

Michal Kolcun, Dušan Medveď

## Analýza vplyvov nepriaznivo pôsobiacich na ES SR a ich eliminácia

Tento príspevok sa venuje analýze dynamických dejov vyskytujúcich sa v distribučnej sústave (konkrétnej sieti VN) pri jej prevádzke s implementáciou nových, obnoviteľných zdrojov energie. Tieto dynamické deje boli analyzované okrem pôvodného statického zaťaženia siete s novým zaťažením dynamického charakteru, ktoré vernejšie zachytáva situáciu v reálnej distribučnej sieti. Hlavným cieľom príspevku je poukázať na správanie sa siete pri implementácii obnoviteľných zdrojov energie vo VN sieti a to najmä zdroja s premenlivým charakterom výroby a dodávky (FVE).

Kľúčové slová: elektrizačná sústava, dynamické deje

This paper is devoted to the analysis of dynamic events occurring in the distribution system (specifically the HV network) during its operation with the implementation of new, renewable energy sources. These dynamic events were analyzed in addition to the original static load of the network with a new load of a dynamic nature, which more faithfully describes the situation in a real distribution network. The main goal of the paper is to point out the behavior of the network during the implementation of renewable energy sources in the HV network, in particular a source with a variable nature of production and supply (PVE).

Keywords: electric power network, dynamic phenomena

### I. ÚVOD

Elektrizačná sústava (ES) je súborom výkonových prvkov, ktoré sú v prevádzke riadené tak, že na seba vzájomne pôsobia a sú neustále viazané jednotou chodu výroby, prenosu a spotreby elektriny. V ES rozlišujeme

- *vlastné elektrické parametre* – rezistencia, reaktancia, konduktancia a kapacitancia
- *prevádzkové elektrické parametre* – napätia, prúdy, činné a jalové výkony, frekvencia

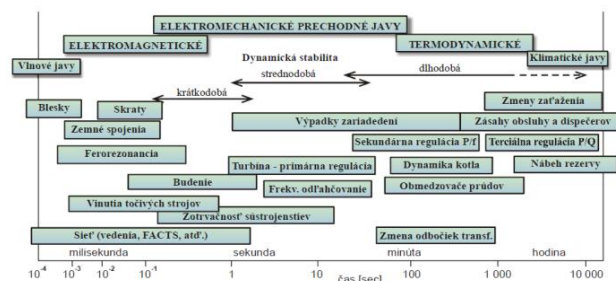
Základný prevádzkový stav ES je ustálený stav. Vtedy považujeme všetky jej prevádzkové veličiny za konštantné. Vypočítaný ustálený stav je základným predpokladom pre riešenie prechodných javov akými sú napríklad skraty, statická a dynamická stabilita a pod. Ak sa ustálený stav naruší (manipulácie v ES, skraty, náhla zmena zaťaženia...), vzniká prechodný jav, ktorý vyústí buď do prechodu ES do nového ustáleného stavu, prípadne sa ustálený stav nedosiahne a naruší sa stabilita sústavy. Prechodný jav je určitá časová zmena, v rámci ktorej sa určité množstvo energie, naviazané k danému elektrickému obvodu, mení na inú formu energie. Táto zmena samozrejme neprebíha skokovo, ale podlieha istým fyzikálnym zákonom. Z tohto hľadiska sa prechodné javy v ES rozdeľujú na

- *vlnové prechodné javy* – majú taký rýchly priebeh, že pri ich vyšetrovaní nemožno zanedbať šírenie sa elektromagnetických vln v jednotlivých prvkoch ES. Tým prechádzame k modelovaniu prvkov ES s rozloženými parametrami, teda, popisujú sa pomocou parciálnych derivácií. Jedná sa hlavne o prepätia.
- *elektromagnetické prechodné javy* – majú dlhšie trvanie, vzhľadom na to sa rýchlosť šírenia elektromagnetických vln zanedbáva a prechádza sa k modelovaniu jednotlivých prvkov sústrednými parametrami. Taktiež zanedbávame zmeny otáčok točivých strojov, čo nám umožňuje zanedbať vplyv mechanických vlastností prvkov ES na priebeh tohto prechodného javu. Týmto predpokladmi popisujeme tieto

javy iba obyčajnými diferenciálnymi rovnicami, ktorých parametrom je čas. Patria sem najmä skraty.

- *elektromechanické prechodné javy* – trvajú v širokom časovom rozpätí, pri ich riešení zanedbávame šírenie sa elektromagnetických vln v prvkoch ES. Charakterizuje ich mechanický pohyb rotorov generátorov, daný mechanickými zotrvačnými vlastnosťami stroja, taktiež elektromagnetickými silami, ktorými na generátor vplyvajú jednotlivé prvky ES, predstavujúce väzby medzi paralelne pracujúcimi generátormi. Na ich matematicky popis využívame v prípade generátorov obyčajné diferenciálne rovnice, pri ostatných prvkoch si vystačíme s algebrickými rovnicami. Patrí sem kývanie generátorov.

Na nasledujúcom obrázku vidíme klasifikáciu prechodných javov a ich približné časové rozpätia trvania.



Obr. 1. Klasifikácia a typické časové rozpätia prechodných javov

Na základe príčiny vzniku prechodného javu ich delíme na:

- *normálne prechodné javy* – vznikajú pri bežných prevádzkových zásahoch, prevádzkové parametre sa menia len nepatne (prípájanie a odpájanie prvkov, spotrebiteľov, zmeny ich výkonov)
- *poruchové prechodné javy* – vznikajú ako dôsledok poruchy. Mení sa elektrické zapojenie ES, vznik skratov s následným odpojením prvkov od ES, zemné spojenia, atď.

Menia sa prevádzkové parametre a energia viazaná k elektrickým a elektromechanickým obvodom.

## II. MOŽNOSTI ZNÍŽENIA NEPRIAZNIVÝCH VPLYVOV

Existuje viacero zariadení, ktoré dokážu zmierniť (znižit') nepriaznivé vplyvy na ES. Môžeme spomenúť niektoré z nich, menovite akumulátorové batérie (ESS systémy), superkondenzátory, energia stlačeného vzduchu, zdroje nepretržitého napájania, motorgenerátory, statické kompenzátory napätia, automatické stabilizátory napätia, zariadenia FACTS a iné.

### A.) Zariadenia FACTS

Skratka FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) sa definujú ako striedavé prenosové systémy na báze výkonovej elektroniky a ďalších statických regulátorov na zlepšenie regulovateľnosti a zvýšenie prenosovej schopnosti. FACTS regulátor je teda systém na báze výkonovej elektroniky a iné statické zariadenie poskytujúce reguláciu jedného, prípadne viacerých parametrov v striedavej prenosovej sústave. Zvyčajne regulujú napätie, prúd, impedanciu, fázový uhol.

Sú známe 4 kategórie FACTS regulátorov:

- sériové regulátory
- paralelné regulátory
- kombinované sériovo-sériové
- kombinované sériovo-paralelné

Paralelný regulátor – môže predstavovať regulovateľnú impedanciu (filmivka/kondenzátor), regulovateľný zdroj s frekvenciou podľa potrieb alebo ich kombinácia. Vo všeobecnosti všetky paralelné regulátory injektujú prúd do siete v mieste pripojenia.

Sériový regulátor – rovnako, ako v predošlom prípade (paralelný regulátor), môže byť regulovateľná impedancia, regulovateľný zdroj, respektíve kombinácia. Vo všeobecnosti sú všetky sériové regulátory zdroje napätia zapojené v sérii s vedením.

Kombinovaný sériovo-sériový regulátor – existuje v dvoch možných vyhotoveniach. Prvé predstavuje kombináciu koordinovane riadených oddelených sériových regulátorov zapojených do vedení. Druhý prípad je unifikovaný regulátor, kedy sériové regulátory poskytujú nezávislú sériovú kompenzáciu jalového výkonu v každom vedení a prenos činného výkonu medzi vedeniami prostredníctvom jednosmernej linky spájajúcej tieto regulátory. Takéto vyhotovenie umožňuje reguláciu činného aj jalového výkonu vedení a tým maximalizovať využitie prenosovej schopnosti vedení.

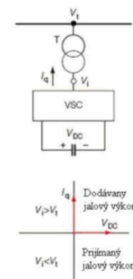
Kombinovaný sériovo-paralelný regulátor – existuje taktiež v dvoch vyhotoveniach. Prvé vyhotovenie je kombinácia koordinovane riadených oddelených sériových a paralelných regulátorov. Druhé, nazývané ako Unified Power Flow Controller (unifikovaný regulátor toku výkonu), predstavuje kombináciu sériových a paralelných regulátorov navzájom prepojených jednosmerným vedením. Výhodou tohto vyhotovenia je, že okrem sériovej kompenzácie a injektovania prúdu do sústavy umožňuje i výmenu činného výkonu medzi sériovými a paralelnými regulátormi.

### B.) Statický synchronný kompenzátor (STATCOM)

Ďalším FACTS regulátorom je STATCOM (Statický synchronný kompenzátor), ktorý patrí do skupiny paralelných regulátorov (injektuje prúd), ktorý sme použili v simulácii, uvedenej v tomto príspevku.

STATCOM pracuje so synchronným statickým zdrojom napätia, ako aj so synchronným fázovým posunom. Vyrába tri sínusové napätia základnej frekvencie a s možnosťou regulácie amplitúdy a fázového posunu. Pozostáva z napäťového meniča, väzobného

transformátora a riadiacich prvkov. Prípadne môže byť energia zdroja nahradená kondenzátorom – v ustálenom stave výkonová výmena medzi STATCOM a sústavou prebieha len induktívne. Jeho kapacitný/induktívny prúd môžeme regulovať nezávisle od napätia v sieti.



Obr. 2. Statický synchronný kompenzátor (STATCOM)

Medzi funkcie, vykonávané týmto zariadením v praxi, patria:

- dynamická stabilizácia napätia – redukovanie kolísania napätia, zvyšovanie prenosových možností,
- zvyšovanie kvality výkonu,
- podpora napätia v ustálenom stave.

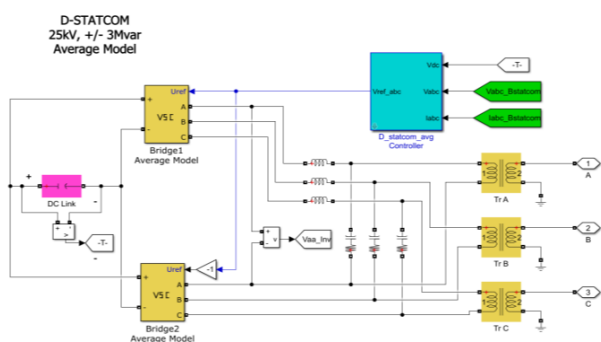
## III. MODEL SIETE A VYUŽITIE D-STATCOM

Dynamicke deje boli analyzované na vybranej časti vn siete východného Slovenska. Pri simulácii sme uskutočnili niekoľko zjednodušení – sieť bola modelovaná ekvivalentnými záťažami (činné a jalové zaťaženie odpovedá skutočnému činnému a jalovému zaťaženiu danej časti siete – vedenia, skupinové prípojky). Taktiež sa najdôležitejšie úseky vedenia namodelovali iba RL členmi (bez priečných členov G, C), zodpovedajúcimi skutočným hodnotám daných vedení. Dané deje boli analyzované na 30 minútovom (1800 s simulačný čas) časovom intervale.

Daná sieť je napájaná vonkajšou nadradenou 110 kV sieťou prostredníctvom znižovacieho transformátora 110/22 kV. V našom prípade do nej ale pribudla nová záťaž – podnik (dynamická záťaž) pripojený na svorkách skupinovej prípojky V2, menovitého odoberaného výkonu na úrovni 1 MVA. Táto záťaž je dobre kompenzovaná,  $\cos \varphi = 0,95$  indukčných. Tento odberateľ je úrovne nn a k sieti je pripojený distribučným transformátorom 22/0,4 kV menovitého výkonu 2 MVA.

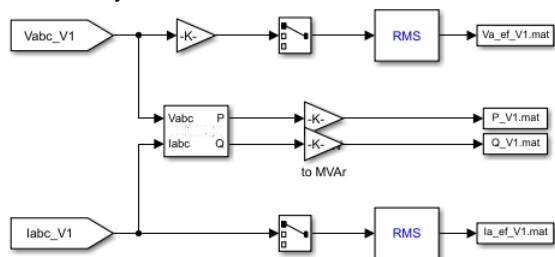
Ako model zariadenia D-STATCOM sme použili model v prostredí Simulink. Jedná sa o diskretný model s možnosťou regulácie jalového výkonu  $\pm 3$  MVar. Tento model je natívne stavaný na 60 Hz frekvenciu, preto sme ho pre naše potreby museli prispôsobiť ponastavením jednotlivých stavebných blokov na našu frekvenciu 50 Hz a napätie.

Keďže model zariadenia D-STATCOM (STATCOM pre použitie v distribučnej sieti) pre diskretný spôsob výpočtu je vhodný iba na simuláciu trvajúcu niekoľko sekúnd, museli sme pristúpiť k nasledujúcemu zjednodušeniu – simuláciu s týmto zariadením sme podobnostným kritériom znížili z 1800 s (30 min) na simulačnú hodnotu 30 sekúnd a adekvátne sme upravili aj charakteristiku dynamickej záťaže.



Obr. 3. Model statického synchronného kompenzátora pre simuláciu (D-STATCOM)

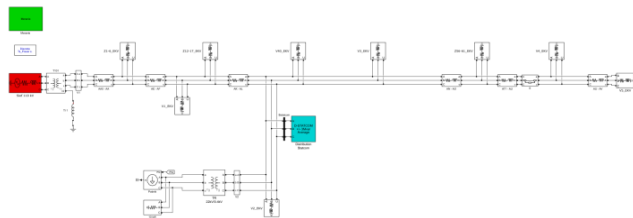
Vo vybraných, dôležitých bodoch siete sme merali napätia v týchto bodoch a prúdy, tečúce týmito bodmi blokom „Three-Phase V-I Measurement“. Následne sa z odmeraných napätí a prúdov vypočítali prislúchajúce prenášané činné, jalové výkony. Z odmeraných napätí a prúdov sa vypočítali ich efektívne hodnoty blokom RMS. Keďže naša sieť je súmerná (súmerne zdroje, zaťaženie), zapisovali sme efektívne hodnoty iba vo fáze A. Odmerané výsledky sa následne zapisovali do .mat súborov, ktoré sa dajú jednoducho otvoriť a spracovať/analyzovať.



Obr. 4. Úprava a zapisovanie skúmaných veličín do .mat súborov v prostredí Simulink

#### IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIE VPLYVU PRECHODNÉHO DEJA V SIETI

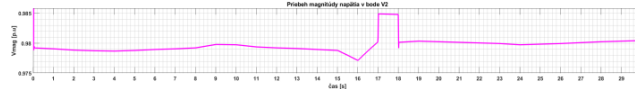
Popis deja: V tomto prípade sa v sieti prevádzkuje len podnik (dynamická záťaž) a zariadenie D-STATCOM. V 17. sekunde sa na 1 s rozpojí vypínač S, čo presne korešponduje s časom v simulácii 1800 s.



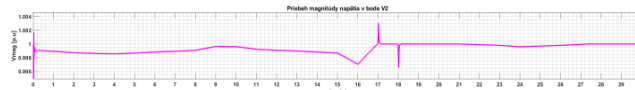
Obr. 5. Zapojenie siete v prostredí Simulink

V tomto prípade sme sa zamerali na kvalitu napätia v bode pripojenia podniku (V2). Daný podnik obsahuje výrobné technologické zariadenia citlivé na kvalitu dodávanej energie (napätia). Na udržiavanie a zlepšenie kvality napätia pre odberateľa (podnik) za rôznych prevádzkových podmienok nám poslúži zariadenie D-STATCOM. Toto zariadenie sme pripojili do uzla pripojenia odberateľa (podniku). Zariadenie D-STATCOM je schopné

poskytovať, respektíve odoberať jalový výkon na úrovni až 3 MVar. Toto zariadenie sme do siete pripojili hlavne za účelom regulovania napätia v bode pripojenia podniku k sieti (V2) – konkrétne jeho magnitúdu, no z jeho prítomnosti budú samozrejme benefitovať aj nn odberatelia bližšej skupinovej prípojky V2.

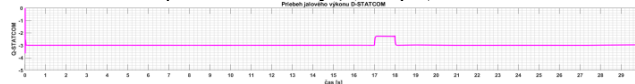


Obr. 6. Priebeh magnitúdy napätia v bode V2 bez D-STATCOMu



Obr. 7. Priebeh magnitúdy napätia v bode V2 so D-STATCOMom

Ako vidieť, magnitúda napätia v bode pripojenia podniku (V2) oscilovala okolo 0,98 p.u. v prípade bez zariadenia STATCOM-u. V prípade vypnutia skupinových prípojek vypínačom S strmo vzrástla hodnota napätia a počas celej doby prechodného stavu (1 s) ostávala približne konštantná, na úrovni približne 0,985 p.u. Vidieť, že daný dynamický dej (vypnutie vypínača S) nespôsobil razantný nárast magnitúdy napätia, nakoľko nastal ďalej v sieti od daného bodu (V2), a sieť bola napájaná tvrdým zdrojom (sieťou), ktorý na dané odľahčenie adekvátne zareagoval a zmiernil nárast napätia v sieti. Vidíme, že v prípade, kde v sieti pracuje D-STATCOM, je magnitúda vyššia, nakoľko je D-STATCOM nastavený na udržanie napätia na úrovni 1 pomernej jednotky v mieste jeho pripojenia (22 kV – efektívna hodnota napätia medzi fázami), teda, D-STATCOM pracuje celý čas iba v kapacitnom režime (dodáva jalový výkon na podporu napätia v danom bode). Magnitúda sa v tomto prípade pohybuje v intervale približne 0,998 až 1 p.u. Tým, že bolo v ustálenom stave vyššie napätie vďaka prítomnosti D-STATCOM, tak aj napätie v prípade dynamického deja vzrástlo nad 1 pomernú jednotku, no tento nárast bol úplne zanedbateľný (0,003 p.u.).



Obr. 8. Priebeh jalového výkonu so D-STATCOMom



Obr. 9. Detail priebehu jalového výkonu so D-STATCOMom

Ako vidieť z priebehu jalového výkonu, D-STATCOM celý čas dodával jalový výkon na úrovni menovitého výkonu 3 MVar, v priebehu dynamického deja (vypnutie vypínača S) reagoval na tento nárast v napätí znížením dodávaného výkonu o približne 730 kVar.

#### V. ZÁVER

D-STATCOM má v distribučnej sústave svoje miesto hlavne vo vývodoch slabších napätových pomerov, vývodoch, kde sa okrem nn odberateľov nachádza ťažký priemysel nestálej spotreby – elektrické oblúkové pece atď., ktorí svojou prevádzkou vplyvajú na kvalitu napätia zvyšných, citlivých odberateľov nn úrovne daného vývodu. Respektíve, tieto zariadenia možno použiť priamo v mieste pripojenia takýchto technologických podnikov k sieti, danému podniku by bola zabezpečená požadovaná kvalita energie, ktorá je v prípade liniek s pohonmi a na napätie citlivými zariadeniami kľúčová. Počiatočné

investičné náklady do tohto zariadenia sú síce vysoké, no v prípade kľúčových priemyselných tepien by sa predišlo škodám, možno aj mnohonásobne vyšším ako boli investičné náklady. Prípadne by sa toto zariadenie mohlo pripojiť v terciári privodného transformátora určitej siete, čím by sme zabezpečili, že pri náhlom výraznejšom zaťažení/odľahčení siete by bolo možné eliminovať nepriaznivé vplyvy týchto zmien okamžite.

#### POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu č. APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou“, ako aj projektu č. APVV-21-0312 „Dynamické prideľovanie kapacít elektrickej energie“.

#### LITERATÚRA

- [1] Kolcun, M., Beňa, L., Mészáros, A.: *Optimalizácia prevádzky elektrizačnej sústavy*. 1. vyd., Košice: TU, 2009, 265 s, ISBN 978-80-553-0323-9.
- [2] Szathmáry, P.: *Kvalita elektrickej energie*. 1. vydanie. Bratislava: PRO, 2003, 122 s. ISBN 80-89057-04-7.
- [3] STN EN 60909-0. *Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách. Časť 0: Výpočet prúdov*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [4] Kolcun, M., Medveď, D.: *Skúmanie prechodných javov v elektrizačnej sústave*. In: *Elektroenergetika*. Roč. 14, č. 1 (2021), s. 5-8. - ISSN 1337-6756.

#### ADRESY AUTOROV

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