

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

Analýza prechodných dejov pri pripájaní fotovoltaických elektrární

Tento príspevok sa zaoberá dynamickými dejmi v sústave vn, ktoré vznikajú pri skratoch, zemných poruchách alebo následkom pripájania obnoviteľných zdrojov elektrickej energie. Analýza bola vykonaná použitím knižníc a nástrojov toolboxu Simscape Power Systems, ktorý je nadstavbou matematického nástroja Matlab/Simulink. Príspevok sa zaoberá aj vplyvom dynamických dejov na kvalitu elektrickej energie a tiež charakteristikou algoritmu riešenia dynamických dejov a matematickými spôsobmi výpočtov dynamických dejov pomocou numerických metód.

Kľúčové slová: fotovoltaická elektráreň, Simscape Power Systems, skrat, dynamický dej, simulácia

This paper deals with the dynamic phenomena in the high-voltage system arising from the short-circuit, earth-fault or as a result of connecting renewable energy sources. The analysis was performed using the toolbox library of Simscape Power Systems, which is a part of mathematical tools Matlab / Simulink. The paper deals also with the influence of dynamic phenomena on the quality of electricity and algorithm solutions of dynamic processes and the mathematical method of calculating of the dynamic processes using numerical methods.

Keywords: photovoltaic power plant, Simscape Power Systems, short-circuit, dynamic phenomenon, simulation

I. ÚVOD

Výroba elektrickej energie sa v poslednom storočí orientovala hlavne na výstavbu a prevádzku veľkých a centralizovaných výrobní elektrickej energie ako sú napríklad jadrové, uhľové a vodné elektrárne. Tieto elektrárne dodávajú elektrickú energiu hlavne do napäťovej hladiny zvn alebo vvn, pričom spotreba je umiestnená hlavne v sieťach vn a nn. Vidíme, že skladba energetických zdrojov sa každoročne mení v prospech obnoviteľných zdrojov elektrickej energie. Nehody, ktoré sa za posledné tri desaťročia odohrali v jadrových elektrárnach podnietili nevôľu laickej verejnosti ďalej podporovať jadrovú energetiku. Taktiež výstavba veľkých vodných diel s integrovanou výrobou elektrickej energie a tepelných elektrární sa stretáva s odporom ľudí, hlavne vo vyspelých krajinách. Zvýšenie ekologického povedomia a obavy o životné prostredie medzi verejnosťou vedú politikov k presadzovaniu zákonov, ktoré podporujú ekologické zdroje elektrickej energie ako napríklad fotovoltaické elektrárne, bioplynové elektrárne, elektrárne na spaľovanie biomasy a iné, na úkor klasických zdrojov. Tieto zdroje, čo sa týka nižších výkonov, sú vo veľkej miere pripájané do napäťových hladín vn a nn. Výnimkou sú zdroje s vyššími inštalovanými výkonmi, ktoré sa pripájajú do vvn a veľké veterné farmy pripájané do zvn.

V tomto príspevku sú uvedené výsledky simulácií dynamických javov v sústave vn s uvažovaním pripájania moderných obnoviteľných zdrojov elektrickej energie. Skúmaný bol dopad zlyhania sieťovej ochrany obnoviteľného zdroja pri odpojení časti siete. Úlohou sieťovej ochrany je odpojiť zdroj od siete v prípade straty napájania siete. Zlyhanie sieťovej ochrany predstavuje veľké nebezpečenstvo pre pracovníkov prevádzkovateľa distribučnej sústavy, pretože pri plánovanej odstávke siete a následnej práci na vedení môže dôjsť k ohrozeniu života. Súčasne sa overila možnosť fungovania časti siete v režime ostrovej prevádzky. Predpokladom bolo, že pri vhodnom zložení obnoviteľných zdrojov v skúmanej sieti je možná ostrovná prevádzka. Výhodou takéhoto riešenia je, že v prípade výpadkov by bolo postihnutých menej odberných miest, čo by viedlo k zlepšeniu

činiteľov SAIDI a SAIFI. Koncový spotrebiteľ by nebol postihnutý výpadkami elektriny.

II. POPIS MODELU SIETE V PROSTREDÍ SIMSCAPE POWER SYSTEMS

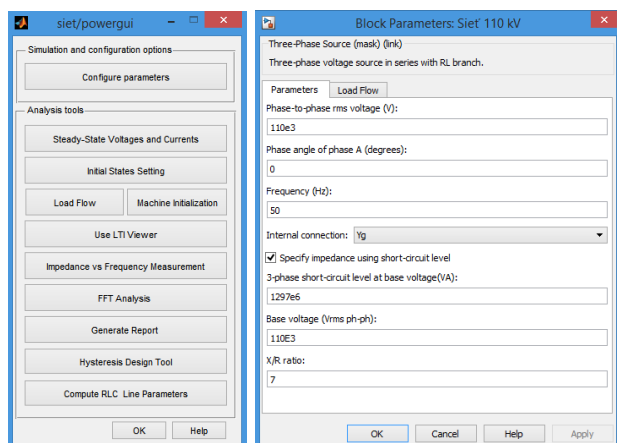
Simscape Power Systems, ako nadstavba programu Matlab, poskytuje užívateľovi analytické nástroje a knižnice prvkov na modelovanie výkonových elektrických systémov v prostredí Simulink a Simscape. Simscape Power Systems bol vyvinutý v spolupráci so spoločnosťou Hydro-Québec. Softvér umožňuje simulovať elektrické obvody zložené z lineárných a nelineárných prvkov. Knižnice zahŕňajú modely elektrických súčiastok výkonovej elektroniky, trojfázových strojov, elektrických pohonov, FACTS zariadení, obnoviteľných zdrojov energie, meracích objektov a pod. Program ponúka nástroje pre harmonickú analýzu, výpočet celkového harmonického skreslenia (THD), toku výkonov atď. Pre prácu v programe Simscape Power Systems je nevyhnutné mať k dispozícii:

- Matlab,
- Simulink,
- Simscape.

Blok „Powergui“ (Obr. 1) je základný prvok umožňujúci vykonávať simulácie v prostredí Simulink pomocou Simscape Power Systems blokov. Predstavuje grafické užívateľské rozhranie, ktoré dovoľuje spúšťať nástroje na analýzu ustálených stavov, analýzu výsledkov simulácií, nastavenie pokročilých parametrov simulovaných blokov, výpočet *RLC* parametrov vedení a pod. Kľúčovou funkciou je konfigurácia nastavení simulácie v menu „Configure parameters“, kde v záložke „Solver“ je možné vybrať typ simulácie:

- „Continuous“ – vykoná sa spojitý výpočet modelu,
- „Discrete“ – vykoná sa nespojitý výpočet so zadaným vzorkovacím časom,
- „Phasor“ – uskutoční sa fázorová simulácia modelu.

Z dôvodu náročnosti simulácií na výpočtový výkon počítača sa v simuláciách uvažovalo s typom simulácie „Discrete“.



Obr. 1. Powergui blok (vľavo) a nastavené parametre „Three-Phase Source“ bloku (vpravo)

Napájanie siete a transformátory

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.

Ďalším prvkom v schéme je transformátor. V schéme sa nachádza 85 transformátorov typu „Three-Phase Transformer (Two Windings)“ rôznych výkonov a vnútorných zapojení vinutí, ktoré sú bližšie popísané v Tab. I.

TABUĽKA I
Výkon, počet a zapojenie transformátorov v simulácii

Výkon [kVA]	Počet	Zapojenie
25	1	Yyn0
50	2	Yyn0
63	1	Yyn0
100	18	Yyn0
160	29	Yyn0
250	22	Yyn0
400	9	Dyn1
630	2	Dyn1
40000	1	YNyn0

Sústava 110 kV je prepojená s 22 kV sústavou jedným transformátorom 110/22 kV s výkonom 40 MVA. Distribučné transformátory typu 22/0,4 kV predstavuje v základnej schéme dohromady 84 prvkov. V praxi sú vo vyhotovení stožiarové, kioskové, murované, kompaktné alebo vežové. Spôsob zapojenia uzla transformátora závisí od toho, do akej siete patrí. V simulácii podľa spôsobu prevádzky elektrických sietí boli uvažované:

- siete s neúčinne uzemneným uzlom transformátora,
- siete s priamo uzemneným uzlom transformátora.

Výpočet parametrov transformátorov

Okrem výkonu, frekvencie, napätia na primárnej a sekundárnej strane, je potrebné zadať transformátoru aj parametre náhradnej schémy. Jedná sa o rezistanciu R_1 a rozptylovú indukčnosť L_1 na primárnej strane, rezistanciu R_2 a rozptylovú indukčnosť L_2 na sekundárnej strane, magnetizačnú rezistanciu R_m a magnetizačnú indukčnosť L_m . Parametre boli vypočítané pomocou programu Excel a importované do simulácie pomocou m-file súboru a príslušných príkazov.

TABUĽKA II

Vstupné parametre pre výpočet parametrov náhradnej schémy

S [VA]	p [-]	Zapojenie	ΔP_0 [W]	ΔP_k [W]	u_k [%]	i_0 [%]
25000	22/0,4	Yyn0	120	650	4	1,49
50000	22/0,4	Yyn0	190	1350	4	2,00
63000	22/0,4	Yyn0	210	1250	4	1,71
100000	22/0,4	Yyn0	320	2150	4	2,00
160000	22/0,4	Yyn0	460	3100	4	1,80
250000	22/0,4	Yyn0	650	4200	4	1,80
400000	22/0,4	Dyn1	930	6000	6	1,60
630000	22/0,4	Dyn1	1200	8700	6	1,00
1250000	22/0,4	Dyn1	2100	16000	6	0,6
4000000	110/22	YNyn0	29300	216820	11,61	0,15

TABUĽKA III

Vypočítané parametre náhradnej schémy transformátorov

S [VA]	R_1 [Ω]	L_1 [H]	R_2 [Ω]	L_2 [H]	R_m [Ω]	L_m [H]
25000	251,680	0,937	$83,200 \cdot 10^{-3}$	$309,625 \cdot 10^{-6}$	4033333	4368,8
50000	130,680	0,455	$43,200 \cdot 10^{-3}$	$150,307 \cdot 10^{-6}$	2547368	1569,2
63000	76,216	0,425	$25,195 \cdot 10^{-3}$	$140,389 \cdot 10^{-6}$	2304762	1458,0
100000	52,030	0,260	$17,200 \cdot 10^{-3}$	$85,894 \cdot 10^{-6}$	1512500	780,4
160000	29,305	0,168	$9,688 \cdot 10^{-3}$	$55,695 \cdot 10^{-6}$	1052174	541,9
250000	16,262	0,112	$5,376 \cdot 10^{-3}$	$36,976 \cdot 10^{-6}$	744615	346,0
400000	27,225	0,336	$3,000 \cdot 10^{-3}$	$36,984 \cdot 10^{-6}$	1561290	729,9
630000	15,914	0,214	$1,750 \cdot 10^{-3}$	$23,601 \cdot 10^{-6}$	1210000	747,3
1250000	7,434	0,108	$0,820 \cdot 10^{-3}$	$11,942 \cdot 10^{-6}$	691429	641,9
4000000	0,820	0,056	$32,794 \cdot 10^{-3}$	$2233,386 \cdot 10^{-6}$	412969	735,6

Model vedenia

V simuláciách sa na modelovanie jednotlivých úsekov vedení používal blok „Three-Phase PI Section Line“, ktorý reprezentuje vedenie so sústredenými parametrami pomocou náhradného π -článku. Parametre vedenia R, L, C boli vypočítané zo súsledných a netočivých zložiek, ktoré brali do úvahy indukčné a kapacitné väzby medzi fázami navzájom a medzi fázami a zemou. Do bloku „Three-Phase PI Section Line“ bolo potrebné zadať:

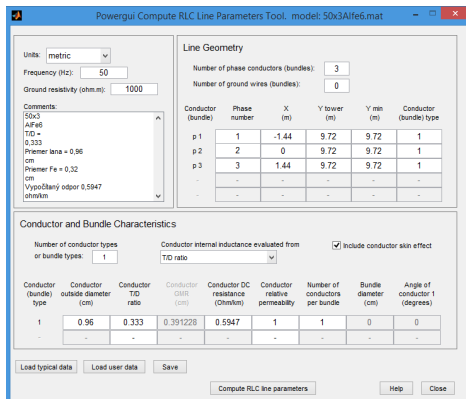
- r_1, r_0 – súsledná a netočivá zložka rezistancie na jednotku dĺžky [Ω /km]
- l_1, l_0 – súsledná a netočivá zložka indukčnosti na jednotku dĺžky [H/km]
- c_1, c_0 – súsledná a netočivá zložka kapacity na jednotku dĺžky [F/km]
- f – frekvencia [Hz]
- l – dĺžka vedenia [km]

Súsledné a netočivé zložky boli vypočítané pomocou nástroja na výpočet parametrov vzdušných vedení „Compute RLC Line Parameters“, ktorý ich vypočítal z parametrov vodiča a geometrického usporiadania vodičov. Tento nástroj je v ponuke „Powergui“ bloku (alebo zadaním príkazu „power_lineparam“ v Matlab-e). Na Obr. 3 je možné vidieť grafické užívateľské prostredie (GUI) nástroja „Compute RLC Line Parameters“. Jednotlivé hodnoty parametrov boli zvolené nasledovným spôsobom. Rezistivita zeminy bola s ohľadom na [2] zvolená na hodnotu 1000 Ω ·m, čo predstavuje hlinito-piesčitú štrkovú pôdu. Geometrické usporiadanie vodičov je možné vidieť na Obr. 2. Uvažovalo sa, že celá simulovaná 22 kV sieť je vybudovaná pomocou stožiarov EPV z predpätého betónu typu 10,5/6 kN, 10,5/10 kN, 10,5/15 kN alebo 10,5/20 kN, ktorých dĺžka je 10,6 m a hĺbka vrazenia je 2 m. Na hornom konci stožiaru je umiestnená ľahká podpera L 1400 s výškou 0,75 metra, ktorá podopiera ľahkú rovinnú konzolu L 3000. Na konzole sú umiestnené keramické podperné izolátory typu VPA 180/0,8a s výškou 0,37 metra. Fázové vodiče sú teda umiestnené vo výške 9,72 m nad zemou. Simulácie s rôznymi priehybmi ukázali, že

priehyb nemá výrazný vplyv na zmenu parametrov vedení, a teda ani na konečné výsledky. Preto sa v simuláciách neuvažovalo s priehybom. Krajné fázy sú od osi súmernosti vzdialené 1,44 m. Zadané vzdialenosti vychádzajú z katalógov prípustných materiálov spoločnosti VSD, a.s. [3].



Obr. 2. Geometrické rozmery stĺpu uvažovaného vedenia 22 kV



Obr. 3. Nástroj na výpočet parametrov vzdušných vedení „Compute RLC Line Parameters“ s vyplnenými údajmi pre vedenie 50×3 AlFe6

V záložke „Conductor and Bundle Characteristics“ sa nastavujú parametre vodiča. Počet typov vodičov („Number of conductor types or bundle types“) bol nastavený na 1. Vnútnu indukčnosť vodiča („Conductor internal inductance evaluated from“) bola vypočítaná pomocou zadania hodnoty „T/D ratio“. V simuláciách sa uvažovalo s vplyvom skin efektu, teda možnosť „Include conductor skin effect“ bola zaškrtnutá.

Popis ďalších parametrov je nasledujúci:

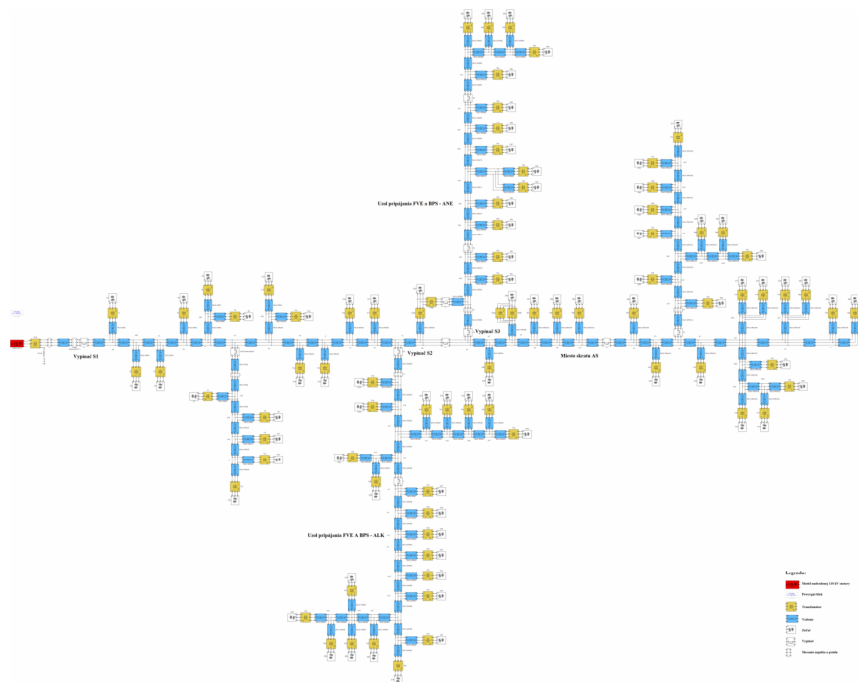
- Conductor outside diameter – vonkajší priemer vodiča v cm
- Conductor T/D ratio – pomer hrúbky vodivého materiálu a celkového vonkajšieho priemeru vodiča
- Conductor DC resistance – jednosmerný odpor vodiča v Ω/km
- Conductor relative permeability – relatívna permeabilita vodivého materiálu. Pre nemagnetické (paramagnetické, diamagnetické) materiály (Al, Cu, ...) sa zadáva hodnota 1.
- Number of conductors per bundle – počet vodičov vo zväzku je rovný 1.

Použité typy vodičov v simuláciách a ich materiálové vlastnosti sú uvedené v Tab. IV.

TABUĽKA IV
Parametre simulovaných vodičov

Typ	Priemer [cm]	Pomer T/D [–]	DC odpor [Ω/km]
35×3 AlFe	0,81	0,333	0,8352
50×3 AlFe	0,96	0,333	0,5947
70×3 AlFe	1,17	0,315	0,4130
120×3 AlFe	1,55	0,316	0,2374

Výsledkom použitia nástroja „Compute RLC Line Parameters“ sú vypočítané súsledné a netočivé zložky R, L, C v Tab. V, ktoré boli zadané v riadiacom m-file súbore a načítané do modelov vedení (π-článkov) pomocou premenných.



Obr. 4 Schéma elektrickej siete v prostredí Simscape Power Systems

TABULKA V
Vypočítané súradnice a netočivé zložky R, L, C

Typ	$R_{(1)}$ [Ω /km]	$R_{(0)}$ [Ω /km]	$L_{(1)}$ [H/km]	$L_{(0)}$ [H/km]	$C_{(1)}$ [F/km]	$C_{(0)}$ [F/km]
35×3 AlFe	0,83526	0,98224	0,0012618	0,0057009	9,1795 10 ⁻⁹	4,2107 10 ⁻⁹
50×3 AlFe	0,59478	0,74176	0,0012279	0,005667	9,4459 10 ⁻⁹	4,2658 10 ⁻⁹
70×3 AlFe	0,41310	0,56008	0,0011865	0,0056256	9,7765 10 ⁻⁹	4,3317 10 ⁻⁹
120×3 AlFe	0,23758	0,38456	0,0011304	0,0055695	10,289 10 ⁻⁹	4,4291 10 ⁻⁹

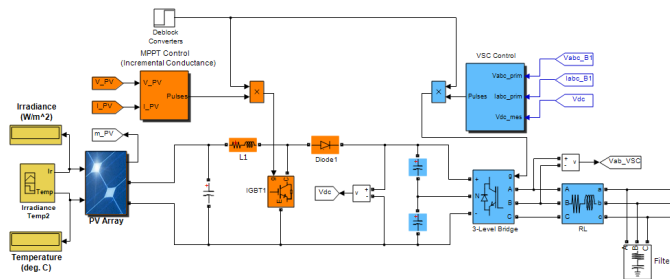
Model zátáže

Zátáže v simuláciách boli modelované pomocou bloku „Three-Phase Series RLC Load“. Jedná sa o model trojfázovej zátáže. Vstupnými hodnotami do bloku boli činný a jalový výkon. Hodnoty výkonov vychádzali z hodnôt 22 kV siete a boli do blokov načítané pomocou obslužného m-file súboru z databázy údajov v programe Excel.

Celková schéma, vytvorená v prostredí Simscape Power Systems, je na Obr. 4.

III. MODEL FOTOVOLTIČKEJ ELEKTRÁRNE

Na simuláciu fotovoltaických elektrární bol použitý predpripravený model z prostredia Simscape Power Systems, ktorý bol pre potreby tohto článku adekvátne upravený. Model pozostával z niekoľkých častí. Základnou časťou je model fotovoltaického poľa „PV Array“. Pole predstavuje sériovo-paralelné zapojenie fotovoltaických modulov. V modeli je možné špecifikovať počet sériovo zapojených modulov na reťazec a počet paralelných reťazcov. Sériovým radením modulov rastie napätie a prúd ostáva konštantný. Paralelným radením naopak prúd rastie, ale napätie ostáva konštantné. Na dosiahnutie vhodného výstupného napätia a prúdu bolo potrebné moduly vhodne sériovo-paralelne pospájať.



Obr. 5. Model fotovoltaickej elektrárne

Model fotovoltaickej elektrárne s výkonom 999 kW bol vytvorený podľa technických podkladov [4] k skutočnej fotovoltaickej elektrárni Gomboš 1 v okrese Košice – okolie. Modul skutočnej elektrárne s výkonom 220 Wp bol simulovaný modulom CANADIAN POLAR CS5P – 220M, ktorý má podobné parametre. Výroba elektrickej energie prebieha v elektrárni Gomboš 1 prostredníctvom 4546 ks fotovoltaických panelov s celkovým výkonom 999 kW. Navrhované napätie z fotovoltaických panelov je 590 V DC. Z týchto údajov je možné odvodiť sériovo-paralelné zapojenie ekvivalentného modelu elektrárne, ak napätie jedného modulu naprázdno je 59,3 V.

Pre výstupné napätie platí:

$$U_{PV} = N_{SER} U_{OC} \quad (1)$$

Z uvedeného výrazu je možné určiť počet sériovo zapojených modulov v jednom reťazci ako podiel:

$$N_{SER} = \frac{U_{PV}}{U_{OC}} = \frac{590}{59,3} = 9,9 \approx 10 \quad (2)$$

Počet paralelne zapojených reťazcov je potom:

$$N_{PAR} = \frac{N_{PV}}{N_{SER}} = \frac{4546}{10} = 454,6 \approx 454 \quad (3)$$

Fotovoltaické pole ekvivalentného modelu teda pozostáva z 454 paralelne zapojených reťazcov, pričom každý reťazec má 10 modulov zapojených sériovo.

Celkový výkon ekvivalentného modelu je 998,8 kW:

$$P_{PV} = N_{SER} N_{PAR} P_{MODUL} = 10 \cdot 454 \cdot 220 = 998800 \text{ W} \quad (4)$$

Vstupnými hodnotami pre blok „PV Array“ boli snečné žiarenie a teplota panela, ktoré je možné nastaviť v bloku „Signal Builder“.

Ďalšou časťou je zvyšovací DC–DC menič, ktorý zabezpečuje dostatočné napätie na vstup DC–AC meniča. Menič pracuje pri frekvencii 5 kHz. Maximálne využitie výkonu FV poľa je dosiahnuté pomocou MPPT riadenia, využitím techniky IC, „Incremental Conductance“. Technika IC je založená na skutočnosti, že strmosť výkonu je pri dosiahnutí maximálneho výkonu nulová ($dP/dV = 0$), kladná naľavo od maxima a záporná napravo od maxima. Využitím vzťahu:

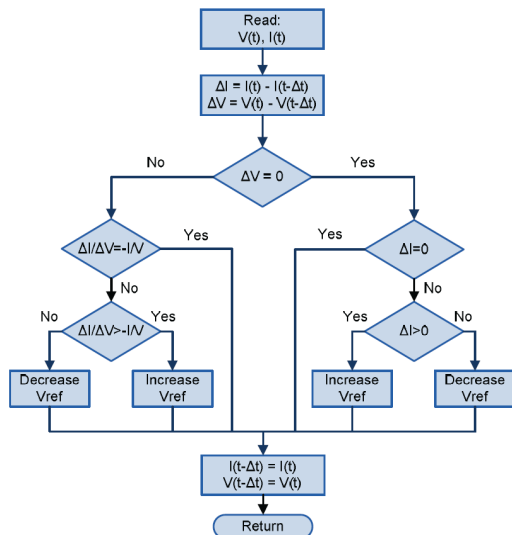
$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(vi)}{dv} = i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad (5)$$

je možné nájsť podmienky kde:

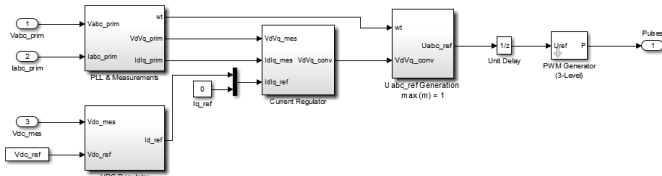
$$\begin{aligned} \frac{\Delta i}{\Delta v} &= -\frac{i}{v} && \text{je stav pri dosiahnutí maxima,} \\ \frac{\Delta i}{\Delta v} &> -\frac{i}{v} && \text{je stav naľavo od maxima;} \\ \frac{\Delta i}{\Delta v} &< -\frac{i}{v} && \text{je stav napravo od maxima. [5]} \end{aligned}$$

Celkový algoritmus techniky IC je možné vidieť na Obr. 6. Pri dosiahnutí maxima je prevádzka FV poľa udržiavaná na tomto bode, pokiaľ nedôjde k zmene di . V tom prípade algoritmus zvýši alebo zníži napätie na dosiahnutie nového maxima. Veľkosť prírastku určuje ako rýchlo je maximum dosiahnuté. Metóda „Incremental Conductance“ ponúka veľmi dobrý výkon pri rýchlo sa meniacich atmosférických podmienkach. [6]

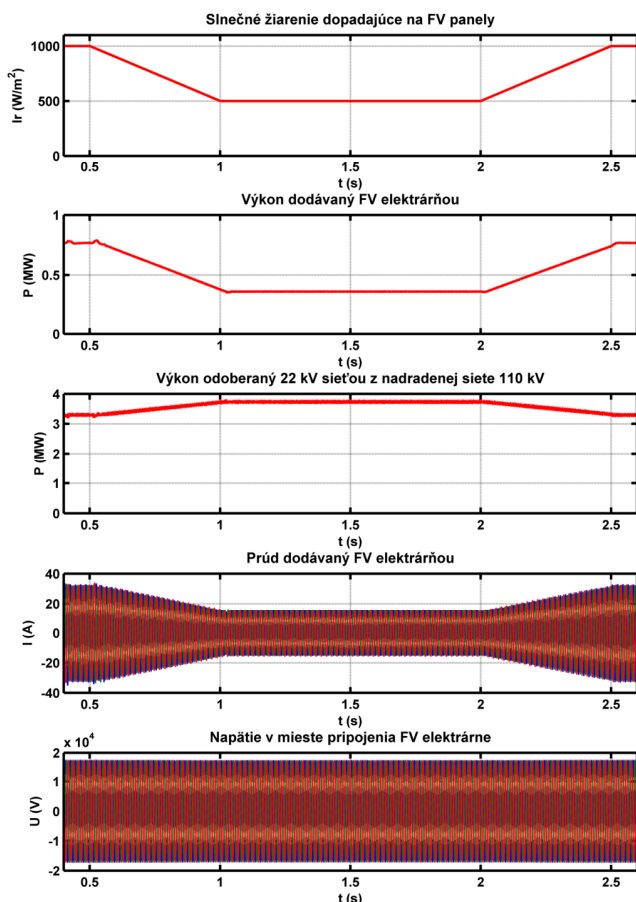
Ďalším prvkom modelu je trojúrovňový DC–AC menič, ktorý reguluje napätie DC zbernice na 1000 V. Regulačný obvod pracuje v dvoch riadiacich slučkách. V externej slučke reguluje napätie DC zbernice na ± 500 V a v internej slučke reguluje činný a jalový komponent prúdu I_d a I_q . Výstupné napätia V_d a V_q prúdového regulátora sú konvertované na modulujúci signál U_{ref_abc} , ktorý je vstupom PWM impulzného generátora. [7] Samotný menič obsahuje mostíkové zapojenie výkonových IGBT tranzistorov.



Obr. 6. Algoritmus techniky „Incremental Conductance“ [5]



Obr. 7. Princiálna schéma riadenia DC-AC meniča



Obr. 8. Vplyv poklesu slnečného žiarenia na dodávaný výkon FVE, na odoberaný výkon siete 22 kV z nadradenej 110 kV siete a na dodávaný prúd z FVE

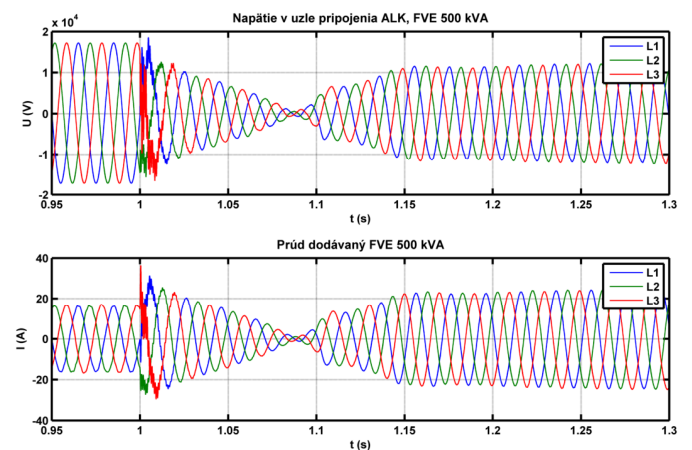
Súčasťou modelu FVE je aj filter a distribučný transformátor s výkonom 1250 kVA. Podobným spôsobom bol odvodený aj model FVE 500 kVA s distribučným transformátorom s výkonom 630 kVA.

Na Obr. 8 je možné vidieť správanie sa fotovoltickej elektrárne pri zmene intenzity dopadajúceho žiarenia.

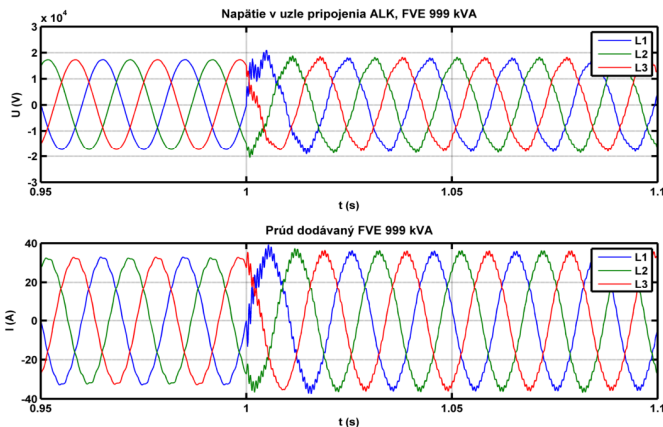
IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ PRI ZLYHANÍ SIEŤOVEJ OCHRANY A VYTVORENIE OSTROVNEJ PREVÁDZKY

V nasledujúcich výsledkoch simulácií sú prezentované výsledky pripájania fotovoltických elektrární (FVE 500 kVA a FVE 999 kVA). Elektrárne boli postupne pripájané do uzla ALK v skupinovej prípojke Z18-Z39 a do uzla ANE v skupinovej prípojke Z41-Z54. Scenár simulácie bol nasledovný: v čase 1 s došlo k odpojeniu skupinovej prípojky z dôvodu opravy na vedení. V tom istom čase zlyhala sieťová ochrana, ktorá by mala odpojiť zdroj v danej vetve. Na výsledkoch simulácií boli pozorované dynamické javy po odpojení skupinovej prípojky od siete 22 kV a správanie sa zdroja, s predpokladom jeho stabilizácie a prechodom na ostrovnú prevádzku, alebo rozpadu skúmanej časti siete. Prevádzkové podmienky boli nasledovné: skupinová prípojka Z18-Z39 mala spotrebu 914,49 kW a skupinová prípojka Z41-Z54 mala spotrebu 458,4 kW. Zároveň sa týmito simuláciami overila potenciálna možnosť prevádzky vhodných častí siete v režime ostrovej prevádzky v prípade výpadkov dodávky elektrickej energie, čím by sa mohli zlepšiť koeficienty SAIDI a SAIFI.

Na Obr. 9 a Obr. 10 sú zobrazené priebehy napätí a prúdov pri odpojení skupinovej prípojky Z18-Z39. Pri pripojení FVE 500 kVA, menič zvládol reguláciu pri prechodnom deji a bol schopný napájať vybranú časť siete. Regulácia zvýšila dodávaný prúd na maximálny možný a napätie pokleslo ako je vidieť na Obr. 9. Z dôvodu preťaženia meniča by vnútorné ochrany meniča v krátkom čase spôsobili jeho vypnutie aj v prípade zlyhania sieťovej ochrany. Hodnoty amplitúd fázových napätí sú v Tab. VI. Na Obr. 10 je zobrazený prechod skupinovej prípojky Z18-Z39 do režimu ostrovej prevádzky pri pripojení FVE 999 kVA. Prevádzka FVE 999 kVA spôsobila zvýšenie napätia z hodnoty 17348 V na hodnotu 18010 V. Došlo tiež k prepätiu 21038 V vo fáze L1.

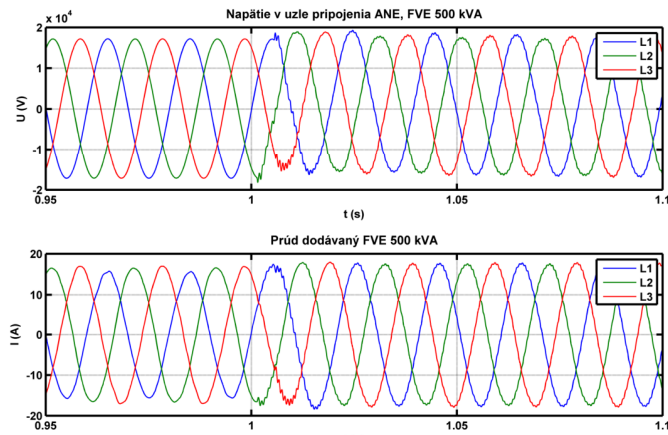


Obr. 9. Napätie a prúd FVE 500 kVA v uzle ALK pri odpojení skupinovej prípojky Z18-Z39 vypínačom S2



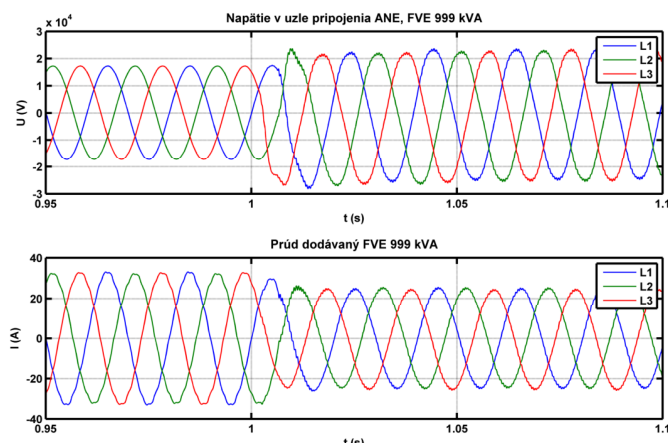
Obr. 10. Napätie a prúd FVE 999 kVA v uzle ALK pri odpojení skupinovej prípojky Z18-Z39 vypínačom S2

V prípade pripojenia obnoviteľného zdroja do skupinovej prípojky Z41-Z54 v uzle ANE (Obr. 11) dokázali prejsť do režimu ostrovnej prevádzky uvažované zdroje. Dôvodom bola nižšia spotreba skupinovej prípojky ako v predchádzajúcich prípadoch.



Obr. 11. Napätie a prúd FVE 500 kVA v uzle ANE pri odpojení skupinovej prípojky Z41-Z54 vypínačom S3

Odpojenie skupinovej prípojky so zapojenou FVE 999 kVA (Obr. 12) spôsobilo výrazné zvýšenie napätia, ktoré by mohlo viesť k poškodeniu zariadení odberateľov.



Obr. 12. Napätie a prúd FVE 999 kVA v uzle ANE pri odpojení skupinovej prípojky Z41-Z54 vypínačom S3

TABUĽKA VI

Hodnoty fázových napätí a prúdov (amplitúdy) v mieste pripojenia rôznych OZE (v uzle ALK) pred a po odpojení (ostrovná prevádzka) skupinovej prípojky Z18-Z39 vypínačom S2

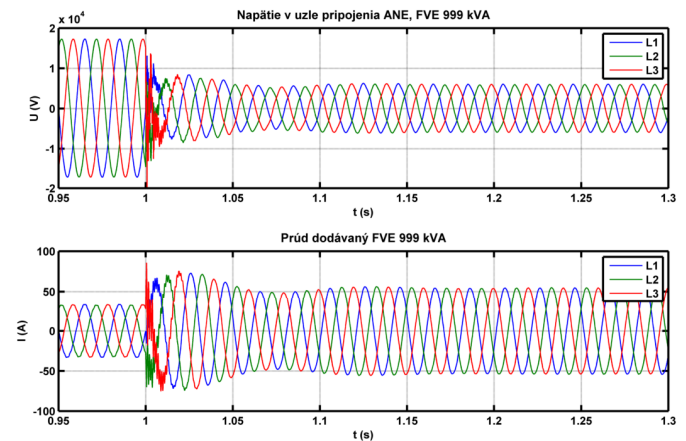
Typ elektrárne		FVE 500 kVA	FVE 999 kVA
Priebeh		Obr. 8	Obr. 9
$U_{pred\ odpojením}$	[V]	17233	17348
$U_{ust.,\ po\ odpojení}$	[V]	12331	18010
$U_{prepätie}$	[V]	18605 (L1)	21038 (L1)
$I_{pred\ odpojením}$	[A]	16,14	32,87
$I_{ust.,\ po\ odpojení}$	[A]	24,78	36,05

TABUĽKA VII

Hodnoty fázových napätí a prúdov (amplitúdy) v mieste pripojenia rôznych OZE (v uzle ANE) pred a po odpojení (ostrovná prevádzka) skupinovej prípojky Z41-Z54 vypínačom S3

Typ elektrárne		FVE 500 kVA	FVE 999 kVA
Priebeh		Obr. 10	Obr. 11
$U_{pred\ odpojením}$	[V]	17187	17269
$U_{ust.,\ po\ odpojení}$	[V]	17407	24497
$U_{prepätie}$	[V]	19288 (L1)	28123 (L1)
$I_{pred\ odpojením}$	[A]	15,64	33,05
$I_{ust.,\ po\ odpojení}$	[A]	17,83	25,25

V ďalších simuláciách bola FVE 999 kVA pripojená do uzla ANE v skupinovej prípojke Z41-Z54, pričom došlo k odpojeniu celej siete výkonovým vypínačom S1. Celková spotreba siete bola 4,5044 MW. V prípade FVE 999 kVA, dokázal menič za cenu rapidného zníženia napätia udržať sieť v prevádzke (Obr. 13). Regulačné obvody meniča si poradili so zvýšenou požiadavkou na výkon a zvýšili dodávku prúdu. Znížené napätie by mohlo v tomto prípade spôsobiť nefunkčnosť, poškodenie alebo zničenie zariadení spotrebiteľov. Takýto stav predstavuje nebezpečenstvo pre pracovníkov prevádzkovateľa distribučnej sústavy. V praxi by tento stav bol možný iba krátku chvíľu, pretože menič by bol preťažený a vnútorné ochrany meniča by vypli menič aj v prípade zlyhania sieťovej ochrany. V Tab. VIII sú zhrnuté výsledky simulácií z Obr. 13.



Obr. 13. Napätie a prúd FVE 999 kVA v uzle ANE pri odpojení celej siete vypínačom S1

TABUĽKA VIII

Hodnoty fázových napätí a prúdov (amplitúdy) v mieste pripojenia rôznych obnoviteľných zdrojov (v uzle ANE) pred a po odpojení (ostrovná prevádzka) celej siete 22 kV vypínačom S3 od nadradenej sústavy 110 kV

Typ elektrárne		FVE 999 kVA
Priebeh		Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.
$U_{pred\ odpojením}$	[V]	17977
$U_{ust.,\ po\ odpojení}$	[V]	6190
$U_{prepätie}$	[V]	19349 (L2)
$I_{pred\ odpojením}$	[A]	31,69
$I_{ust.,\ po\ odpojení}$	[A]	54,5

V. ZÁVER

Tento príspevok prezentoval výsledky simulácií pri zlyhaní sieťovej ochrany v sieti vn obsahujúcej fotovoltaickú elektrárňu.

Na prezentované výsledky sa môžeme pozerat' z dvoch hľadísk. Prvým hľadiskom je prípad zlyhania sieťovej ochrany a vytvorenie neželanej ostrovej prevádzky v časti elektrickej siete. Takáto situácia predstavuje zvýšené nebezpečenstvo pre pracovníkov prevádzkovateľa distribučnej sústavy a môže viesť k ohrozeniu ich života. Preto je potrebné viac dbať na bezpečnosť práce v sieťach s distribuovanými obnoviteľnými zdrojmi. Vhodným opatrením by boli pravidelné kontroly funkčnosti sieťových ochrán a vhodné pracovné prostriedky na zistenie a zaistenie beznapät'ového stavu siete, kde sa bude vykonávať montáž.

Druhým hľadiskom je potenciálna možnosť prevádzky častí siete v ostrovnom režime. Ako bolo možné vidieť z výsledkov, niektoré energetické zdroje sú schopné vo vhodne vybraných častiach siete prejsť do režimu ostrovej prevádzky. Výhodou využívania režimu ostrovej prevádzky by bolo, že v prípade výpadkov dodávok elektrickej energie, by časti siete mohli byť prevádzkované ďalej a koncový zákazník by nebol postihnutý výpadkami. Vybraná časť siete by mohla byť vymedzená recloserom, ktorý by v prípade straty napájania v sieti vytvoril z vybranej časti siete ostrov. Po obnovení napájania v sieti by sa ostrov prifázoval naspäť k elektrickej sieti. Takéto riešenie však kladie zvýšené nároky na automatizáciu, dobré nastavenie ochrán a regulačných obvodov zdroja, ktorý by napájal ostrov. Z výsledkov simulácií je možné pozorovať, že fotovoltaická elektrárňu je menej vhodný zdroj na ostrovnú prevádzku. Nevýhodou je nerovnomerná výroba elektrickej energie vzhľadom na zmenu slnečného žiarenia. Táto nevýhoda sa dá čiastočne kompenzovať pridaním akumulátorov do obvodov FVE, čo však predstavuje zvýšené náklady. Ostrovná prevádzka však má aj značné nevýhody, pre ktoré je vo verejnej časti distribučnej sústavy neprípustná [8]. Nevýhodou sú nízke skratové prúdy, ktoré nemusia viesť k rozbehu ochrany a vypnutiu napájania ostrova pri skrate. Počas ostrovej prevádzky nie je ostrov v synchronizme s distribučnou sústavou. V prípade neúspešnej synchronizácie a pripojenia ostrova k sústave môže dôjsť k toku neželaných výkonov a vzniku prepätí, ktoré môžu viesť k poškodeniu pripojených zariadení.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Výskum charakteristík

fotovoltaických komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, s ITMS kódom: 26220220080, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



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

LITERATÚRA

- [1] KOLEJ, Matúš – MEDVEĎ, Dušan: *Analýza dynamických dejov v elektrizačnej sústave využitím SimPowerSystems*. In: Electrical Engineering and Informatics 5: Proceeding of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. – Košice: TU, 2014 s. 233-238. ISBN 978-80-553-1704-5.
- [2] FECKO, Štefan – VARGA, Ladislav a kol.: *Vonkajšie elektrické vedenia*. Bratislava: Renesans, 2010. 599 s. ISBN 80-89402-35-9
- [3] *Katalóg pripustných materiálov*. [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné na internete: <<http://www.vsds.sk/wps/portal/vsd/domov/distribucna-sustava/standardizacia-sieti/katalog-pripustnych-materialov>>.
- [4] *Fotovoltaická elektrárňu Gomboš*. [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné na internete: <<http://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/fotovoltaicka-elektraren-gom-bos-1>>.
- [5] BRITO, Moacyr a kol.: *Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV Applications*. [online]. 2011. [cit. 2016-12-1]. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6036258>>.
- [6] DOLARA, A. a kol.: *Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems*. In Journal of Electromagnetic Analysis and Applications [online]. 2009, vol. 1, no. 3 [cit. 2016-12-1]. Dostupné na internete: <<http://search.proquest.com/docview/230964481?accountid=49346>>.
- [7] GIROUX, Pierre a kol.: *Grid-Connected PV Array*. [online]. [cit. 2016-15-1]. Dostupné na internete: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34752-grid-connected-pv-array>>.
- [8] VSD: *Technické podmienky prevádzkovateľa distribučnej sústavy*. [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné na internete: <https://www.vsds.sk/mdoc/dso.B6000.A/doc/20150410_PrevadzkovyPoriadok.pdf>.

ADRESY AUTOROV

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

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