

Vplyv dynamických javov na stabilitu elektrizačnej sústavy s pripojenými OZE v elektrizačnej sústave

¹Michal KOLCUN, ²Vladimír KOHAN

¹ Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice, Slovenská republika

² Katedra elektroenergetiky, FEI TU Košice, Slovenská republika

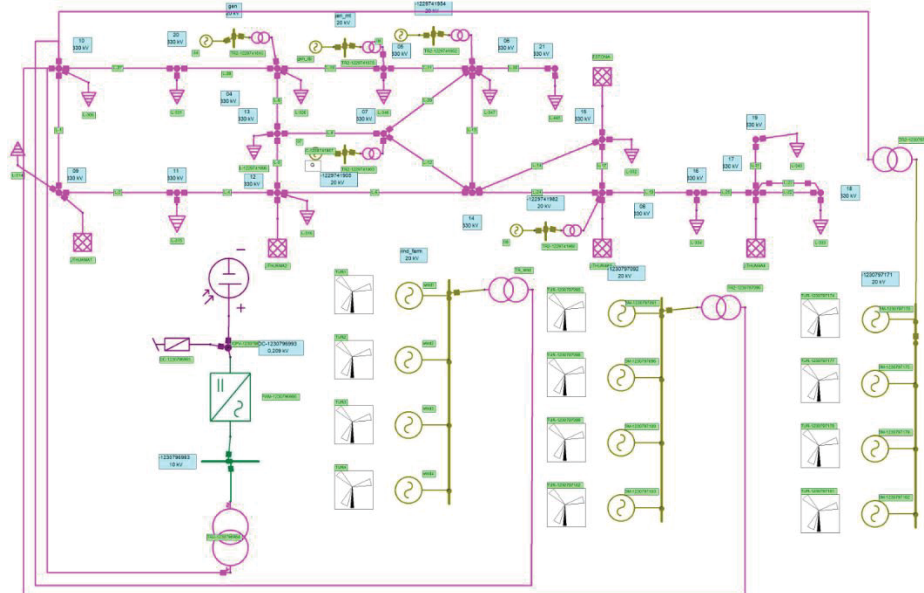
¹michal.kolcun@tuke.sk, ²vladimir.kohan.2@student.tuke.sk

Abstrakt — Práca je zameraná na problematiku spolupráce obnoviteľných zdrojov energie s konvenčnými zdrojmi z hľadiska prenosu elektrickej energie a vplyvov na dynamickú a statickú stabilitu. Jadro práce skúma a vyhodnocuje vplyv obnoviteľných zdrojov energie na elektrizačnú sústavu. Za týmto účelom bolo navrhnutých viacero modelov sústavy a následne vytvorené v programe NEPLAN pričom každej schéme bol nastavený trojfázový skrat (kvôli sledovaniu reakcie OZE) na pozorovanie dynamických dejov. Do prvého boli pripojené solárne zdroje a po nastavení skratu boli pozorované reakcie konvertorov na prudkú zmenu parametrov siete a ich schopnosť vrátiť sieť do ustáleného stavu. Podobným spôsobom bola zostrojená ďalšia schéma siete, do ktorej však bola pripojená veterná elektrárňa. Aj v tomto prípade sa dôraz kládol na reakciu PWM regulátora na vzniknutý skrat. Následne bol vytvorený model reálnej prenosovej sústavy Lotyšska do ktorej boli implementované ako solárne tak aj veterné zdroje. Do danej schémy boli implementované a odsimulované štyri odlišné scenáre, ktoré môžu nastať počas bežnej prevádzky. Špecifické udalosti, ktoré vznikajú počas prevádzky takýchto systémov boli taktiež spomenuté a vyhodnotené.

Kľúčové slová — Obnoviteľné zdroje energie, Šírkovo pulzná modulácia, Výkonová elektronika, NEPLAN, Veterná energia, Slnecná energia, Skrat

I. ÚVOD

Za účelom skúmania dynamických dejov v reálnych podmienkach bol vytvorený model prenosovej sústavy Lotyšska. Údaje potrebné k vytvoreniu modelu boli poskytnuté Technickou univerzitou v Rige. Na Obr. 1 sa nachádza náhradná schéma spomenutej prenosovej sústavy, do ktorej boli pripojené obnoviteľné zdroje energie. Model veternej turbíny v programe NEPLAN predstavuje zapojenie synchronného generátora s regulátorom používaným pri veterných turbínach. Model bloku fotovoltaickej elektrárne je v prostredí programu NEPLAN zložený z viacerých komponentov. Ide o fotovoltaický panel, RC filter a PWM regulátor [1], [2].

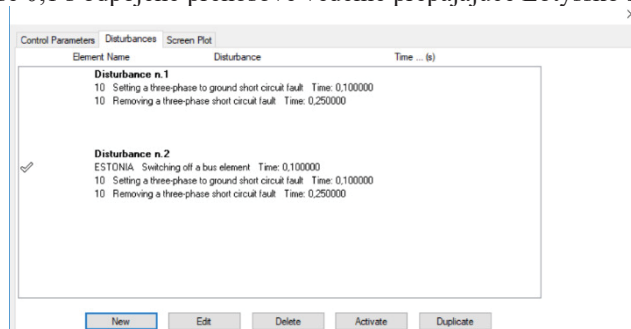


Obr. 1 Schéma prenosovej sústavy Lotyšska s pripojenými FV a WIND zdrojmi

Do siete bola implementovaná solárna elektrárň s výkonom 100 MW a taktiež tri veterné farmy (2x 21 MW, 1x 16 MW). Následne boli vytvorené štyri situácie, ktoré môžu nastať počas bežnej prevádzky.:

- Dostatok slnečného žiarenia a vetra
- Dostatok slnečného žiarenia, ale nedostatok vetra
- Dostatok vetra, ale nedostatok slnečného žiarenia
- Nedostatok slnečného žiarenia ani vetra

V každom variante bol nastavený trojfázový skrat v čase 0,1 s a odstránený bol v čase 0,25 s. Taktiež bolo v čase 0,1 s odpojené prenosové vedenie prepájajúce Lotyšsko s Estónskom.

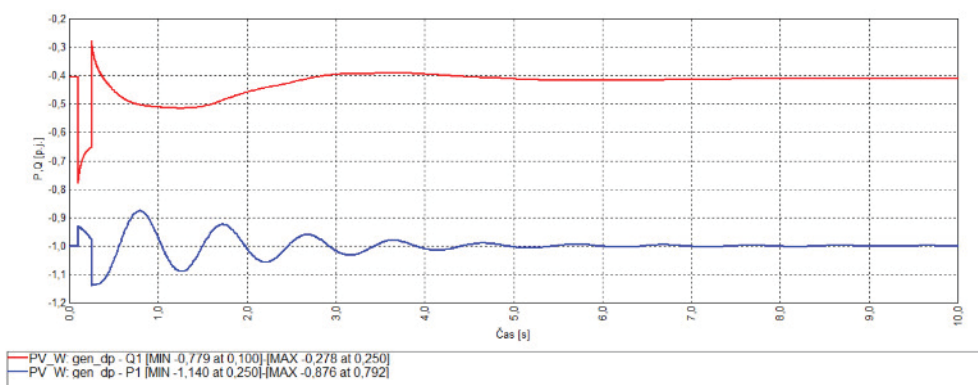


Obr. 2 Nastavenie skratu v programe NEPLAN

II. VARIANT A)

Ideálna situácia nastáva v prípade, že k dispozícii je dostatok výkonu ako zo slnečnej tak aj z veternej farmy. Sieť je dostatočne „tvrdá“ na to, aby sa po odstránení skratu vyrovnalo kolísanie a dostala sa do ustáleného stavu.

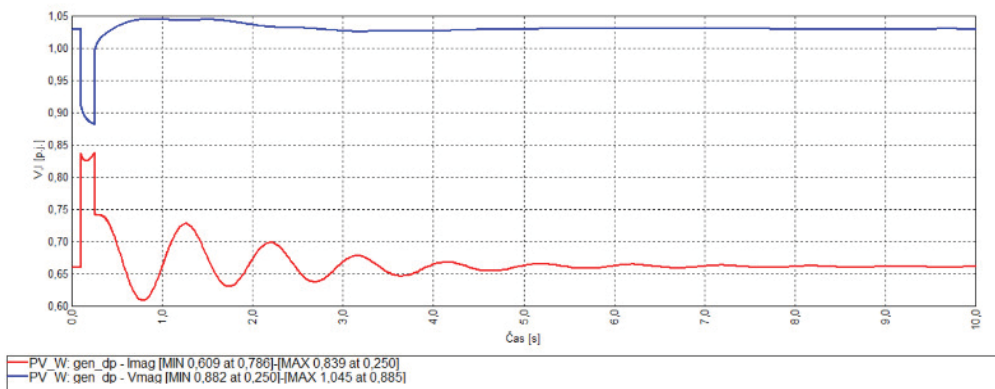
Priebeh činného a jalového výkonu generátora



Obr. 3 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora

Z Obr. 3 je zrejmé, že po prvotnom rozkývaní sa činný výkon postupne ustálil asi v čase 5 s. Generátor pomocou regulátora budiča ustabilizoval napätie a teda jalový výkon. Hodnota jalového výkonu v momente skratu prudko klesla a až po odstránení poruchy narástla. Po následnom poklese sa taktiež stabilizovala v čase 3 s.

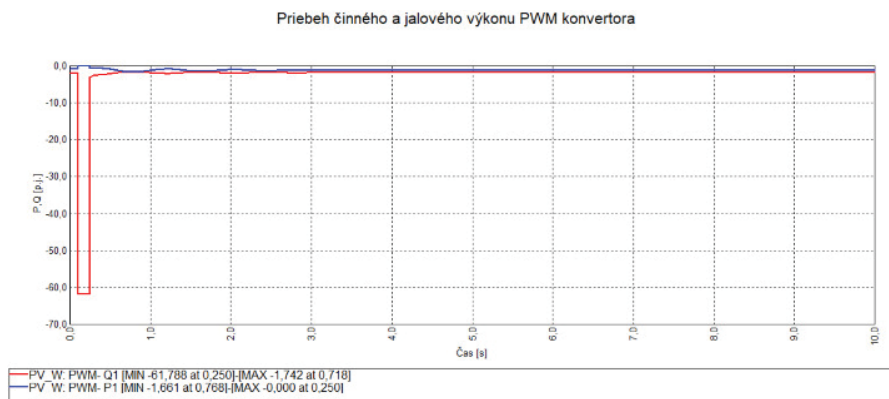
Priebeh prúdu a napätia generátora



Obr. 4 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) generátora

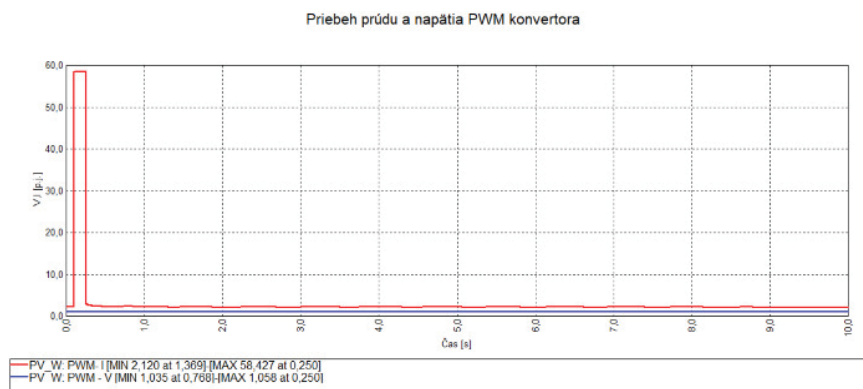
Konštantný prúd v momente skratu strmo narastie, zatiaľ čo napätie má opačný charakter. Tým pádom je potrebné čo najrýchlejšie odstránenie akéhokoľvek typu skratu, pretože so zvyšujúcim

sa časom trvania skratu dochádza k väčšiemu kyvu generátorov. Po prekročení určitého času je možné, že generátor alebo skupina generátorov sa nedokážu ustáliť a úplne vypadnú zo synchronizmu, čo môže mať za následok úplný rozpad sústavy, alebo jej časti. Tento čas sa nazýva kritický čas (určuje čas, dokedy je potrebné eliminovať skrat) a určuje maximálnu dobu, dokedy musia zareagovať ochrany a zabezpečiť tým schopnosť generátorov ustáliť sa. V tomto prípade sa generátor ustálil a najväčšie kyvy vznikali do doby 5 s od odstránenia skratu [3].



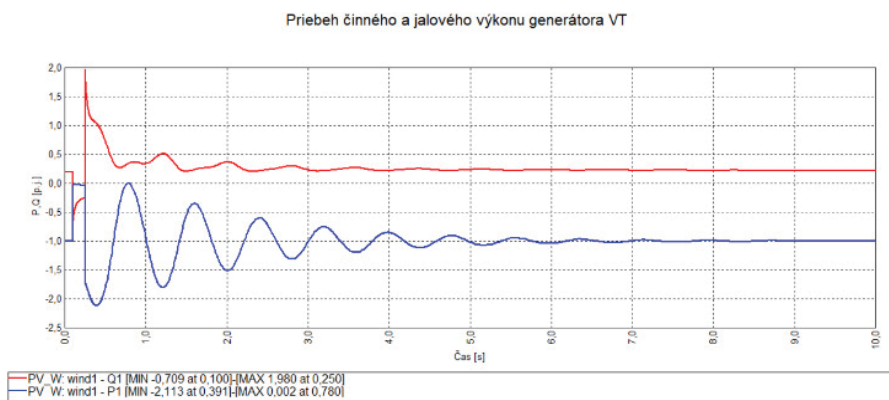
Obr. 5 Pribeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu PWM konvertora

Zaujímavá situácia nastala pri pohľade na Obr. 5, kde je viditeľné, že priebeh činného a jalového výkonu nikdy neprekročil kladné hodnoty. Ak by boli zaznamenané kladné hodnoty, znamenalo by to, že elektráreň odoberá. Konvertor je schopný meniť reverzibilitu, avšak v prípade PWM je to blokované.



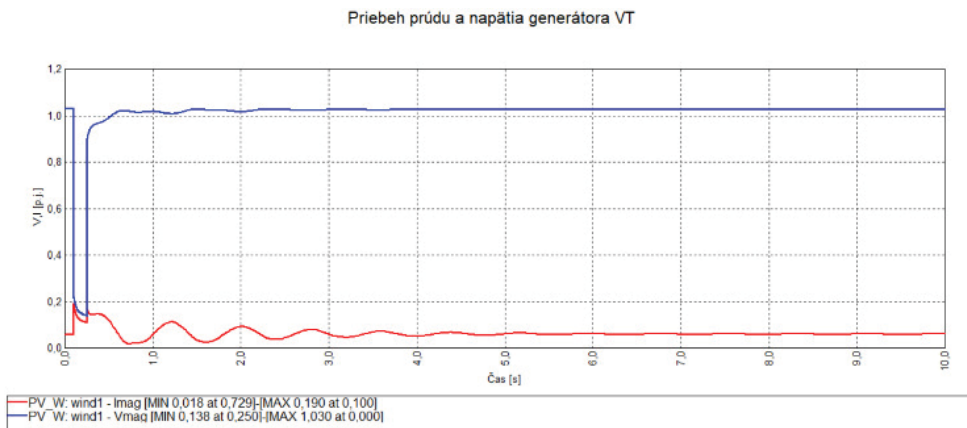
Obr. 6 Pribeh prúdu (červená) a napätia (modrá) PWM konvertora

Na Obr. 5 je znázornený priebeh činného a jalového výkonu PWM konvertora, ktorý dodával výkon z PV elektrárne do siete a teda konvertoval jednosmernú zložku napätia na striedavú zložku. Keďže konvertory sú netočivé zariadenia, ktoré sa skladajú z polovodičových súčiastok (tranzistory, tyristory) predpokladáme menší prechodný dej vzhľadom na to, že tento systém obsahuje len statické (netočivé) prvky. Tieto typy konvertorov sú voči skratom chránené tým, že sa automaticky odpoja od siete, aby bola zabezpečená ochrana drahých a citlivých polovodičových prvkov. V tomto prípade (Obr. 6) by bol PWM konvertor odpojený od siete, kvôli vysokému skratovému prúdu. Skratový prúd by mal fatálne následky na kaskády v konvertore. Tým, že sa jedna len o počítačovú simuláciu a pozorovanie dynamických dejov, bolo možné ponechať PWM konvertor bez odpojenia a sledovať ako sa vysporiada so vzniknutou situáciou. Regulátor PWM konvertora je schopný vďaka vyspelej technológii spínacích výkonových polovodičových prvkov s extrémne rýchlou odozvou vplývať na rôzne zmeny v pripojenej sieti [4]. [6].



Obr. 7 Pribeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora VT

Tým, že veterné turbíny obsahujú točivé generátory, je možné pozorovať viditeľné oscilácie pri poruchách. Vplyvom nastavenej poruchy v programe NEPLAN sa regulátor turbíny po odstránení skratu snažil čo najrýchlejšie ustabilizovať výkon. Z Obr. 7 je možné vidieť, že generátor nevypadol zo synchronizmu na pôvodnom výkone, aký bol dodávaný pred skratom [5].



Obr. 8 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) generátora VT

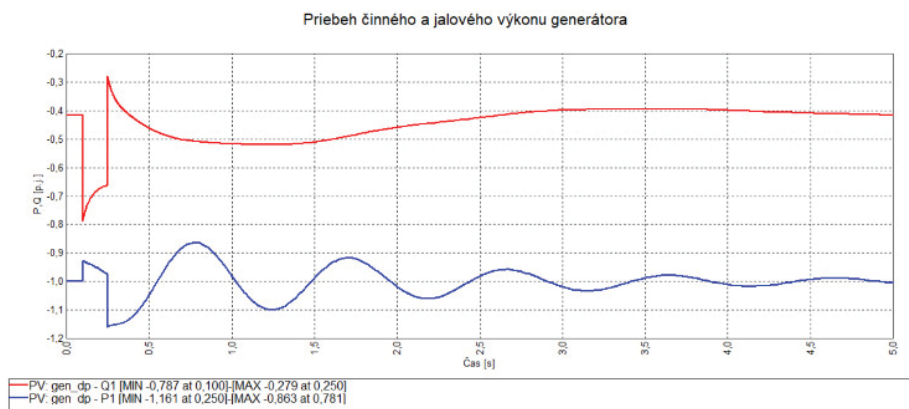
Ako je známe, pri skrate dochádza k prudkému poklesu napätia a naopak nárastu prúdu tak aj v tomto prípade tomu nebolo inak.

Tab. 1 Tabuľka nameraných hodnôt

Generátor								
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	-55,188	0,792	-13,065	0,25	20,9	0,885	1,507	0,25
MIN	-71,82	0,25	-36,611	0,1	17,64	0,25	1,094	0,786
Generátor VT								
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	0,042	0,78	44,925	0,25	20,6	0	1,935	0,1
MIN	-44,373	0,39	-16,087	0,1	2,76	0,25	0,183	0,729
PWM konvertor								
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	0	0,25	-138,14	0,718	11,083	0,25	297,83	0,25
MIN	-195,41	0,768	-4899,83	0,25	10,842	0,768	10,81	1,369

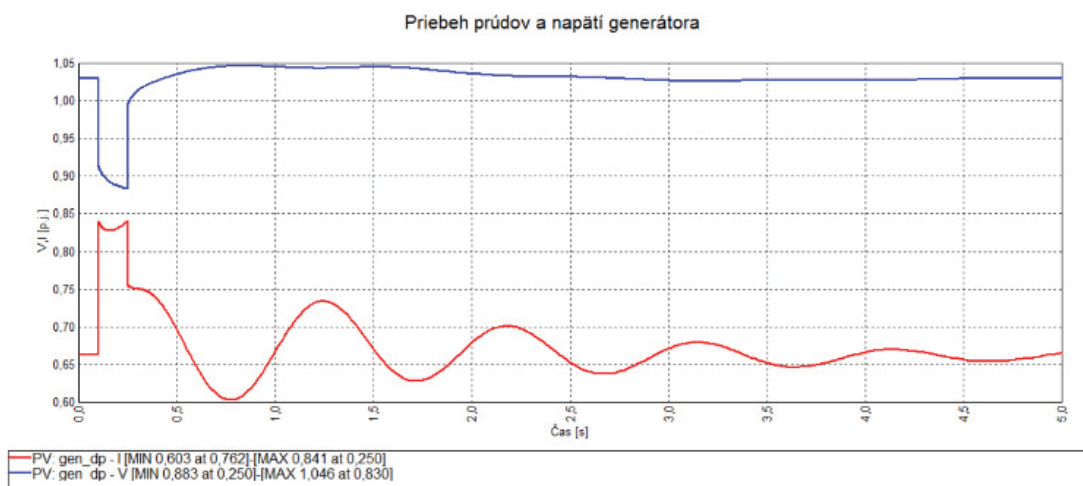
III. VARIANT B)

V tomto prípade simulovaný priebeh poukazuje na stav siete, kde po vyvolaní a následnom odstránení trojfázového skratu je do siete pripojený len solárny obnoviteľný zdroj energie.



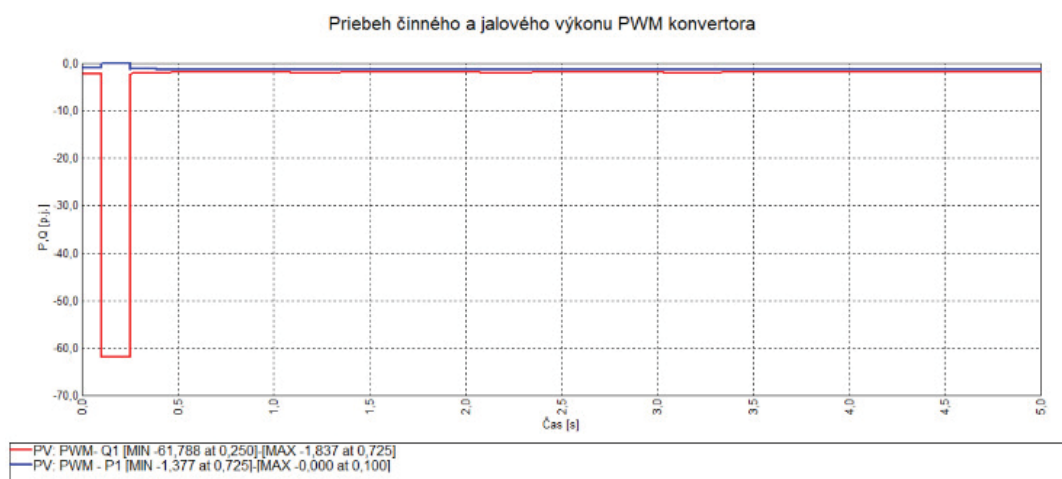
Obr. 9 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora

V čase 0,1 s, teda po vyvolaní skratu hodnota činného výkonu jemne narastie a po následnom odstránení už výraznejšie klesá, čo má za následok rozkolísanie hodnôt činného výkonu generátora, ktoré nie je plne ustálené ani v čase 5 s. Naopak, hodnota jalového výkonu v momente skratu prudko klesla. Preto zareagoval regulátor budiča, ktorý stabilizoval hodnotu napätia. Ako je možné vidieť na Obr. 10, jalový výkon bol teda v závislosti od napätia ustálený približne v čase 3 s rovnako ako napätie.



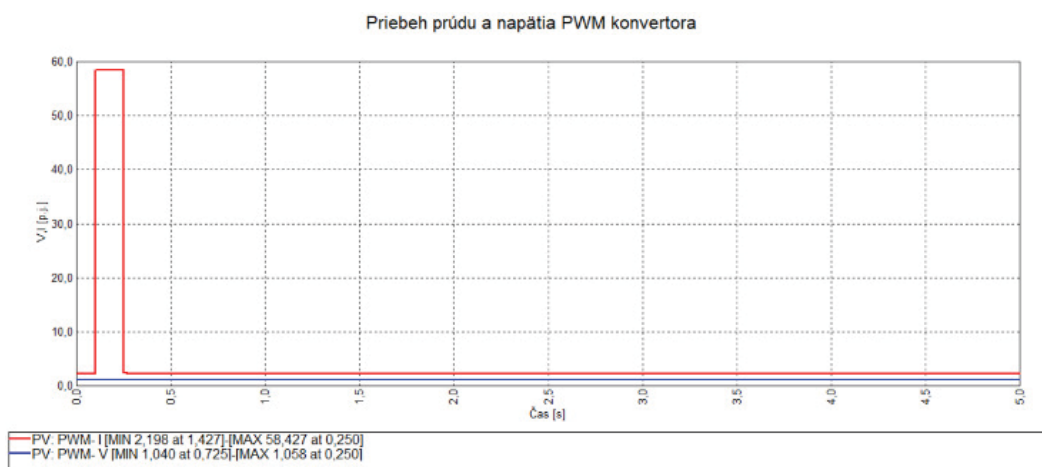
Obr. 10 Priebeh prúdov (červená) a napätí (modrá) generátora

Prúd generátora dosiahol najvyššiu hodnotu v čase odstránenia skratu 2,34 kA. Následne klesol až na hodnotu 1,68 kA a ani do času 5 s sa nebol schopný úplne ustáliť. Systém PWM dokáže pri veterných farmách minimalizovať dynamické javy a kývania generátorov [7], [9].



Obr. 11 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu PWM konvertora

Zdroje používajúce technológiu PWM majú vplyvom rýchleho spínania a teda rýchlej reakcie omnoho menej viditeľné kyvy v porovnaní s točivými strojmi. Je to spôsobené aj tým, že nemajú žiadnu zotrvačnosť. Na druhej strane točivé stroje (napríklad synchronné generátory) majú pri prechodných dejoch pomerne veľkú zotrvačnosť, čo vedie k výrazne vyšším kývaniu výkonu.



Obr. 12 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) PWM konvertora

Vysoký skratový prúd, zaznamenaný na Obr. 12 by spôsobil v reálnej prevádzke odpojenie PWM konvertora od siete. Regulátor PWM konvertora opäť veľmi rýchlo zareagoval a ustálil prúd na pôvodnú hodnotu. Situácie vyobrazené na Obr. 11 a Obr. 12 nemôžu nastať v skutočnej prevádzke, pretože by mali zničujúce účinky pre konvertor. Cieľom bolo podotknúť na schopnosť konvertora rýchlo reagovať na zmeny v sústave a to, že vplyvom rýchlych spínacích zariadení dokáže eliminovať zmeny v sieti [8], [10].

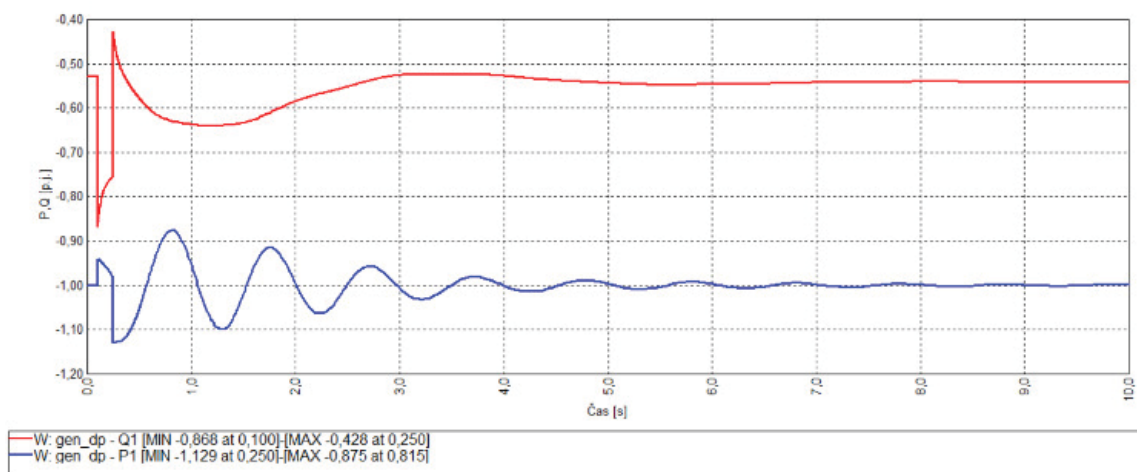
Tab. 2 Tabuľka nameraných hodnôt

	Generátor							
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	-54,369	0,781	-13,041	0,25	20,92	0,83	2,344	0,25
MIN	-73,143	0,25	-36,787	0,1	17,66	0,25	1,681	0,762
	PWM konvertor							
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	0	0,1	-142,28	0,725	10,555	0,25	281,535	0,25
MIN	153	0,725	-4785,7	0,25	10,375	0,725	10,591	1,427

IV. VARIANT C)

V nasledujúcej situácii boli okolnosti nastavené tak, že solárne elektrárne boli odpojené a ako OZE slúžili len veterné farmy.

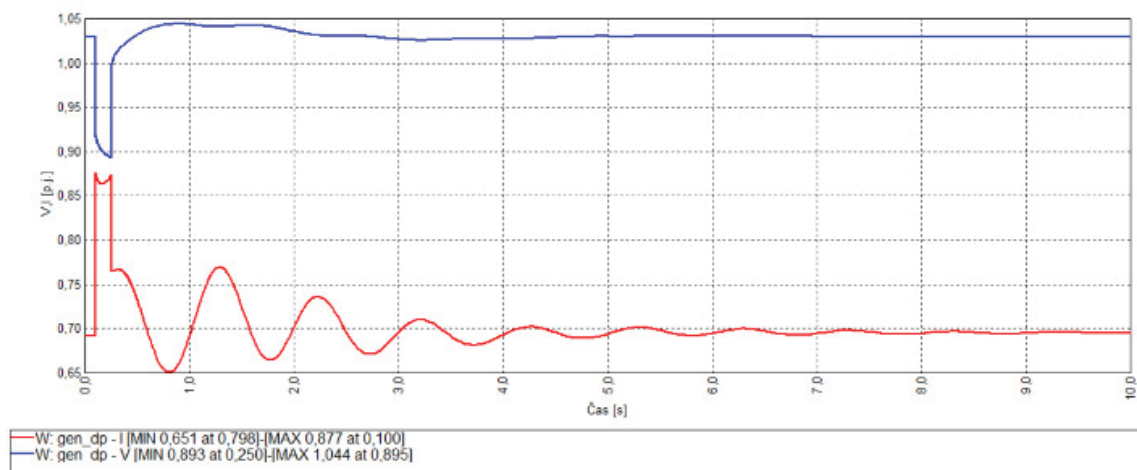
Priebeh činného a jalového výkonu generátora



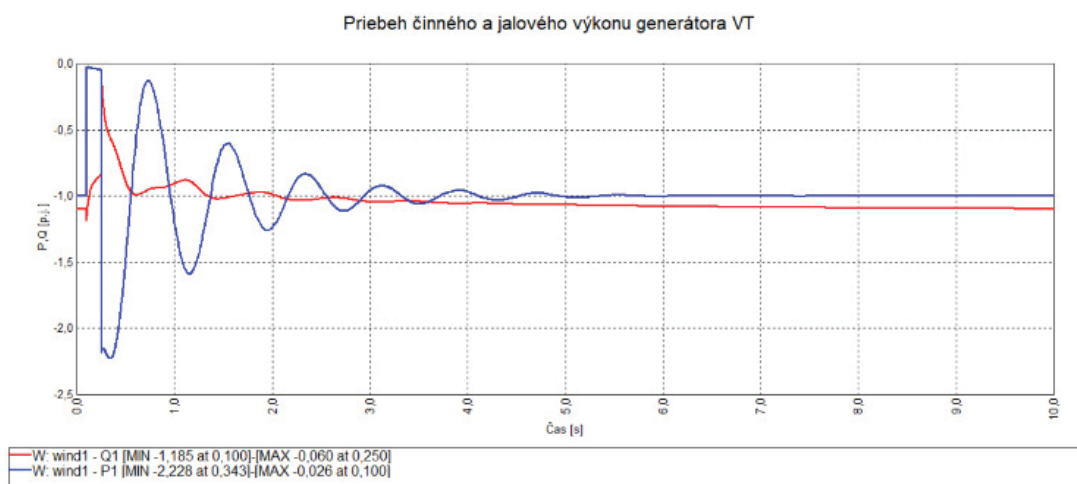
Obr. 13 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora

V momente skratu hodnota konštantného napätia klesla, zatiaľ čo hodnota prúdu kriticky vzrástla. Rozkývanie sa generátora bolo ustálené v čase 8 s. Maximálna hodnota prúdu bola v momente skratu 2,36 kA a daná hodnota sa výrazne znížila až po odstránení skratu. Čas, potrebný na odstránenie poruchy je pre sústavu kľúčový vzhľadom na nepriaznivé účinky dlhotrvajúceho skratu, ako napríklad možnosť úplného výpadku zo synchronizmu. Z Obr. 13 a Obr. 14 je zrejmé, že generátor sa správa veľmi podobne ako v predchádzajúcom variante. Hlavné zmeny sú viditeľné pri PWM konvertore resp. generátore VT.

Priebeh prúdu a napätia generátora

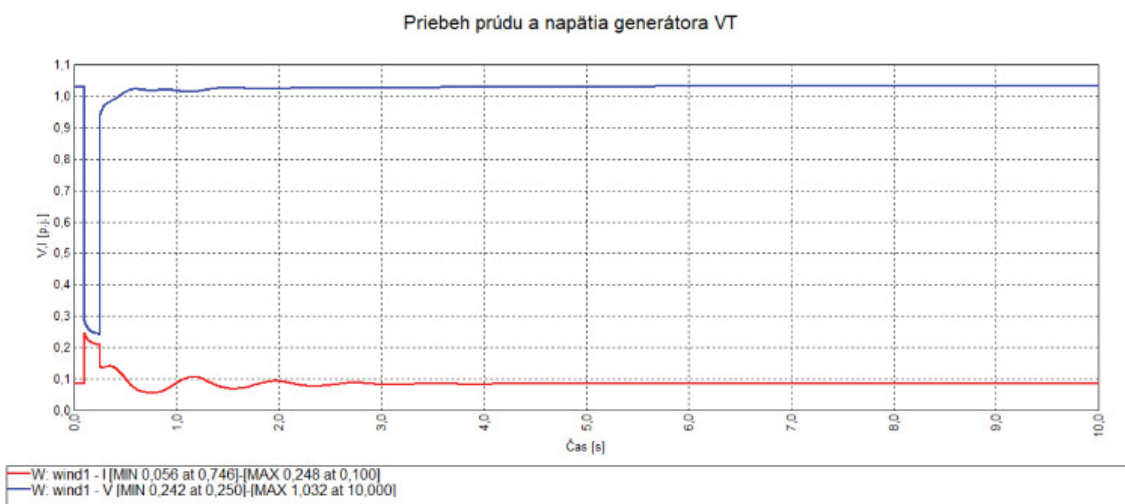


Obr. 14 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) generátora



Obr. 15 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora VT

Zaujímavý pohľad sa naskytá na priebeh činného a jalového výkonu generátora VT v kontraste s Obr. 11, kde je vykreslený priebeh činného a jalového výkonu PWM konvertora. Z Obr. 15 sa dá jednoznačne potvrdiť, že generátory nepoužívajúce technológiu PWM čelia v prípade poruchy alebo skratu značne vyššiemu kývaniu výkonu. V čase 0,1 s, teda v momente skratu generátor dodáva iba 0,546 MW, pričom po odstránení skratu to je takmer 47 MW. Hodnota dodávaného výkonu sa ustáli približne v čase 5 s na pôvodných 21 MW.



Obr. 16 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) generátora VT

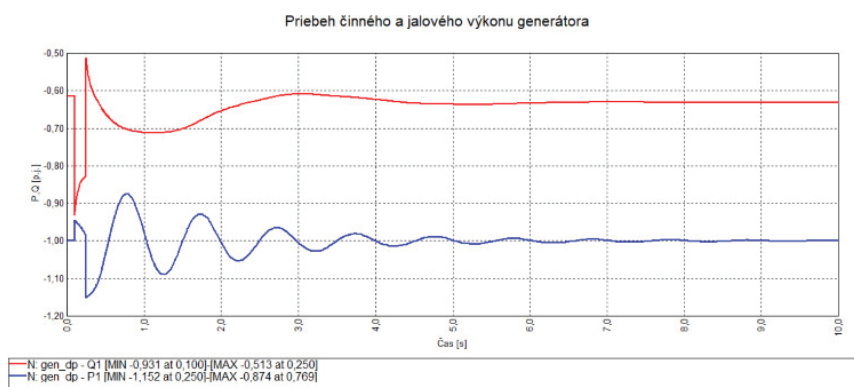
Diametrálne odlišné správanie sa synchronného generátora v protiklade s technológiou PWM je viditeľné aj na Obr. 16, kde je znázornený priebeh prúdu a napätia generátora VT. V čase skratu došlo k výraznému poklesu napätia a to až na 4,84 kV z pôvodných 20,6 kV. Naopak, hodnota skratového prúdu dosiahla trojnásobok konštantnej hodnoty a to až 1,802 kA, pričom hodnota konštantného prúdu pred vznikom skratu bola len 0,654 kA.

Tab. 3 Tabuľka nameraných hodnôt

	Generátor							
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	-55,125	0,815	-17,089	0,25	20,88	0,895	2,361	0,1
MIN	-71,127	0,25	-34,657	0,1	17,86	0,25	1,753	0,798
	Generátor VT							
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	-0,546	0,1	-0,556	0,25	20,64	10	1,802	0,1
MIN	-46,788	0,343	-10,989	0,1	4,84	0,25	0,407	0,746

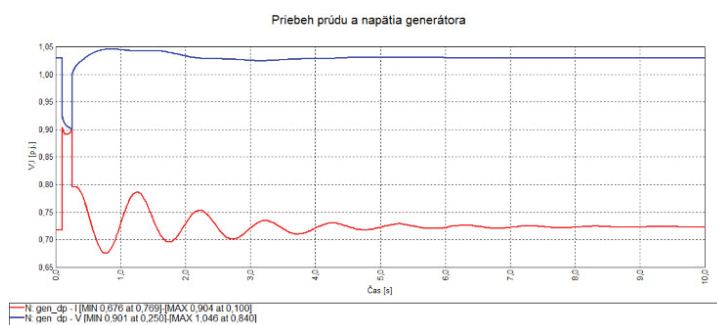
V. VARIANT D)

Model prenosovej sústavy Lotyšska bol zostrojený na základe reálnych údajov. Pripojenie OZE však bolo vytvorené len pre potreby tejto diplomovej práce. V nasledujúcom prípade je znázornená prenosová sústava Lotyšska, bez činnosti obnoviteľných zdrojov energie. Teda vypočítané hodnoty po nastavení poruchy odzrkadľujú reálne správanie sa sústavy.



Obr. 17 Priebeh činného (modrá) a jalového (červená) výkonu generátora

Hodnota jalového výkonu v momente skratu výrazne klesla a regulátoru budiča chvíľu trvalo, kým sa mu podarilo stabilizovať jalový výkon v závislosti od napätia. Hodnota činného výkonu sa ustálila na pôvodných dodávaných 63 MW až takmer po 10 s od momentu skratu.



Obr. 18 Priebeh prúdu (červená) a napätia (modrá) generátora

Konštantný prúd dosahoval pred skratom 1,87 kA a konštantné napätie malo úroveň 20,6 kV. V momente skratu dosiahol prúd svoje maximum 2,35 kA. Napätie sa vyšvihlo do svojho maxima 20,92 kV po odstránení poruchy.

Tab. 4 Tabuľka nameraných hodnôt

	Generátor							
	P [MW]	t [s]	Q [MVar]	t [s]	U [kV]	t [s]	I [kA]	t [s]
MAX	-55,062	0,769	-18,471	0,25	20,92	0,84	2,35	0,1
MIN	-72,576	0,25	-33,521	0,1	18,02	0,25	1,76	0,769

VI.

VII. VYHODNOTENIE A ODPORÚČANIA PRE PRAX (ZÁVER)

V tejto podkapitole sú zhrnuté a stručne opísané výsledky spracovania všetkých variant zapojenia veternej a solárnej elektrárne do elektrizačnej sústavy.

Tab. 5 Porovnanie nameraných hodnôt na generátore vo všetkých variantoch

	Generátor					
	A			B		
	KONŠT	MIN	MAX	KONŠT	MIN	MAX
P [MW]	-63	-71,82	-55,18	-63	-73,14	-54,37
Q [MVar]	-19,27	-36,61	-13,07	-19,49	-36,79	-13,04
U [kV]	20,6	17,64	20,9	20,6	17,66	20,92
I [kA]	1,85	1,09	1,51	1,84	1,68	2,34
	C			D		
	KONŠT	MIN	MAX	KONŠT	MIN	MAX
P [MW]	-63	-71,13	-55,13	-63	-72,58	-55,06
Q [MVar]	-21,16	-34,66	-17,09	-21,96	-33,52	-18,47
U [kV]	1,86	17,86	20,88	20,6	18,02	20,92
I [kA]	20,6	1,75	2,36	1,87	1,76	2,35

V tomto prípade sú pozorované najnižšie výkyvy činného výkonu pri variante C, kedy je do sústavy zapojená len veterná farma. Na druhej strane, variant B má najvyšší kvv činného výkonu, pričom do sústavy bola zahrnutá len solárna elektráreň.

Tab. 6 Porovnanie nameraných hodnôt PWM konvertora vo všetkých variantoch

	PWM Konvertor					
	A			B		
	KONŠT	MIN	MAX	KONŠT	MIN	MAX
P [MW]	-100	-195,41	0	-100	153	0
Q [MVAr]	-166,49	-4899,83	-138,14	-170,39	-4785,71	-142,28
U [kV]	10,48	10,84	11,08	10,48	10,38	10,55
I [kA]	10,70	10,81	297,83	10,89	10,59	281,54

Tab. 7 Porovnanie nameraných hodnôt na generátore VT vo všetkých variantoch

	Generátor VT					
	A			C		
	KONŠT	MIN	MAX	KONŠT	MIN	MAX
P [MW]	21	-44,37	0,042	21	-46,79	-0,54
Q [MVar]	-4,31	-16,09	44,93	10,2	-10,99	-0,56
U [kV]	20,6	2,76	20,6	20,6	4,84	20,64
I [kA]	0,6	0,18	1,94	0,65	0,41	1,8

Výsledkom spracovania údajov môžeme tvrdiť, že činný výkon je v konverteroch dostatočne rýchlo stabilizovaný s veľmi malými osciláciami a skorým ustálením na požadovanú hodnotu. V prípade jalového výkonu, na ktorý reaguje konvertor veľmi citlivo (v prípade skratu) a snaží sa do sústavy dodať viac jalového výkonu vplyvom prudkého poklesu napätia. Týmto spôsobom sa v konverteroch vytvárajú oscilácie jalového výkonu a napätia, pričom tieto kyvy môžu predstavovať hrozbu a zničiť krehké polovodičové prechody v zariadeniach. Oscilácie sú omnoho miernejšie ako pri klasických zapojeniach synchrónnych generátorov cez blokovaný transformátor.

Pre praktické využitie to znamená, že veterné a solárne elektrárne prepojené cez konvertorové meniče nepredstavujú hrozbu alebo vyššie nebezpečenstvo pre dynamickú stabilitu sústavy. Práve naopak, toto riadenie môže zlepšiť a zmierniť oscilácie a kývania generátorov zapojených v ich blízkosti. Najnevyhnutnejšou potrebou týchto konvertorov je ich chránenie. Vzhľadom na to, že systémy obsahujú citlivé polovodičové zariadenia, je potrebné čo najrýchlejšie vypínanie ich od siete, kde vznikla porucha, ktorá by mohla predstavovať nebezpečenstvo pre tieto prvky [1], [11].

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18. Vďaka taktiež patrí aj pani profesorkám z Lotyšského hlavného mesta Rígy z univerzity RTU, ktoré nás sprevádzali, podporovali a boli nápomocné aj pri poskytovaní informácií o parametroch Lotyšskej sústavy. Všetko to bolo možné aj vďaka programu Erasmus+.

LITERATÚRA

- [1] ZICMANE, I. – BERZINA, K. – SOBOLEVSKIS, A. – KOVALENKO, S. 2017. Latvian EPS Stability's Analysis Taking into Account New Development Strategy until 2025. [online]. Riga: 1-6 p. [cit.25.4.2019] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/321401639_Latvian_electrical_power_system_stability's_analysis_taking_into_account_new_development_strategy_until_2025.
- [2] DOI 10.1109/SIELMEN.2017.8123372.
- [3] EREMA, M. LIU, CH. CH., EDRIS, A. A. 2016. Advanced Solutions in Power Systems; HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence, 1. ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2016.
- [4] 271-717 p. ISBN 978-1-119-03569-5.
- [5] GESC. Vplyv rozšírenia obnoviteľných zdrojov energie na reguláciu elektrizačnej sústavy SR, analýza problémov a nedostatkov. [online] 05/2012 [cit. 25.4.2019]. Dostupné na internete: <<http://www.gesc.sk/wp-content/uploads/2014/09/vplyv-rozsirenia-oze-na-regulaciu-elektrizacnej-suustavy-SR-analyza-problemov-a-ndostatkov.pdf>>
- [6] Kosterec, M.; J. Kurimsky, M. Fol'ta, Z. Conka, S. Bucko, „Investigation of effects of non-ionizing electromagnetic fields interacting with biological systems“; In: 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015) Pages: 564-567, 2015
- [7] M. Kolcun, Z. Conka, L. Bena, D. Medved, „Improvement of Transmission Capacity by FACTS devices in Central East Europe power system“ In: IFAC PAPERSONLINE, Vol. 49, Issue:27 Pages: 376-381, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.756, ISSN: 2405-8963
- [8] Z. Conka, M. Kolcun, G. Morva, „Utilizing of Phase Shift Transformer for increasing of Total Transfer Capacity“ In: Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 13, Issue:5, Pages: 27-37, 2016, DOI: 10.12700/APH.13.5.2016.5.2, ISSN: 1785-8860
- [9] P. Hocko, M. Novak, M. Kolcun, Z. Conka, „Influence of photovoltaic power plants on the power system to the prediction for year 2020“ In: 14th International conference on environment and electrical engineering (EEEIC), Krakow, Poland, May 10-12, 2014, DOI: 10.1109/EEEIC.2014.6835848
- [10] M. Kolcun, M. Kornatka, A. Gawlak, Z. Conka, „Benchmarking the reliability of medium-voltage lines“ In: Journal of electrical engineering, Vol. 68, Issue: 3, Pages: 212-215, 2017, DOI: 10.1515/jee-2017-0031, ISSN: 1335-3632
- [11] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.