

POSÚDENIE VPLYVU DISTRIBUOVANÝCH ZDROJOV NA LOKALIZÁCIU MIESTA PORUCHY V SIEŤACH 22 kV

THE REVIEWING OF DISTRIBUTED POWER SOURCES' IMPACT ON FAULT'S LOCALIZATION IN 22 kV NETWORK

P. Bracíník, A. Otčenášová

*Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline
Veľký diel, 010 26 Žilina, tel.: +421 41 513 2151, mail: kves@fel.uniza.sk*

Anotácia Cieľom tohto článku je poukázať na niektoré skutočnosti, ktoré sa objavia pri lokalizácii miesta poruchy v sieťach 22 kV, ak do nich budú vo väčšej miere pripojené distribuované zdroje elektrickej energie, najmä veterné elektrárne. V článku sú uvedené možné spôsoby pripojenia distribuovaných zdrojov v závislosti od ich menovitého výkonu. Sú v ňom taktiež stručne popísané teoretické základy pre riešenie skratov v sieťach 22 kV. V druhej časti článku sú uvedené niektoré prípady pripojenia veternej elektrárne do siete 22 kV, pomocou ktorých je vysvetlený vplyv veterných elektrární na prevádzku siete počas poruchy (skratu) a na následnú lokalizáciu miesta poruchy.

Summary The aim of this paper is to point out some facts that will occur by fault localization in 22 kV networks after the implementation of distributed power sources, especially wind power plants. This paper describes possible connection of these sources into power system in regard to their rated output. It also presents short theoretical background for short circuit calculation in 22 kV network. Then several examples explaining how the point of wind power plant connection can influence network's operation during short-circuits and consequential fault's localization are described in the second part of this paper.

1. ÚVOD

Pri riešení porúch vznikajúcich v distribučnej sústave v sieťach vn je dôležité identifikovať najskôr časť a následne prvok sústavy, ktorý poruchu spôsobil alebo stále je dôvodom poruchy. Úlohou dispečera je na základe jemu dostupných dát a informácií určiť príčinu poruchy a koordinovať obnovenie dodávky elektrickej energie a odstránenie poruchy. Hlavným cieľom je minimalizovať počet odberateľov postihnutých poruchou a čas, počas ktorého sú bez dodávky elektrickej energie.

Ak porucha vznikla na vedení, dispečer ju hľadá pomocou metódy delenia intervalu. Na začiatku lokalizácie poruchy využíva diaľkovo riadené vypínače v príslušných elektrických staniách a diaľkovo riadené zariadenia umiestnené prevažne v kmeňových častiach vedení. Ak sa dispečerovi nepodarí lokalizovať poruchu pomocou diaľkovo riadených zariadení, je od určitého momentu lokalizovania poruchy nútený poslať do terénu montérov. Tí na pokyn dispečera vypínajú alebo zapínajú lokálne ovládané úsekové odpájače v jednotlivých vetvách vedenia (niekedy aj v kmeňovej časti – závisí to od množstva nasadených diaľkovo ovládaných úsekových odpájačov). Montéri po nájdení miesta poruchy nahlásia dispečerovi jej príčinu, na základe ktorej sa určí, či na jej odstránenie postačia pracovníci, ktorí poruchu lokalizovali, alebo bude treba do terénu poslať väčšie množstvo ľudí, prípadne či bude potrebné použiť špecializovanú techniku.

Najčastejšími príčinami vzniku porúch v sieťach 22 kV sú skraty a zemné spojenia. Dochádza pri nich k vodivému spojeniu medzi fázami alebo fázami a zemou, ktoré vedie k zníženiu impedancie elektrického obvodu, a tým ku vzniku nežiaducich veľkých poruchových prúdov. V mieste poruchy dochádza k poklesu napätia, pričom do miesta poruchy tečú poruchové prúdy **zo všetkých zdrojov** v sústave. To je dôležitý fakt, pretože plánované pripájanie distribuovaných zdrojov (DZ) elektrickej energie do siete 22 kV spôsobí zmenu konfigurácie tejto siete, čo sa prejaví aj zmenou veľkosti poruchových prúdov. V súčasnosti sú totiž siete 22 kV väčšinou napájané jednostranne s vetvením a s dĺžkami niekoľko desiatok kilometrov. Distribuovaný zdroj v podobe napríklad veternej elektrárne, malej vodnej elektrárne môže za určitých okolností spôsobiť zmenu konfigurácie siete z jednostranného na dvojstranné napájanie vedenia. To však môže ovplyvniť spôsob lokalizácie miesta poruchy, pretože pri v súčasnosti používanej metóde delenia intervalu sa vychádza z predpokladu, že vedenie je napájané jednostranne. Takže ak ochrana umiestnená na začiatku vedenia dá popud na jeho vypnutie, vedením netečie prúd, čo umožňuje dispečerovi a montérom počas hľadania miesta poruchy manipulovať s diaľkovo a lokálne riadenými úsekovými odpájačmi. Ak však bude do vedenia pripojený DZ, môže za určitých okolností dôjsť k situácií, kedy aj po vypnutí vypínača vývodu vedenia v elektrickej stanici bude určitá časť vedenia pod napätím. Následne je

potrebné preskúmať, ako táto skutočnosť ovplyvní spôsob lokalizácie miesta poruchy.

2. MOŽNOSTI PRIPOJENIA DZ DO ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

Napäťovú hladinu, bod pripojenia a spôsob pripojenia DZ do elektrizačnej sústavy určuje príslušný prevádzkovateľ sústavy na základe technických a ekonomických kritérií. Splnenie technických kritérií v zásade určuje bod a napäťovú hladinu pripojenia, zatiaľ čo ekonomické kritériá viac determinujú spôsob pripojenia do sústavy.

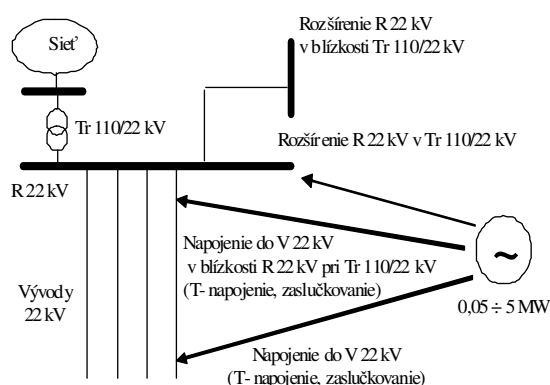
Napäťové hladiny pre pripojenie

V závislosti od sumárneho inštalovaného výkonu DZ je možné určiť napäťovú hladinu a bod pripojenia nasledovne:

- **0,05 až 5 MW** – napäťová hladina vn, bod pripojenia sa realizuje (v závislosti najmä od elektrickej vzdialenosti od napájacieho bodu transformovne 110/22 kV) buď do jestvujúceho vn vedenia, alebo v najnepriaznivejšom prípade priamo do vn prípojnice transformovne 110/22 kV,
- **5 až 20 MW** – v prípade splnenia technických kritérií bod pripojenia môže byť vn prípojnice pri najbližšej transformovni 110/22 kV. V opačnom prípade (neexistencia blízkej transformovne 110/22 kV, nemožnosť rozšírenia rozvodne 22 kV alebo nesplnenie technických kritérií) sa požaduje bod pripojenia na hladine vvn zaslučkovaním alebo priamym pripojením do vvn prípojnice,
- **nad 20 MW** – napäťová hladina vvn.

Možnosti pripojenia v sieti 22 kV sú:

- zaslučkovaním do jestvujúceho vedenia vn cez vstupnú vn rozvodňu distribuovaného zdroja,
- pripojením do vn prípojnice rozvodne vn pri transformácii 110/22 kV.



Obr. 1. Možnosti pripojenia VTE do siete 22 kV

Fig. 1. The possible connections of wind power plant (WPP) to 22 kV network

Grafické zobrazenie uvedených variantov pripojenia na napäťovú hladinu vn je na obr. 1. V ďalších úvahách predstavíme ako distribuovaný zdroj veternú elektrárňu (VTE).

3. TEORETICKÉ ZÁKLADY PRE RIEŠENIE SKRATOV PRI PRIPOJENÍ VTE DO SIETE 22 kV

Výpočet poruchových prúdov v sústavách sa prevažne vykonáva pomocou zložkových sústav. Porucha spôsobí nesymetriu v sústave a nesymetrické stavy sa riešia rozkladom na súmerné zložkové sústavy. Nakoľko sa jedná o trojfázovú sústavu, je potrebné urobiť rozklad na tri súmerné zložky – súlednú, spätnú a netočivú. Je to najčastejšie používaná metóda, metóda Fortescue [1]. Odvodenie vzťahov pre výpočet veľkosti poruchových prúdov je napr. v [2]. Výpočet veľkosti skratových prúdov a skratových výkonov je daný normou [3].

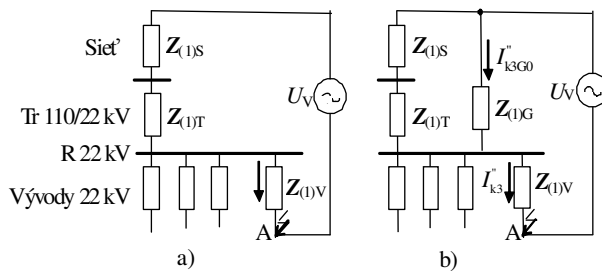
Nakoľko v sústavách prevádzkovaných s neúčinne uzemneným uzlom transformátora vzniká práve pri trojfázovom skrate maximálny skratový prúd, elektrické zariadenia sa dimenzujú na túto hodnotu. V účinne uzemnených sústavách sa dimenzujú na troj- alebo jednofázový skratový prúd, podľa toho, ktorý je väčší [2]. Pre názornosť bude ďalej uvažovaný jednoduchší spôsob, a to výpočet pre trojfázový skrat, kedy je dostatočné určiť súledné zložky impedancií jednotlivých častí elektrickej siete.

Úloha pre trojfázový skrat sa rieši nasledovne:

- zostaví sa jednopólová náhradná schéma pre súlednú zložku, kde sú jednotlivé časti elektrickej siete nahradené svojimi impedanciami určenými podľa vzťahov v [2] a prepočítanými na vzťažné napätie – napätie miesta skratu,
- vypočíta sa výsledná súledná impedancia, ktorá je daná sériovo-paralelným radením všetkých impedancií medzi miestom skratu a všetkými zdrojmi v sústave,
- výsledná veľkosť trojfázového skratového prúdu je následne určená napätím v mieste skratu (vzťažným) a výslednou súlednou impedanciou.

Zmena konfigurácie siete spôsobená pripojením ďalšieho zdroja je naznačená na obr. 2, na ktorom je predstavená náhradná schéma pre súlednú zložku impedancie pre riešenie úlohy v súlade so schémou na obr. 1.

Na obr. 2 sú dve náhradné schémy pre výpočet 3-fázových skratových prúdov pri skrate na konci vedenia. a) je pre riešenie bez VTE a b) s pripojením VTE do vn prípojnice rozvodne 110/22 kV. Ostatné vedenia v schéme sú jednostranne napájané a bez zdrojov, t. j. nezúčastňujú sa na skrate.



Obr. 2. Náhradné schémy pre výpočet 3-f. skratových prúdov pri skrate na konci vedenia – v mieste A: a) bez b) s VTE pripojenou do vn prípojnice rozvodne 110/22 kV

Fig. 2. Equivalent circuit for 3-phase short circuits calculation by fault at the end of power line – in phase A: a) without wind power plant (WPP) b) with WPP connected to MV busbar of 110/22 kV substation

Na obr. 2 sú použité nasledovné označenia:

- A je miesto skratu – koniec vedenia 22 kV,
- U_v je vzťahné napätie – napätie miesta skratu,
- $Z_{(1)S}$ je súsledná komplexná impedancia nadradenej časti elektrizačnej sústavy charakterizovanej 3-fázovým skratovým výkonom siete,
- $Z_{(1)T}$ je súsledná komplexná impedancia transformátora zadaného menovitým zdanlivým výkonom a napätím nakrátko,
- $Z_{(1)V}$ je súsledná komplexná impedancia vedenia v závislosti od typu vedenia,
- $Z_{(1)G}$ je súsledná komplexná impedancia asynchrónneho alebo synchronného generátora zodpovedajúco typu VTE, u veterných parkov je zadaná sumárnym menovitým zdanlivým výkonom a rázovou reaktanciou generátorov všetkých VTE veterného parku,
- I_{k3x}'' sú trojfázové skratové prúdy v rôznych miestach.

Hodnoty uvádzaných súsledných impedancií zodpovedajú reálnym parametrom elektrických zariadení. Nadradená sieť je definovaná 3-fázovým skratovým výkonom $S_{k3}'' = 1000 \text{ MV.A}$, súčiniteľom napätia $c = 1,1 (-)$ a účinníkom skratového prúdu $\cos \varphi_k = 0,114 (-)$ [3]. Transformátor 110/22 kV je definovaný menovitým výkonom $S_T = 40 \text{ MV.A}$, napätím nakrátko $u_k = 11\%$ a činnými stratami nakrátko $\Delta P_k = 123 \text{ kW}$. Vzdušné vedenie 22 kV je definované impedanciou na 1 km dĺžky $Z_K = 0,35 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ a dĺžkou vedenia λ v km. VTE je definovaná rázovou reaktanciou generátora v pozdĺžnej osi $x_d'' = 12,45\%$. Vzťahné napätie je napätie v mieste skratu $U_v = 22 \text{ kV}$.

Ekvivalentné skratové impedancie elektrických zariadení sa určujú nasledovne [2]:

- sieť $Z_{(1)S} = \frac{c \cdot U_v^2}{S_{k3}''} (\cos \varphi_k + j \cdot \sin \varphi_k) (\Omega)$,

- transformátor $Z_{(1)T} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_v^2}{S_T} (\Omega)$,
 $R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_v^2}{S_T^2} (\Omega)$,
- vedenie $Z_{(1)V} = Z_K \cdot \lambda (\Omega)$,
- generátor $X_{(1)G} = X_d'' \cdot \frac{U_v^2}{S_G} (\Omega)$, kde platí,

že ak sú generátory na jednej prípojnici, je možné ich modelovať ako jeden generátor s výkonom daným súčtom jednotlivých výkonov. Ak je výkon niektorého z generátorov výrazne väčší ako ostatných ($S_G > 10 \cdot S_{G_{\text{ost.}}}$), je nutné tento modelovať zvlášť. Nakoľko činná zložka impedancie generátora predstavuje cca 5 % jeho indukčnej reaktancie, budeme zjednodušene uvažovať $Z_{(1)G} = j \cdot X_{(1)G} (\Omega)$.

Ak použijeme vo všetkých vyšetovaných prípadoch tie isté parametre elektrických zariadení, potom pre výpočet budú rozhodujúce len miesto skratu a miesto pripojenia všetkých zdrojov v sústave. Ako príklad uvádzame výpočet I_{k3}'' pre náhradnú schému na obr. 4b), kde dochádza ku skratu v štvrtine dĺžky 22 kV vedenia, v bode C a VTE je pripojená v strede vedenia, v bode B.

Výsledná súsledná zložka komplexnej impedancie obvodu do miesta skratu je

$$Z_{(1)vysl} = \frac{\left(Z_{(1)S} + Z_{(1)T} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right) \cdot \left(Z_{(1)G} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right)}{\left(Z_{(1)S} + Z_{(1)T} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right) + \left(Z_{(1)G} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right)}$$

a výsledný trojfázový skratový prúd potom je

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)vysl}|} (A).$$

Príspevok VTE ku skratovému prúdu v mieste C je

$$I_{k3G}'' = \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} \cdot \left| Z_{(1)G} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right|} (A)$$

a siete $I_{k3C}'' = \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} \cdot \left| Z_{(1)S} + Z_{(1)T} + \frac{Z_{(1)V}}{4} \right|} (A)$.

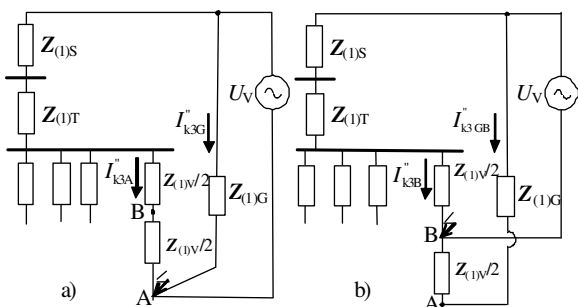
Analogickým spôsobom boli urobené výpočty v nasledujúcej kapitole pre jednotlivé uvedené prípady.

4. VPLYV PRIPOJENIA VTE DO SIETE 22 kV NA POMERY PRI PORUCHE VO VN SIETI

Zo schém na obr. 2 vyplýva, že pri zapojení VTE do prípojnice vn rozvodne 110/22 kV sa pracujúca VTE bude priamo podieľať na náraste skratového prúdu vo vedení prúdom I_{k3G0}'' , ktorý je úmerný výkonu dodávanému veternou elektrárnou do prípojnice 22 kV, ale tiež zodpovedajúci schéme zapojenia siete. V oboch prípadoch, a) aj b), je pre veľkosť výsledného 3-fázového skratového prúdu tečúceho vedením rozhodujúca impedancia vedenia zúčastňujúceho sa na skrate ($Z_{(1)V}$), daná predovšetkým jeho dĺžkou. Ak by došlo ku skratu na prípojnici ($Z_{(1)V} = 0$), mal by v prípade a) skratový prúd reálne okolo 7,5 kA, pre b) by bol I_{k3}'' väčší o príspevok veternej elektrárne I_{k3G0}'' , čo pre výkon napr. 5 MW je cca 1,1 kA. Ak by došlo ku skratu na vedení vo vzdialenosti 5 km od elektrickej stanice, pre prípady a) aj b) by klesli skratové prúdy viac ako o polovicu a rozdiel v ich hodnotách by bol nevýrazný. Pri skrate na vedení vo vzdialenosti 10 km od elektrickej stanice by hodnoty skratových prúdov klesli cca až na 1/3.

Z hľadiska lokalizácie miesta poruchy na vedení 22 kV sa pri takto pripojenej VTE nič nezmení, pretože vypínač vývodu vedenia preruší na popud ochrany vývodu vodivú cestu medzi vedením 22 kV a pracujúcou VTE. Po opätovnom zapnutí vypínača je vedenie napájané opäť len z jednej strany.

Ak je VTE pripojená na konci vedenia (obr. 3), môže dôjsť vplyvom premenlivého charakteru prevádzky VTE ku zmenám jednostranného napájania vedenia na obojstranné a naopak. Toto striedanie môže byť spôsobené nielen plánovanou prevádzkou VTE, ale aj premenlivosťou rýchlosti vetra, ktorý ovplyvňuje výkon dodávaný VTE do siete.



Obr. 3. Náhradné schémy pre výpočet skratových prúdov pri skrate a) na konci 22 kV vedenia, b) v strede 22 kV vedenia, ak VTE je pripojená na konci vedenia v bode A

Fig. 3. Equivalent circuits for short circuits calculation with WPP connected to the end of power line in point A a) with short circuit at the end of 22 kV power line b) in the middle of 22 kV power line

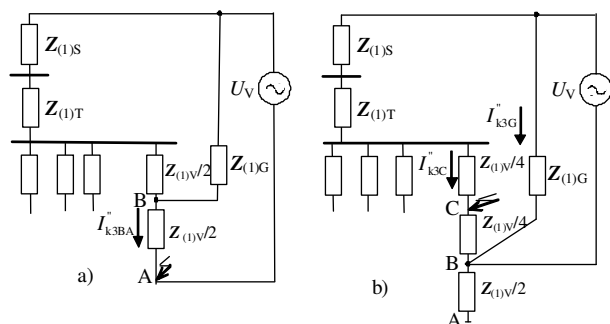
Na obr. 3a) je zobrazená situácia, kedy je VTE pripojená na konci vedenia a k skratu dôjde v mieste jej pripojenia. Pri 5 kilometrovej dĺžke 22 kV vedenia klesne skratový prúd I_{k3A}'' tečúci z elektrickej stanice do miesta skratu vplyvom impedancie vedenia zhruba na polovicu oproti skratovému prúdu, ktorý by vznikol pri skrate priamo na prípojnici v elektrickej stanici. Pri 10 kilometrovej dĺžke 22 kV vedenia klesne skratový prúd I_{k3A}'' asi na tretinu (2,5 kA), rovnako ako v prípade podľa obr. 2a). Príspevok VTE ku skratovému prúdu je I_{k3G}'' a nezávisí od zvyšnej schémy napájania a neovplyvňuje hodnotu I_{k3A}'' . Jeho veľkosť je daná len výkonom vyrábaným vo VTE, pretože nie je tlmený žiadnou impedanciou vedenia. Má výrazný vplyv na veľkosť skratového prúdu v bode A. Pri vyrábanom činnom výkone 5 MW môže dosiahnuť hodnotu okolo 1,1 kA.

Pre lokalizáciu miesta poruchy je dôležité vedieť, aký výkon počas skratu dodávala veterná elektrárňa a ako reagovali ochrany chrániace samotnú VTE. Pri skrate dôjde k vypnutiu vedenia v elektrickej stanici a VTE sa stane jediným zdrojom skratového prúdu tečúceho do miesta skratu. Ak má VTE dostatočný vstupný výkon (fúka dostatočne silný vietor), mali by ochrany chrániace veternú elektrárňu odopnúť VTE od siete, aby nedošlo k poškodeniu zariadení veternej elektrárne vplyvom veľkého záťažového prúdu generátora VTE. Ak však VTE nemá dostatočný vstupný výkon (fúka slabý vietor), môže dôjsť vplyvom nárastu záťažového prúdu generátora k zastaveniu VTE. Bolo by dobré prenášať tieto informácie na dispečing, aby dispečer pri lokalizácii miesta poruchy vedel, či bude vedenie po opätovnom zapnutí napájané dvojstranne alebo nie.

Podobný prípad nastane ak je VTE pripojená na konci vedenia a k skratu dôjde niekde na vedení, napr. v mieste B (obr. 3b)). V tomto prípade dôjde k dvojstrannému napájaniu miesta skratu skratovými prúdmi. Pomer veľkosti skratových prúdov bude závisieť od pomeru veľkostí impedancií vedenia od miesta skratu k prípojniciam a k VTE. Pri známej hodnote veľkosti skratových prúdov by bolo možné pomocou impedancie vedenia vypočítať vzdialenosť miesta skratu od elektrickej stanice, ale aj od VTE. Na základe porovnania týchto dvoch údajov by dispečer mohol zvoliť lepšiu stratégiu lokalizácie miesta poruchy, pretože by nemusel pri metóde delenia intervalu začať v elektrickom strede vedenia, ale bližšie k jednému z koncov vedenia, čo by znížilo dobu trvania lokalizácie poruchy a taktiež počet manipulácií, čo by sa pozitívne prejavilo predĺžením intervalov údržby jednotlivých zariadení.

Z hľadiska lokalizácie miesta poruchy sa ako najzložitejší prípad javí priebežné pripojenie VTE na vedenie 22 kV (obr. 4). Poskytuje totiž najväčší

počet variant výskytu miesta skratu a s tým súvisiace zmeny spôsobu napájania vedenia z jednostranného na dvojstranné, pričom sa tu opäť prejavuje premenlivosť výroby elektrickej energie vo VTE.



Obr. 4. Náhradné schémy pre výpočet skratových prúdov pri skrate a) na konci 22 kV vedenia, b) v štvrtine 22 kV vedenia, ak VTE je pripojená v strede vedenia

Fig. 4. Equivalent circuits for short circuits calculation with WPP connected in the middle of power line in point B a) with short circuit at the end of 22 kV power line b) in the quarter of 22 kV power line

Znova môže dôjsť k situácii, kedy vplyvom prevádzky VTE zostane úsek vedenia za miestom skratu až po bod A pod napätím, ktorého veľkosť závisí od vzdialenosti od miesta skratu a od miesta pripojenia VTE.

Podľa veľkosti záťažového prúdu VTE by sa dalo bližšie určiť ako ďaleko od veternej elektrárne došlo ku skratu, či už v prípade vzniku skratu za miestom pripojenia VTE (obr. 4a)) alebo pred ním (obr. 4b)). V oboch prípadoch sa totiž na veľkosti skratového prúdu podieľa nadradená sieť spolu s veternou elektrárnou (ak je v prevádzke).

5. ZÁVER

Implementácia nových typov distribuovaných zdrojov a najmä veterných elektrární do sietí 22 kV si okrem iného vyžiada bližšiu analýzu vplyvu ich spôsobu pripojenia na lokalizáciu miesta poruchy v týchto sieťach, pretože dôjde k zmene ich konfigurácie. Bude totiž dochádzať vplyvom premenlivého charakteru prevádzky veterných elektrární k zmenám v napájaní vedení 22 kV z jednostranného na dvojstranné a naopak. Ukazuje sa, že bude potrebné diaľkovo prenášať údaje o činnosti VTE na riadiace dispečingy, aby dispečeri vedeli, ako majú napájané vedenia počas riešenia porúch. Pozitívom bude využitie týchto údajov pre rýchlejšie určovanie miesta poruchy.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0560-07.

LITERATÚRA

- [1] Altus, J., Novák, M., Otčenášová, A., Pokorný, M.: *Elektromagnetická kompatibilita elektrizačných sústav*, ŽU v Žiline EDIS, 2004, ISBN 80-8070-227-6
- [2] Kolcun, M., Chladný, V., Varga, L. a kol.: *Analýza elektrizačnej sústavy*, TU Košice, KOPRINT B. Bystrica 2005, ISBN 80-89057-09-8
- [3] TNI IEC/TR 60909-1 (33 3020), 2000. Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách. Časť 1: Súčinitele na výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách podľa IEC 60909