete pri dlhšom časovom rozmedzí, možnosť pridať nové zdroje akumulácie, napr. prečerpávaciu vodnú elektrárňu na podklade ESS, prispôbiť model vlastným potrebám.

Z pohľadu hodnotenia kvality elektrickej energie podľa STN EN 50160 (33 0121) pre NN a VN môžeme zhodnotiť, že v celej prepojenej elektrickej sieti pri pripájaní, resp. odpájaní záťaže alebo výrobnjej jednotky, nedošlo k žiadnym nebezpečným javom a z pohľadu najdôležitejších kvalitatívnych ukazovateľov, t.j. napätia a frekvencie, boli dodržané v dovolených medziach. Z frekvenčných charakteristík môžeme posúdiť, že v prípade systému off-grid siete pri spínaní záťaže v podobe asynchrónneho motora, či ESS pri nabíjaní, resp. vybíjaní, došlo k oveľa výraznejším odchýlkam frekvencie, čo nie je v prípade takéhoto systému nič výnimočné. V rámci on-grid systému pri všetkých prípadových simuláciách boli odchýlky frekvencie pri regulácii činného výkonu rádovo v desatinách a neprekročili $\pm 0,5$ Hz ani v jednom simulovanom prípade.

Pri modelovaní jednotlivých prípadových simulácií sme narazili na množstvo problémov, napr. v prípade modelu veternej elektrárne, ktorý výrazne spomaľuje danú simuláciu a taktiež predlžuje čas pri výpočtoch v Matlab-e. Z tohto dôvodu bolo nutné použiť zidealizované vstupné charakteristiky slnečného žiarenia, rýchlosti vetra a charakteristiku zaťaženia. V prípade simulácie bez VE je simulačný čas rádovo v sekundách, s použitím do 1 hodiny. Dané modely off-grid a on-grid elektrickej siete je možné aplikovať pri reálnych modelových situáciách, lenže je nutné počítať s výrazne dlhším simulačným časom.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a SAV podporennej grantom VEGA 1/0372/18.

LITERATÚRA

- [1] Kudelas, D., Rybár, R., Cehlár, M., „*Energia vetra*“. Košice: Edičné stredisko Fakulty FBERG, TU v Košiciach, 2009. 216 s. ISBN: 978-80-553-0169-3.
- [2] Hpower, „*Solárne panely*“ [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: < https://www.hpower.sk/solarne_panely/ >
- [3] Quachning, V., „*Obnoviteľné zdroje energií*“, Praha: Grada Publishing, a.s., 2010. 296 s. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [4] Sapi, „*Fotovoltaika na Slovensku*“ [online]. 2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: < <https://www.sapi.sk/fotovoltaika-na-slovensku> >
- [5] IRENA, „*Solar Energy Data*“ [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: < <https://www.irena.org/solar> >
- [6] Kudelas, D., Rybár, R., Cehlár, M., „*Energia vetra*“, Košice: Edičné stredisko Fakulty FBERG, TU v Košiciach, 2009. 216 s. ISBN: 978-80-553-0169-3.
- [7] STN EN 50160: 2011, „*Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej elektrickej siete*“, Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2010.
- [8] Kiseľ, T., „*Analýza správania sa prosumerov v elektrickej sieti*“. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2020.