

Dušan Medveď, Michal Kolcun, Jaroslav Petráš, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

Modelovanie off-grid siete s fotovoltaickými zdrojmi

Tento príspevok sa zaoberá modelovaním a analýzou off-grid elektrických sietí. K modelovaniu off-grid sietí bola použitá knižnica Simscape Power Systems, ktorá je súčasťou programu Simulink. Model off-grid siete obsahuje výrobu elektrickej energie pomocou dieselových generátorov, fotovoltaických panelov a veternej turbíny, spotrebu elektrickej energie a meranie základných elektrických veličín. Bol analyzovaný vplyv rôznych prevádzkových stavov na namodelovanú off-grid sieť, akými sú pripojenie záťaže, odpojenie záťaže, zmena účinníka záťaže, a zmeny klimatických podmienok pôsobiacich na výrobu elektrickej energie pomocou fotovoltaického poľa a veternej turbíny.

Kľúčové slová: off-grid sieť, Simscape Power System, diesलगенератор, fotovoltaické pole, veterná turbína

This paper deals with the modeling and analysis of off-grid electrical networks. The library of Simscape Power Systems, part of the Simulink program, was used to model off-grid networks. The off-grid model includes electricity generation using diesel generators, photovoltaic panels and wind turbines, power consumption and basic electrical measurements. The impact of the different operating states on the modeled off-grid network were analyzed, such as load coupling, load disconnection, load balancing, and changing of climatic conditions for photovoltaic panels and wind turbine.

Keywords: off-grid network, Simscape Power Systems, diesel generator, photovoltaic panels, wind turbine

I. ÚVOD

V tomto príspevku sú prezentované výsledky simulácie vplyvu rôznych zdrojov elektrickej energie na malú off-grid sieť. Ako zdroje elektrickej energie boli použité diesलगенераторы, fotovoltaické zdroje a veterná turbína. Z pohľadu spotreby elektrickej energie je opísaný vplyv odpojenia alebo pripojenia veľkej záťaže do sústavy a vplyv dynamicky meniacej sa záťaže. Simulovaných bolo viacero obvodov, v ktorých sa overovali niektoré javy vyskytujúce sa v sieti. Medzi hlavné sledované veličiny patrila frekvencia siete, napätie v mieste odberu a vyrábaný výkon elektrickými zdrojmi.

Na simulovanie týchto javov bolo použité prostredie Simscape Power Systems, ktoré je rozšírením programu Matlab Simulink. Na základe rozboru simulácií bolo navrhnuté jednoduché riešenie na zníženie vplyvu prechodných javov. Nakoľko boli simulované prechodné javy krátko charakteru, t.j. trvajú krátku dobu, navrhnuté simulácie simulujú časové pásmo do 1000 sekúnd, čo predstavovalo cca 17 minút. Krátky časový úsek bol zvolený aj z dôvodu, aby výsledky, ktoré sú zapísané v maticiach, mali určitú presnosť a aby ich bolo možné spracovať so súčasnou bežnou výpočtovou technikou.

Ako podklad pre uvedené úvahy boli použité správy od technikov zapojených do združenia IEEE, čo je najväčšia celosvetová organizácia zaoberajúca sa pokrokom v technologickom svete.

II. POPIS MODELU SIETE V PROSTREDÍ SIMSCAPE POWER SYSTEMS

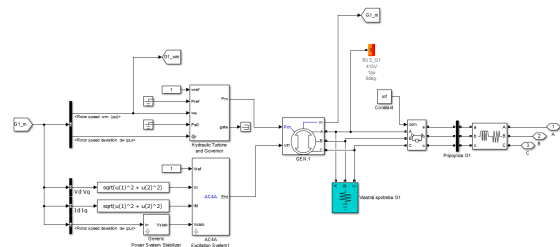
Napájacie zdroje

V prostredí Simscape Power System je naimplementovaných viacero elektrických strojov. Mnohé tieto elektrické stroje môžu pracovať v dvoch stavoch – ako generátory elektrickej energie alebo ako motory, teda ako spotrebiče elektrickej energie [1], [2].

Pre tento príspevok bol použitý model synchronného stroja s vyjadrenými pólmí. Synchronný generátor je riadený hydraulickou turbínou kombinovanou s PID riadiacim systémom a vybudený AC4A budiacim systémom. Princiálnu schému zapojenia generátora G1

s riadiacim a budiacim systémom a s vyvedením výkonu z generátora je možné vidieť na obr. 1.

Napájanie systému zabezpečuje trojfázový zdroj „Three-Phase Source block“ na strane vvn, ktorý je v zapojení „do hviezdy“ s priamo uzemneným neutrálnym bodom. Tento blok predstavuje napájanie uvažovanej 22 kV siete v elektrickej stanici z nadradenej 110 kV distribučnej siete. Nastavenie parametrov je zobrazené na Obr. 1.



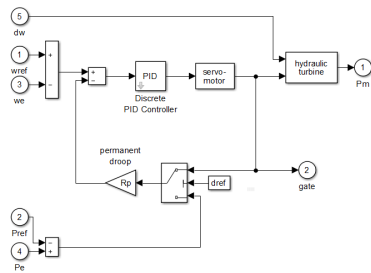
Obr. 1. Princiálna schéma zapojenia generátora G1

Výstupom synchronného generátora je trojfázové napätie na svorkách stroja A, B a C a merací výstup označený písmenom *m*. Merací výstup obsahuje vektor s nameranými signálmi: statorové prúdy, statorové napätia, odchýlku rotorového uhla, rotorová rýchlosť, elektromagnetický krútiaci moment, výstupný činný výkon *P*, výstupný jalový výkon *Q* a pod. Týmito signálmi sa dostáva spätná väzba od generátora, ktorá je privedená na vstup budiaceho vinutia a hydraulickú turbínu s riadením. Štítkové údaje simulovaného generátora sú uvedené v Tab. I.

TABUĽKA I
Štítkové údaje simulovaného generátora

P_n	250 kW	reaktancie [pu]			
		x_d	2,84	x_q	2,44
V_n	415 V	x_d'	0,18	x_q'	0,36
f_n	50 Hz	x_d''	0,13	x_q''	0,09
statorová rezistancia R_s [pu]					0,0259375
koeficient zotrvačnosti H [s]					3,2
koeficient trenia F [pu]					0,01579
počet pólových dvojíc p [-]					2

Na Obr. 2 je uvedený model hydraulického turbíny s PID riadením. Tento model má 5 vstupov a 2 výstupy. Medzi vstupy patrí referenčná rýchlosť, okamžitá mechanická rýchlosť, odchýlka rýchlosti, referenčný výkon a okamžitý elektrický výkon. Výstupom je mechanický výkon P_m , ktorý je zároveň vstupom pre synchronný generátor. V predmetnom modeli bola nastavená referenčná rýchlosť $\omega_{ref} = 1$ pu a zapojené vstupy okamžitej mechanickej rýchlosti ω_e a odchýlky rýchlosti $\Delta\omega$. Táto regulácia zabezpečuje, vyregulovanie synchronného generátora na nominálnu frekvenciu $f_n = 50$ Hz. Vstupy referenčného mechanickeho výkonu P_{ref} a okamžitého elektrického výkonu P_{e0} sú nezapojené. Obvod je nastavený tak, aby neuvážoval spätnú väzbu (ani spätnú väzbu z výstupu *gate*). Tým bolo dosiahnuté, že výkon turbíny bol riadený len na základe otáčok rotora [4].



Obr. 2. Schéma hydraulického turbíny s PID riadením

Ako budiaci systém bol použitý AC4A budiaci systém, ktorý predstavuje budiaci systém s tyristorovým usmerňovačom pre striedavý alternátor. Budiaci systém generuje budiace napätie, ktoré je výstupom tohto modelu.

Vyvedenie výkonu z generátora do siete je tvorené trojfázovým vypínačom a prípojnou, na ktorej prebieha meranie svorkového napätia a dodávaného prúdu do siete. Za týmito svorkami sa nachádza vedenie, simulované rezistanciou R a indukčnosťou L . Spomínané vyvedenie výkonu je zobrazené na Obr. 1. Na svorkách generátora je napojená vlastná spotreba generátora, ktorá sa skladá z činnnej záťaže o veľkosti $P = 12,5$ kW. Táto záťaž bola použitá z dôvodu, že synchronný generátor simulovaný ako prúdový zdroj nemôže byť v sérii s indukčným elementom trojfázového vedenia, s ktorým je generátor pripojený do siete.

Fotovoltaické pole

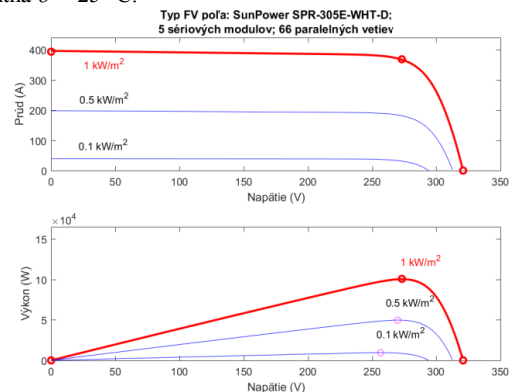
Ďalším zdrojom elektrickej energie, ktorý bol naimplementovaný v tomto príspevku, boli FV panely. Na simulovanie FV panelov sa nachádza v Simscape Power Systems blok s označením „PV array“. Bol zvolený fotovoltaický panel značky LG Electronics LG300N1-G3. Štítkové údaje modelovaného FV modulu sú uvedené v Tab. II.

TABUĽKA II
Modulové údaje pre fotovoltaický panel

Modulové údaje FV panela: LG Electronics LG300N1C-G3			
Max výkon (W)	305,226	Počet buniek v module (Ncell)	96
Napätie naprázdno V_{oc} [V]	64,2	Prúd nakrátko [A]	5,96
Napätie pri max výkone V_{mp} [V]	54,7	Prúd pri max. výkone I_{mp} [A]	5,58
teplotný koeficient pre V_{oc} [%/°C]	-0,273	teplotný koeficient pre I_{sc} [%/°C]	0,062

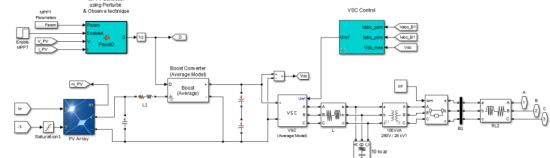
V nastavení bloku „PV array“ boli FV panely spojené do poľa, ktoré obsahuje 66 paralelných reťazcov, ktoré obsluhujú 5 modulov zapojených do série. Blok „PV array“ má 2 vstupy. Prvým vstupom je

slnéne žiarenie udávané vo wattoch na m^2 [$W \cdot m^{-2}$], druhým vstupom je teplota bunky FV panela udávaná v Celziových stupňoch [°C]. Výstup bloku „PV array“ je jednosmerné napätie a merací port m , ktorý obsahuje napätie a prúd FV článku, diódový prúd, slnečné žiarenie a teplotu FV panela. Údaje o slnečnom žiarení a teplote solárneho článku panela boli do programu načítané z textového súboru. Na Obr. 3 je znázornená $I-V$ a $P-V$ charakteristika pre navrhnuté FV pole, pri slnečnom žiarení pri troch rôznych intenzitách: $1000 W \cdot m^{-2}$, $500 W \cdot m^{-2}$ a $100 W \cdot m^{-2}$, keď teplota FV panela je konštantná $\vartheta = 25$ °C.



Obr. 3. $I-V$ a $P-V$ Charakteristika pre FV pole pri rôznom slnečnom žiarení

Vyvedenie výkonu z fotovoltaického poľa je zobrazené na Obr. 4. Jednosmerný prúd, ktorý je generovaný FV panelmi, je ovládaný DC-DC zosilňovačím meničom, na ktorý pôsobí MPPT regulátor. Následne je prúd menený na striedavý v riadenom trojfázovom VSC usmerňovači, ku ktorému patrí aj tlmivka striedača RL , kapacitný filter C a transformátor TR1. Výkon je vyvedený cez trojfázový vypínač, ktorý je v základnej polohe zopnutý. Blok $RL2$ predstavuje vedenie, ktorým je FV pole spojené so sieťou. Uvedený model bol prevzatý a modifikovaný pre potreby tohto príspevku z príkladových modelov od spoločnosti MathWorks [5], [6].

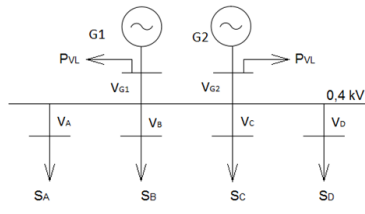


Obr. 4. Vyvedenie výkonu z fotovoltaických panelov

Veterná turbína

Blok veternej turbíny s vyvedením výkonu do siete je podstatne jednoduchší ako blok s FV poľom. Vstupom pre veternú turbínu je rýchlosť vetra udávanom v $m \cdot s^{-1}$ a „Trip konektor“. Rýchlosť vetra pre tento model bol načítavaný z textového súboru. Trip konektor slúži na simulovanie ochranného systému turbíny. Jeho vstupom môže byť logická nula, respektíve jednotka. Ak je na vstupe logická nula, veterná turbína je v prevádzke a ak je vstupom jednotka, turbína bola odpojená. Veterná turbína môže mať viacero ochrán. V prvom rade sa jedná o odpojenie veternej turbíny pri pomalom/rýchlom vetre, ale aj o nadprúdovú ochranu, podpäťovú ochranu, nadpäťovú ochranu, alebo ochrany, pôsobiace pri nevyváženom prúde, napätí.

Výstupom veternej turbíny je merací port, ktorý obsahuje napätie a prúd na svorkách turbíny A, B a C, výkon turbíny P a Q , rýchlosť rotora turbíny, mechanicke krútiaci moment a pod. Veterná turbína, ktorá bola použitá v tomto príspevku, obsahuje okrem turbíny aj asynchronný motor, ktorý generuje vyrobenú elektrickú energiu. Na



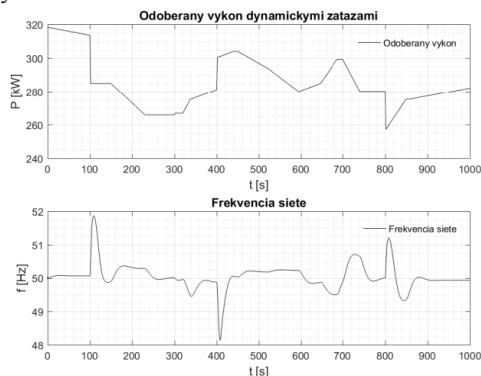
Obr. 9. Schéma modelu ustálenej siete

TABUĽKA III
Odbery pre simuláciu ustálenej off-grid siete

	U [V]	odoberaný výkon	účinník $\cos \varphi$	Vedenie	
				R [Ω]	L [μH]
G1, Vlastná spotreba	400	12,5 kW	1	0,0025	11,27
G2, Vlastná spotreba	400	12,5 kW	1	0,0025	11,27
Odber A	400	100 kVA	0,95	0,0402	71,1
Odber B	400	140 kVA	0,95	0,0268	47,4
Odber C	400	180 kVA	0,95	0,0134	23,7
Odber D	400	0	0,95	0,067	118,5

Model off-grid siete s dynamickou záťažou

V tejto časti simulácie bol pozmenený model záťaží. Namiesto záťaží modelovaných konštantnou hodnotou boli použité dynamické záťaže, ktoré boli ovládané externým vstupom. Fungovanie dynamických záťaží je popísané v predchádzajúcej kapitole v časti „Záťaž“. Počas týchto simulácií boli použité opäť dva generátory s nominálnym výkonom 250 kVA a 4 záťaže A, B, C a D, v ktorých boli merané hodnoty fázového napätia a prúdu vo fáze L1 a výkon odoberaný vo fáze L1.



Obr. 10. Odozva frekvencie siete na odoberaný výkon

Na Obr. 10 je uvedený odoberaný výkon dynamickými záťažami. K celkovému odoberanému výkonu je potrebné pripočítať parazitné odbery, teda odbery vlastnej spotreby generátorov ($2 \times 12,5$ kW) a parazitné odbery k dynamickým odberom ($3 \times 9,5$ kW + $4,75$ kW), ktoré sú čisto odporového charakteru. Tieto parazitné záťaže sú v sústave z dôvodu, že dynamické záťaže a synchronné generátory nemôžu byť v sérii s indukčným elementom trojfázových vedení. Tie sú popísané RL parametrami, uvedenými v Tab. IV.

TABUĽKA IV
Rezistencia a indukčnosť vedení v simuláciách s dynamickou záťažou

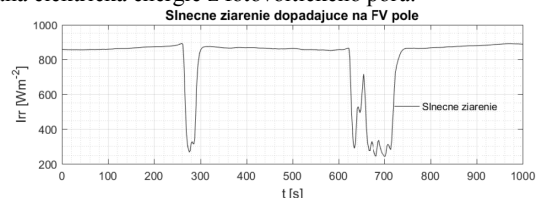
	R [Ω]	L [μH]
G1	0,0025	11,27
G2	0,0025	11,27
A	0,2010	355,50
B	0,0268	47,40
C	0,0134	23,70
D	0,0670	118,50
FV	0,0099	45,10
VET	0,0099	45,10

Pri plynulom poklese, resp. vzraste odoberaného výkonu, bolo pozorované, že regulátory synchronných generátorov zareagujú na tieto zmeny a dôjde k zníženiu, resp. zvýšeniu produkovaného výkonu synchronnými generátormi, ale nedôjde k vyregulovaniu frekvencie na nominálnu hodnotu $f_n = 50$ Hz. Frekvencia siete tak bude vzhľadom na rýchlosť poklesu/vzrastu odoberaného výkonu krátkodobou ustálená na inej hodnote v blízkosti nominálnej frekvencie. Túto skutočnosť je možné vidieť aj na Obr. 10. Napríklad v čase od 478 s do času 595 s bola frekvencia siete ustálená okolo hodnoty 50,2 Hz. V čase od 900 s do času 1000 s bola frekvencia siete ustálená na hodnotách v rozmedzí 49,93 až 49,95 Hz.

Model off-grid siete s fotovoltaickým poľom

Vo svete je tendencia k off-grid sieťam, ktoré sú napájané čisto dieselovými generátormi, inštalovať obnoviteľné zdroje elektrickej energie, čím sa zníži spotreba nafty v dieselových generátoroch. Preto boli v predmetnom modeli k simulovanej off-grid sieti pripojené fotovoltaické panely s celkovým špičkovým výkonom 100 kW.

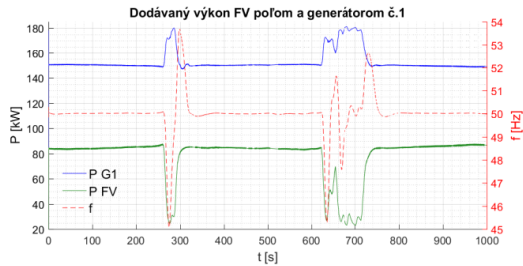
Na Obr. 11 je znázornené slnečné žiarenie dopadajúce na fotovoltaické pole v závislosti od času. Na začiatku simulácie, teda v čase $t = 0$ s, bolo slnečné žiarenie dopadajúce na FV pole o veľkosti $857,4993 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. V čase $t = 276$ s pokleslo slnečné žiarenie na hodnotu $266,2146 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, čo je prvým minimom testovaného slnečného žiarenia. V čase $t = 700$ s dochádza k druhému minimu slnečného žiarenia o veľkosti $242,5764 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Oba poklesy slnečného žiarenia vznikli v dôsledku zvýšenej oblačnosti. Teplota fotovoltaického článku sa pohybovala okolo 27°C . Tieto údaje boli namerané v auguste 2013 v rámci hybridného fotovoltaického systému, ktorý prevádzkuje Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach. Predstavujú tak skutočné údaje v podmienkach, pri ktorých je vyrábaná elektrická energia z fotovoltaického poľa.



Obr. 11. Slnečné žiarenie dopadajúce na FV pole

Off-grid sieť s FV poľom a konštantnou spotrebou

Aby bolo najlepšie vidieť odozvu siete na náhly pokles vyrobeného výkonu z FV poľa, pri simulácii s FV poľom boli nastavené konštantné hodnoty záťaží. V tomto prípade sa výkon vyrábaný dieselovými generátormi prispôboval vyrobenému výkonu z FV poľa. Na Obr. 12 je znázornená odozva FV poľa na testované klimatické podmienky, ktoré boli uvedené na Obr. 11. Zároveň je na Obr. 12 znázornená odozva generátora č.1. Generátory č.1 a č.2 sú zapojené sériovo a generátor č.2 vyrába rovnaký výkon ako generátor č.1. Teda, keď vplyvom meteorologických podmienok poklesol vyrábaný výkon z FV poľa o 60 kW, obidva generátory zvýšili svoj výkon o 30 kW.

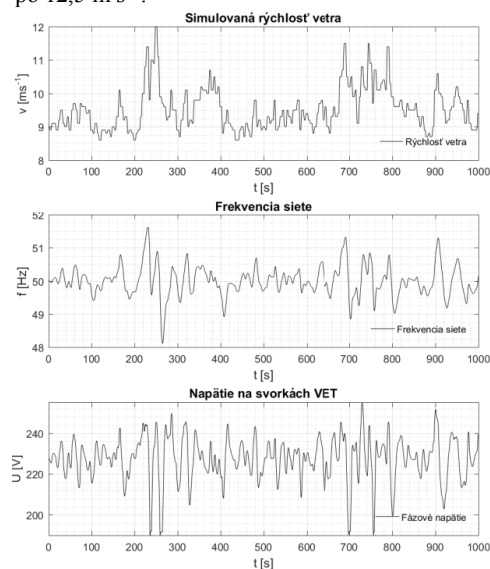


Obr. 12. Priebeh frekvencie siete a dodávaného výkonu FV poľom a generátorom č. 1

Z uvedenej simulácie vyplýva, že FV pole síce dokáže vyrábať pomerne veľký výkon, avšak vplyvom zvýšenej oblačnosti môže dôjsť ku krátkodobým výpadkom vo vyrábanom výkone z FV poľa. Simulácia off-grid siete bola realizovaná bez akýchkoľvek pridaných regulátorov, ktoré by riadili sieť na strane záťaží. Ak by takto bola prevádzkovaná off-grid sieť, je pravdepodobné, že kvalita a spoľahlivosť dodávky elektrickej energie by bola obmedzená. V uvedenej simulácii klesla frekvencia siete z 50 Hz až pod hodnotu 46 Hz. Dieselové generátory sú síce schopné pracovať v širokom frekvenčnom pásme, no takýto rýchly pokles frekvencie by mohol byť pre niektoré zariadenia v sústave rizikový.

Model off-grid siete s veternou turbínou, na ktorú pôsobí dynamická rýchlosťou vetra

Na simuláciu obvodu s nárazovým vetrom bol použitý priebeh vetra, ktorý je vyobrazený na Obr. 13. Priebeh vetra, načítavaný z textového súboru, mal v čase $t = 0$ s hodnotu 9 m s^{-1} , čo je nominálny vietor pre použitú veternú turbínu. Následne priebeh vetra kolíše okolo tejto nominálnej hodnoty. Vietor dosiahne maximálnu hodnotu 12 m s^{-1} . Veterná turbína pracuje s vetrom v rozmedzí od $4,5 \text{ m s}^{-1}$ po $12,5 \text{ m s}^{-1}$.



Obr. 13. Priebeh simulovaného vetra

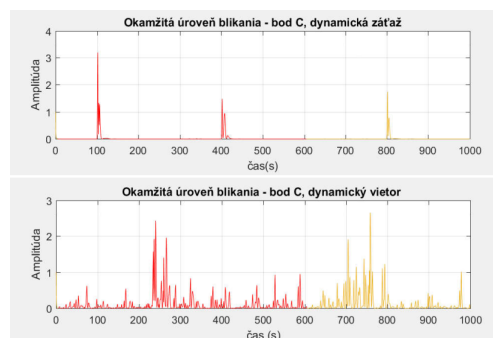
Keďže simulovaná veterná turbína nemala žiadny stabilizačný mechanizmus, dodávaný činný výkon turbíny tiež kolísal okolo nominálnej hodnoty. To sa negatívne prejavilo na frekvencii siete a napätí. Keďže simulovaná off-grid sieť je malých rozmerov, kolísanie napätia sa prejavilo vo všetkých štyroch odberoch A, B C a D. Frekvencia siete a napätie na svorkách veternej turbíny sú znázornené na Obr. 12. Z Obr. 12 je možné vidieť, že už pri malých

zmenách vetra stúpla frekvencia nad hodnotu 51 Hz, respektíve klesla pod hodnotu 49 Hz. Napätie na svorkách veternej turbíny kolísalo. Pri prudkej zmene vetra napätie presiahlo hodnotu 250 V, resp. kleslo k hodnote 190 V. Vzhľadom na to, že kolísanie napätia bolo pomerne značné, bol pripojený digitálny flickermeter v bodoch A, B, C a D a v bode pripojenia veternej turbíny.

Meranie flicker efektu v sieti s veternou turbínou

V predchádzajúcej časti „Veterná turbína“ bol uvedený popis prevádzky off-grid siete s veternou turbínou, na ktorú pôsobil dynamický vietor. Aby bolo možné zistiť, aký je flicker efekt v spomínanej sieti, bol pridaný v bodoch A, B, C a D digitálny flickermeter, ktorým sa zistila krátkodobá miera vnemu flickra, ktorá je počítaná v čase simulácie od 5 do 605 s, čo predstavuje desaťminútový časový úsek. V Tab. V je uvedená nameraná krátkodobá miera vnemu flickra a spriemerované percentily. Najmenšia miera krátkodobého vnemu flickra bola v simulácii s konštantnou rýchlosťou vetra 9 m s^{-1} a s dynamickou záťažou. Naopak najväčšia krátkodobá miera vnemu flickra bola v simulácii s dynamickou rýchlosťou vetra a s dynamickou záťažou. Limitujúcou hodnotou pre krátkodobú mieru vnemu flickra bola hodnota 1, pre dlhodobú mieru vnemu flickra (pre 2-hodinový čas) hodnota 0,65. Z nameraných výsledkov je možné konštatovať, že krátkodobá miera vnemu flickra bola v súlade s normou STN EN 50160.

Na Obr. 14 je znázornená nameraná okamžitá úroveň flicker efektu v odbernom bode C pre simuláciu s dynamickou záťažou (Obr. 10) a simuláciu s dynamickým vetrom (Obr. 13). Z Obr. 14 je zrejmé, že efekt blikania v prípade simulácie s dynamickou záťažou sa prejavil v čase, keď bola v sieti pripojená alebo odpojená záťaž. Prejavilo sa to napríklad v čase $t_1 = 100$ s, kedy bola v odbernom bode B odpojená záťaž 30 kVA, v čase $t_2 = 400$ s, kedy bola pripojená v odbernom bode C záťaž 20 kVA a v čase $t_3 = 800$ s, kedy bola odpojená záťaž z odberného bodu C 20 kVA. V prípade, že na veternú turbínu pôsobí dynamický vietor, opísaný na Obr. 13, bude sa nameraná okamžitá úroveň flicker efektu javiť ako stochastický šum.



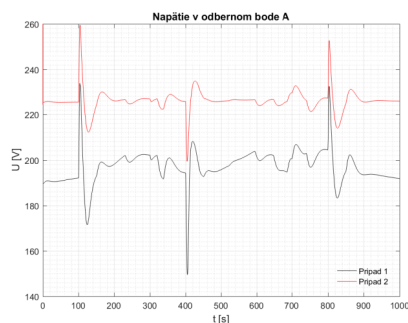
Obr. 14. Nameraná okamžitá úroveň flicker efektu

V Tab. V je uvedená krátkodobá miera vnemu flickra pre odberné body A, B, C a D a pre bod na svorkách veternej turbíny. Zvláštnosťou týchto výsledkov je, že v každej simulovanej schéme bola v odbernom bode A nameraná najväčšia miera krátkodobého vnemu flickra. Je to z dôvodu, že bod A je napájaný vedením, ktorého rezistencia a reaktancia je omnoho väčšia ako vedení spájajúce ostatné body (Tab. IV). Napätie v bode A bolo v týchto simuláciách ustálené na hodnote $U = 189,6 \text{ V}$ (v reálnych podmienkach by bolo tak nízke napätie problémom pre činnosť mnohých prístrojov).

TABULKA V
Nameraný flicker efekt v simulovanej sieti

		$P_{0.1s}$	P_{1s}	P_{3s}	P_{10s}	P_{50s}	P_{st}
WT simulácia, Dynamická rýchlosť vetra, Dynamická záťaž	Bod A	7,94444	2,29646	1,09671	0,364422	0,043251	0,739981
	Bod B	4,42942	1,38709	0,654338	0,225327	0,025813	0,565732
	Bod C	4,12629	1,33554	0,640592	0,221686	0,025551	0,553068
	Bod D	4,28825	1,38515	0,663718	0,22959	0,026457	0,563365
	Bod WT	3,90262	1,27304	0,611244	0,212224	0,024508	0,539369
WT simulácia, Dynamická rýchlosť vetra, Konštantná záťaž	Bod A	4,76669	2,50239	1,21876	0,547187	0,068989	0,721009
	Bod B	2,29082	1,2644	0,642569	0,286289	0,037393	0,5135
	Bod C	2,18987	1,20936	0,615162	0,273998	0,035838	0,502251
	Bod D	2,27869	1,25794	0,63941	0,284875	0,03721	0,512195
	Bod WT	2,09109	1,15719	0,590026	0,262503	0,034409	0,491356
WT simulácia, Dynamická rýchlosť vetra, Dynamická záťaž	Bod A	4,96686	1,67448	0,38066	0,014602	0,011166	0,523317
	Bod B	3,04421	0,966101	0,218407	0,00848	0,006955	0,404461
	Bod C	2,77123	0,929307	0,212038	0,007767	0,00631	0,390405
	Bod D	2,87724	0,959631	0,21867	0,008057	0,006548	0,397332
	Bod WT	2,64433	0,879365	0,199992	0,007509	0,006025	0,380651

Aby sa znížil vplyv vedenia na nameraný flicker efekt, simulácie boli zopakované s tým rozdielom, že vedenie spájajúce odberné miesto A bolo simulované rezistanciou $R_c = 0,0134 \Omega$ a indukčnosťou $L_c = 23,7 \mu\text{H}$, ktoré spájajú odberné miesto C. Výsledky sú uvedené na Obr. 15.



Obr. 15. Napätie v simulovanej schéme pre bod A

Na Obr. 15 je uvedený priebeh napätia v odbernom bode A v ktorom bol uvažovaný konštantný vietor 9 m s^{-1} a dynamická záťaž, pre prípad 1 s pôvodným vedením, ktorého rezistencia je $R_a = 0,2010 \Omega$ a indukčnosť $L_a = 355,5 \mu\text{H}$. V prípade 2, bod A bol spojený vedením s parametrami $R_a = 0,0134 \Omega$ a $L_a = 23,7 \mu\text{H}$.

Z Obr. 15 je zrejme, že v prípade 1 dochádzalo k väčším výkyvom napätia na svorkách v odbernom bode A, ako v prípade 2. Napríklad počas odpojenia 20 kVA záťaže z odberného bodu C došlo v odbernom bode A v prípade 1 ku krátkodobému poklesu napätia z hodnoty $U_f = 194,3 \text{ V}$ na $U_f = 149,5 \text{ V}$, čo je pokles o $\Delta U = 44,8 \text{ V}$, a v prípade 2 došlo k poklesu z hodnoty $U_f = 225,7 \text{ V}$ na $U_f = 199,4 \text{ V}$, čo je pokles len o $\Delta U = 26,3 \text{ V}$. Nakoľko pri prechodných javoch dochádza k menším výkyvom napätia, výsledný flicker efekt mal nižšiu hodnotu. V testovanom prípade 2 bola hodnota krátkodobého flicker efektu v bode A rovná $P_{ST} = 0,335491$ (pôvodná hodnota, v prípade 1 bola $P_{ST} = 0,523317$).

IV. ZÁVER

Uvedený príspevok prezentuje výsledky simulácií off-grid siete s uvažovaním obnoviteľných zdrojov (FV zdroj a veterná turbína) a bez uvažovania OZE. Simulovaná off-grid sieť bola tvorená dvomi dieslegenerátormi s nominálnym výkonom 250 kW a s odbermi A, B, C a D, ktoré predstavujú 4 odberné miesta predstavujúce 4 lokality zapojené do off-grid siete. V prípade odpojenia alebo pripojenia záťaže sú generátory schopné vyregulovať sústavu tak, aby odoberaný výkon bol rovný dodávanému výkonu. Pritom však nemôže dôjsť k prekročeniu max. dodávaného výkonu generátormi. Reguláciu dieselových generátorov zabezpečovalo riadenie hydraulickéj turbíny.

Problémom off-grid sústavy s FV poľom je, že dodávaný výkon z FV poľa nie je možné regulovať. FV pole vyrába elektrickú energiu podľa aktuálnych klimatických podmienok. Preto, pri rýchlych klimatických zmenách, dochádza k rýchlej zmene vo vyrábanom výkone z FV poľa. Napríklad pri zväčšenej oblačnosti môže dôjsť k náhlemu poklesu vyrobenej elektrickej energie z FV poľa.

Zaradením veternej turbíny do off-grid siete bol pozorovaný zvýšený flicker efekt. Okrem kolísania napätia v sieti kolísala aj frekvencia siete. Veľké výkyvy frekvencie môžu mať negatívny vplyv na dieselové generátory. Flicker efekt vznikal pri odpojení, resp. pripojení záťaží, zdrojov a pri neštandardnej prevádzke off-grid siete. V týchto prípadoch treba uvažovať, ako odstrániť nepriaznivý jav blikania. Existuje viacero riešení, napríklad vystuženie siete do „tvrdej“ siete, zapojenie lineárnej tlmivky k zdroju flickera, alebo použitie dynamických napäťových stabilizátorov na báze FACTS zariadení, akými sú statický kompenzátor SVC, D-Statcom alebo iné.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Výskum charakteristik fotovoltaičných komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, s ITMS kódom: 26220220080, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Agentúra
Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR
pre štrukturálne fondy EÚ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

LITERATÚRA

- [1] International Renewable Energy Agency, „Off-grid renewable energy systems: status and methodological issues“, [online]. Available at: < https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf >.
- [2] A. H. Hajimiragha, M. R. D. Zadeh, „Research and development of a microgrid control and monitoring system for the remote community of Bella Coola“, IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, E-ISBN 978-1-4799-2775-3.
- [3] D. Medved, „Simulation in Electric Power System. A collection of exercises I“, Košice: TU Košice, 2017, 225 p., ISBN 978-80-553-3142-3.
- [4] MathWorks, „Model hydraulic turbine and proportional-integral-derivative“, [online]. Available at: < https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/hydraulic_turbine_and_governor.html >.
- [5] MathWorks, „Three-Level Bridge“, [online]. Available at: < <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threelevelbridge.html> >.
- [6] MathWorks, „Average Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array“, < <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/average-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html> >.
- [7] MathWorks, „Implement three-phase dynamic load with active power and reactive power as function of voltage or controlled from external input - Simulink“, [online]. Avail.at: < <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasedynamicload.html> >.

ADRESY AUTOROV

Ing. Dušan Medved', PhD., Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Ing. Jaroslav Petráš, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk, Jaroslav.Petrás@tuke.sk

Ing. Rastislav Stolárik, Ing. Štefan Vaško, VÁDIUM s.r.o., Plzenská 2, Prešov, Slovenská Republika, stolarik@vadium.sk, vasko@vadium.sk