# Analýza off-grid siete s obnoviteľnými zdrojmi

## Marián KLEŠČ, Dušan MEDVEĎ

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

Marian.Klesc@student.tuke.sk, Dusan.Medved@tuke.sk

*Abstrakt* — Tento príspevok sa zaoberá analýzou off-grid elektrickej siete, v ktorej sú naimplementované obnoviteľné zdroje v kombinácii s konvenčnými zdrojmi a dynamické záťaže. Pre modelovanie off-grid siete boli využité knižnice Simscape Power Systems, ktoré sú nadstavbou programu Simulink. V modeli off-grid siete sú použité pre výrobu elektrickej energie dieselové generátory, fotovoltické panely a veterná turbína a spotreba elektrickej energie je zabezpečená vhodnými statickými a dynamickými záťažami. V modeli boli merané charakteristické elektrické sieťové veličiny. Na predmetnom modeli off-grid siete bol analyzovaný vplyv rôznych prevádzkových stavov off-grid siete, akými sú napríklad pripojenie záťaže, odpojenie záťaže, zmena účinníka záťaže a zmeny klimatických podmienok, ktoré vplývajú na výrobu elektrickej energie (fotovoltický zdroj a veterná turbína).

*Kľúčové slová* — off-grid sieť, dieselgenerátor, fotovoltické pole, veterná turbína, Simscape Power Systems

### I. ÚVOD

V predmetnom príspevku sú prezentované výsledky simulácie vplyvu rôznych zdrojov elektrickej energie na malú off-grid sieť. Ako zdroje elektrickej energie boli použité dieselgenerátory, fotovoltické 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 elektrickej 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 Matab Simulink. Na základe rozboru simulácií bolo navrhnuté jednoduché riešenie na zníženie vplyvu prechodných javov. Nakoľko boli simulované prechodné javy krátkeho charakteru, t.j. trvali krátku dobu, navrhnuté simulácie simulujú časové pásmo do 1000 sekúnd, čo predstavovalo cca 17 minút. Krátky časový úsek bol zvolený aj z toho dôvodu, aby výsledky, ktoré sú zapísané v maticiach, mali dostatočnú 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

Na základe požiadavky tvorby off-grid siete s naimplementovaním viacerých obnoviteľných zdrojov s fixnými a variabilnými záťažami, bola vytvorená v prostredí Simscape Power Systems schéma, na ktorej boli realizované rôzne prevádzkové stavy, vyskytujúce sa v sieti [8].

#### III. VÝPOČTY CHARAKTERISTICKÝCH VELIČÍN V OFF-GRID SIETI

#### A. Model ustálenej off-grid siete

Pri modeli ustálenej off-grid siete bolo cieľom poukázať na fakt, že pokiaľ sa v schéme nerealizovali žiadne zmeny a boli nastavené správne inicializačné podmienky, frekvencia siete sa nemení a je rovná 50 Hz. V predmetnom systéme boli zapojené vedenia s veľkými stratami, teda aj hodnoty fázových napätí, pri ustálenom stave na svorkách odberov, boli menšie oproti predpokladaným, konkrétne  $U_{a,A} = 220,5$  V,  $U_{a,B} = 221$  V,  $U_{a,C} = 223,1$  V a  $U_{a,D} = 227$  V.

Odoberaný elektrický prúd závisí od veľkosti záťaže, ktorá je zapojená v odbernom mieste. Činná a jalová záťaž PQ bola v obvode nemenná.



Obr. 1 Schéma modelu ustálenej siete

Tabuľka 1 Odbery pre simuláciu ustálenej off-grid siete							
	17 [37]	- 1-1	(Y) (1	Elektrické vedenie			
	$U[\mathbf{v}]$	odoberany vykon	ucinnik $\cos \varphi$	$R[\Omega]$	<i>L</i> [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		

#### B. 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 literatúre [8]. 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. 2 Odozva frekvencie siete na odoberaný výkon

Na Obr. 2 je uvedený odoberaný výkon dynamickými záťažami. K celkovému odoberanému výkonu je potrebné pripočítať parazitné odbery, teda odbery vlastnej spotreby generátorov  $(2\times12,5 \text{ kW})$  a parazitné odbery k dynamickým odberom  $(3\times9,5 \text{ kW} + 4,75 \text{ kW})$ , ktoré sú čisto odporového charakteru. Tieto parazitné záťaže sú v sústave z dôvodu, že dynamické záťaže a synchrónne generátory nemôžu byť v sérii s indukčným elementom trojfázových vedení. Tie sú popísané *RL* parametrami, uvedenými v Tab. 2.

Tabuľka 2						
Rezistancia a indukčnosť vedení v	v simuláciách s dynamickou záťažou					

	$R[\Omega]$	<i>L</i> [µH]
G1	0,0025	11,27
G2	0,0025	11,27
А	0,2010	355,50
В	0,0268	47,40
С	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 synchrónnych generátorov zareagujú na tieto zmeny a dôjde k zníženiu, resp. zvýšeniu produkovaného výkonu synchrónnymi generátormi, ale nedôjde k vyregulovaniu frekvencie na

nominálnu hodnotu  $f_n = 50$  Hz. Frekvencia siete tak bude vzhľadom na rýchlosť poklesu/vzrastu odoberaného výkonu krátkodobo ustálená na inej hodnote, v blízkosti nominálnej frekvencie. Túto skutočnosť je možné vidieť aj na Obr. 2. 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.

## C. Model off-grid siete s fotovoltickým 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 fotovoltické panely s celkovým špičkovým výkonom 100 kW.

Na Obr. 3 je znázornené slnečné žiarenie dopadajúce na fotovoltické 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 W·m<sup>-2</sup>. V čase t = 276 s pokleslo slnečné žiarenie na hodnotu 266,2146 W·m<sup>-2</sup>, čo je prvým minimom testovaného slnečného žiarenia. V čase t = 700 s dochádza k druhému minimu slnečného žiarenia o veľkosti 242,5764 W·m<sup>-2</sup>. Oba poklesy slnečného žiarenia vznikli v dôsledku zvýšenej oblačnosti. Teplota fotovoltického článku sa pohybovala okolo 27 °C. Tieto údaje boli namerané v auguste 2013 v rámci hybridného fotovoltického systému, ktorý prevádzkuje Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach v rámci projektu VUKONZE. Predstavujú tak skutočné údaje v podmienkach, pri ktorých je vyrábaná elektrická energia z fotovoltického poľa.



Obr. 3 Slnečné žiarenie dopadajúce na FV pole

## D. 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 prispôsoboval vyrobenému výkonu z FV poľa. Na Obr. 4 je znázornená odozva FV poľa na testované klimatické podmienky, ktoré boli uvedené na Obr. 3. Zároveň je na Obr. 4 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 2×30 kW.



Obr. 4 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.

## E. 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. 5. Priebeh vetra, načítavaný z textového súboru, mal v čase t = 0 s hodnotu 9 m·s<sup>-1</sup>, čo je nominálny vietor pre použitú veternú turbínu. Následne, priebeh vetra kolísal okolo tejto nominálnej hodnoty. Vietor dosiahne maximálnu hodnotu 12 m·s<sup>-1</sup>. Veterná turbína pracuje s vetrom v rozmedzí od 4,5 m·s<sup>-1</sup> po 12,5 m·s<sup>-1</sup>.



Obr. 5 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. 5. Z Obr. 5 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 k tomu, že kolísanie napätia bolo pomerne značné, bol pripojený digitálny flickermeter v bodoch A, B, C a D a v mieste pripojenia veternej turbíny.

### F. Meranie flicker efektu v sieti s veternou turbínou

V predchádzajúcej časti "*E*" 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. 3 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<sup>-1</sup> 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 flikra bola hodnota 1, pre dlhodobú mieru vnemu flikra (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. 6 je znázornená nameraná okamžitá úroveň flicker efektu v odbernom bode C pre simuláciu s dynamickou záťažou (Obr. 2) a simuláciu s dynamickým vetrom (Obr. 5). Z Obr. 6 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. 5, bude sa nameraná okamžitá úroveň flicker efektu javiť ako stochastický šum.



Obr. 6 Nameraná okamžitá úroveň flicker efektu

V Tab. 3 je uvedená krátkodobá miera vnemu flikra pre odberné body A, B, C a D a pre bod na svorkách veternej turbíny. Z uvedených výsledkov je dôležité si všimnúť, 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 rezistancia a reaktancia sú omnoho väčšie ako vedení spájajúce ostatné body (Tab. 2). Napätie v bode A bolo v týchto simuláciách ustálené na hodnote U = 189,6 V (v reálnych podmienkach by bolo tak nízke napätie problémom pre činnosť mnohých prístrojov).

Nameraný flicker efekt v simulovanej sieti							
		$P_{0.1s}$	$P_{1s}$	$P_{3s}$	$P_{10s}$	$P_{50s}$	$P_{\rm st}$
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, Konštantná 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

Tabuľka 3 Jameraný flicker efekt v simulovanci sie

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  $L_c = 23.7 \mu$ H, ktoré spájajú odberný bod C. Výsledky sú uvedené na Obr. 7.



Obr. 7 Napätie v simulovanej schéme pre bod A

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

Z Obr. 7 je zrejmé, 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  $U_{\rm f}$  = 194,3 V na  $U_{\rm f}$  = 149,5 V, čo je pokles o  $\Delta U$  = 44,8 V, a v "prípade 2" došlo k poklesu z hodnoty  $U_{\rm f}$  = 225,7 V na  $U_{\rm f}$  = 199,4 V, čo je pokles len o  $\Delta U$  = 26,3 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  $P_{\rm ST}$  = 0,335491 (pôvodná hodnota, v "prípade 1" bola  $P_{\rm ST}$  = 0,523317).

## IV. ZÁVER

Uvedený príspevok prezentuje výsledky simulácií off-grid siete s uvažovaním obnoviteľných zdrojov (FV zdroj a veterná turbína) a bez uvažovania obnoviteľných zdrojov. Simulovaná offgrid sieť obsahovala tiež dva dieslegenerátory s nominálnym výkonom 250 kW a odbery A, B, C a D, ktoré predstavovali 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 maximálneho. dodávaného výkonu generátormi. Reguláciu dieselových generátorov zabezpečovalo riadenie hydraulickej 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 napríklad statický kompenzátor SVC, D-Statcom alebo iné.

#### Poďakovanie

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: *Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií*, s kódom ITMS: 26220220064, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



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

#### Referencie

- International Renewable Energy Agency: Off-grid renewable energy systems: status and methodological issues, [online]. Dostupné na: < https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\_Off-grid\_Renewable \_Systems\_WP\_2015.pdf >.
- [2] Hajimiragha, A. H., Zadeh, M. R. D.: 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] Medveď, D.: 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], Dostupné na: < https://www.mathworks.com/ help/physmod/sps/powersys/ref/hydraulicturbineandgovernor.html >.
- [5] MathWorks: *Three-Level Bridge*, [online], Dostupné na: < 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], Dostupné na: < https://www.mathworks.com/help/ physmod/sps/powersys/ref/threephasedynamicload.html >.
- [8] Klešč, M.: Modelovanie off-grid elektrickej siete v prostredí Simscape Power Systems. Diplomová práca. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2017.