

Ing. Michal Koniček

Autoreferát dizertačnej práce

**STANOVENIE OPTIMÁLNEHO OBJEMU DISTRIBUOVANEJ
VÝROBY V UZLOVÝCH OBLASTIACH DISTRIBUČNEJ
SÚSTAVY SR**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
v študijnom obore:
Forma štúdia:

Elektroenergetika
5.2.30 Elektroenergetika
Denná

Miesto a dátum: Bratislava, 30.06.2018

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Michal Koníček

Autoreferát dizertačnej práce

**STANOVENIE OPTIMÁLNEHO OBJEMU DISTRIBUOVANEJ
VÝROBY V UZLOVÝCH OBLASTIACH DISTRIBUČNEJ
SÚSTAVY SR**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
v študijnom obore:
Forma štúdia:

**Elektroenergetika
5.2.30 Elektroenergetika
Denná**

Miesto a dátum: Bratislava, 30.06.2018

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Doktorand: **Ing. Michal Koníček**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Anton Beláň, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti: **doc. Ing. Bracínik Peter, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Univerzitná 1
010 26 Žilina

Ing. Peter Szathmáry, PhD.
Power System Management, s.r.o.,
Jelšová 2822/2 - mestská časť Vyšné Opátske,
040 22 Košice

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa:o.....hod. na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, miestnosť C-417, blok C, 4. poschodie.

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

Obsah.....	3
Úvod.....	4
Tézy dizertačnej práce.....	4
1 Súčasný stav regulačnej oblasti Slovenskej republiky	5
1.1 Národný akčný plán pre energiu z obnoviteľných zdrojov	5
1.2 Stratégia energetickej bezpečnosti.....	5
1.3 Rozdelenie distribuovaných zdrojov podľa technológie výroby.....	5
1.4 Zdrojový mix.....	6
1.4.1 Vodné elektrárne	6
1.5 Zaťaženie a výroba.....	7
2 Vplyvy distribuovaných zdrojov na elektrizačnú sústavu	8
2.1.1 Navýšenie hodnoty tranzitných tokov	8
2.1.2 Preťažovanie a smer toku výkonov v prenosových transformátoroch.....	11
2.1.3 Vplyv na reguláciu napätia v prenosovej sústave	11
2.1.4 Objem a disponibilita podporných služieb.....	12
3 Návrh metodiky stanovenia optimálneho objemu distribuovanej výroby.....	14
3.1 Typy scenárov siete.....	14
3.2 Metodika určovania maximálneho objemu distribuovanej výroby	15
3.2.1 Maximálny výkon pri vyvedení výkonu cez inú uzlovú oblasť	15
3.2.2 Postup stanovenia maximálneho objemu distribuovanej výroby	16
3.3 Metodika stanovenia optimálneho objemu distribuovanej výroby podľa technológie výroby 19	
4 Stanovenie optimálneho inštalovaného výkonu distribuovanej výroby podľa navrhnutých metodík.....	21
4.1 Scenáre s minimálnym tranzitom	21
4.1.1 Vyhodnotenie scenárov s minimálnym tranzitom.....	22
4.1.2 Scenáre s priemerným tranzitom	23
4.2 Scenáre s maximálnym tranzitom.....	23
4.2.1 Vyhodnotenie scenárov s maximálnym tranzitom	24
Prínos pre Prax	25
Záver.....	26
Literatúra	28
Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce.....	29

Úvod

Hospodárstvo každého štátu by malo byť založené na podpore energetickej nezávislosti, t.j. zvyšovanie miery sebestačnosti v otázke uspokojenia energetických potrieb. Konkrétne na obmedzovanie využívania ropy a zemného plynu, najmä na výrobu elektriny a tepla. Slovenská republika sa zaviazala plniť národný akčný plán pre energiu z obnoviteľných zdrojov energie, pričom má stanovené ciele do roku 2020 a to zvýšiť podiel obnoviteľných zdrojov energie z hrubej konečnej energetickej spotreby na 14 %. Po skončení tohto plánu bude následne pokračovať v plnení plánu prechodu na konkurencieschopné nízkouhlíkové hospodárstvo v roku 2050. Z dôvodov naplňania týchto plánov sa bude zvyšovať podiel distribuovanej výroby z obnoviteľných zdrojov.

Z tohto dôvodu je potrebné teoreticky spracovať problematiku distribuovanej výroby a následne sa zaoberať jej rozdelením podľa technológie výroby elektriny. Pre jasné definovanie vplyvov je žiaduce analyzovať súčasný stav elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky a zhodnotiť možnosti inštalácie nových distribuovaných zdrojov v zdrojovom mixe Slovenskej republiky s ohľadom na aktuálne inštalovaný výkon a na schopnosť výroby elektriny aktuálne funkčnými zdrojmi pokrývať spotrebu elektrickej energie. Elektrizačná sústava bola budovaná a prevádzkovaná na základe centralizovanej výroby, kde sa na konkrétnych miestach nachádzajú centrálné zdroje s veľkým inštalovaným výkonom, ktoré zásobujú elektrinou rozsiahle územia a veľký počet odberateľov. Elektrina prúdi smerom zo zdrojov cez prenosovú sústavu do distribučnej sústavy k odberateľom. Vyrobená elektrina z distribuovaných zdrojov je spotrebovaná v mieste výroby, prípadne môže vzniknúť jej prebytok, čím zmení smer toku výkonu z distribučnej sústavy do prenosovej sústavy. Veľký podiel distribuovaných zdrojov vplyva na elektrizačnú sústavu nie len lokálne ale aj zo systémového hľadiska. Z tohto dôvodu je žiaduce analyzovať systémové vplyvy na sústavu ako celok, ako napríklad vplyvy tranzitných tokov na možnosť pripájania nových distribuovaných zdrojov.

Z pohľadu decentralizácie výroby elektriny je potrebné dodať, že neriadený nárast distribuovanej výroby by mohol viesť k problémom spojených s predikciou výroby, ktorá pri niektorých zdrojoch predstavuje ich slabú stránku. Ťažko predikovateľné distribuované zdroje môžu zvýšiť hodnotu podporných služieb, a preto je potrebné zhodnotiť ich disponibilitu a potrebu navýšenia ich objemov pri postupnom pripájaní v jednotlivých uzlových oblastiach Slovenskej republiky.

Negatívne vplyvy vznikajúce rastúcim množstvom distribuovaných zdrojov je potrebné eliminovať a z tohto dôvodu je potrebné určiť metodiku na stanovenie maximálneho objemu distribuovanej výroby a jej optimálneho rozdelenia do uzlových oblastí podľa technológie výroby. Vytvárajú sa nové postupy a metódy, ktoré riešia tieto problémy, prípadne ich eliminujú. Doposiaľ sa pri navrhovaní týchto metodík uplatňovali najmä deterministické prístupy, ktoré vychádzajú z podkladov prevádzkovateľov sústav a predpokladov ich prevádzok. Postupne sa v Európe uplatňujú nové postupy, ktoré zahŕňujú pravdepodobnostný prístup hodnotenia technicko-ekonomických parametrov sústavy. V práci je preto zohľadnený a navrhnutý pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy, pričom poskytuje rôzne pohľady a analýzy, na základe čoho sú aj navrhnuté metodiky pre stanovenie optimálneho objemu distribuovaných zdrojov elektriny podľa technológie výroby v uzlových oblastiach distribučných sústav, ktoré sú jednou z náročných úloh pre zabezpečenie správneho fungovania elektrizačnej sústavy.

Tézy dizertačnej práce

1. Vykonajte analýzu súčasného stavu regulačnej oblasti SR (výroba vs. spotreba, inšt. výkon vs. zaťaženie, tranzit, zdrojový mix, export a import (zhodnotenie potreby importu elektriny do SR), zaťaženie transformácií PS/DS jednotlivých uzlových oblastí, Národný akčný plán SR v oblasti OZE).
2. Vytvorte matematický model a metodiky na overenie optimálneho objemu distribuovanej výroby pre jednotlivé uzlové oblasti distribučnej sústavy SR so zohľadnením technológie výroby elektriny, aktuálneho zdrojového mixu SR, plánovaných zdrojov elektriny, vplyvu na celkové saldo SR a na dostupné exportné kapacity SR.
3. Navrhnite optimálny/maximálny objem distribuovanej výroby pre jednotlivé uzlové oblasti distribučnej sústavy SR z pohľadu regulačnej oblasti SR pre uvažované východiskové podmienky.

1 Súčasný stav regulačnej oblasti Slovenskej republiky

V súčasnosti nie je jednotne definovaná maximálna výkonová hranica vymedzujúca distribuovaný zdroj (DZ) z pohľadu inštalovaného výkonu, avšak literatúra [1] vo väčšine prípadov udáva hranicu do 10 MW. Doposiaľ sa pri navrhovaní metodík možností pripájania nových DZ uplatňovali najmä deterministické prístupy, ktoré vychádzajú z podkladov prevádzkovateľov sústav a predpokladov ich prevádzok. Postupne sa uplatňujú nové postupy, ktoré zahŕňujú pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy a preto je v práci zohľadnený a navrhnutý pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy. Pravdepodobnostný prístup je postupne aplikovaný na výsledky z analýzy súčasného stavu regulačnej oblasti (RO) Slovenskej republiky (SR).

1.1 Národný akčný plán pre energiu z obnoviteľných zdrojov

Nové distribuované zdroje sú inštalované najmä z dôvodu splnenia Národného akčného plánu (NAP) pre energiu z obnoviteľných zdrojov energie (OZE). Členské krajiny Európskej únie (EÚ) sa v roku 2009 zaviazali, že do roku 2020 znížia emisie skleníkových plynov o 20 % pomocou využívania energie z OZE, pričom budú predstavovať 20 % z konečnej spotreby energií. Následne sa všetky štáty zaviazali k 10 % podielu energie z OZE na spotrebe v doprave, a taktiež sa zaviazali znížiť energetickú spotrebu o 20 % [11]. SR má stanovené ciele do 2020 zvýšiť podiel OZE z hrubej konečnej energetickej spotreby na 14 % (v roku 2005 bola táto hodnota 6,7 %). SR by sa malo podľa NAP sústrediť najmä na využívanie biomasy, fotovoltaických elektrární (FVE) a veterných elektrární (VTE). Do roku 2020 sa podľa [12] očakáva prírastok výkonu ešte o 457 MW OZE čo môže spôsobiť značné problémy.

1.2 Stratégia energetickej bezpečnosti

Ministerstvo hospodárstva SR pristúpilo k spracovaniu dlhodobého výhľadu potrieb a možností, ktorými je podľa [6] možné zabezpečiť energetickú bezpečnosť SR. Na základe tohto dokumentu bol porovnaný aktuálny inštalovaný výkon distribuovaných zdrojov elektriny s výhľadom pre rok 2030.

Tab. 1. Porovnanie inštalovaného výkonu distribuovanej výroby z roku 2016 a 2030 [6]

DV OZE	2016 [MW]	2030 [MW]	Očakávaný nárast [MW]	Nárast v [%]
FVE	530	720	190	21,90
Biomasa	224	210	0	0
Bioplyn	105	270	165	19,02
MVE	63	100	37	3,44
VTE	3,14	450	446,86	51,50
Geot. el.	0	50	50	5,76
Spolu	925,1	1800	888,86	100

Z Tab. 1 je zjavné čiastočné splňanie tejto stratégie pri niektorých typoch elektrární, avšak pri ostatných ako napr. VTE sa ani len čiastočne nepribližuje hodnota inštalovaného výkonu k hodnotám navrhnutých v dokumente. Posledný stĺpec tabuľky znázorňuje predpokladaný nárast inštalovaného výkonu podľa jednotlivých typov zdrojov. Pri biomase je hodnota nárastu inštalovaného výkonu 0 %, pretože týchto zdrojov je už viac nainštalovaných ako ich bolo naplánovaných. Podľa stratégie energetickej bezpečnosti SR by malo byť do roku 2030 inštalovaných ešte 888,86 MW v distribuovaných zdrojoch (NAP hovorí o 475 MW do 2020), čo by mohlo mať za následok vznik nežiaducich vplyvov na ES. S touto hodnotou sa bude ďalej v práci uvažovať v metodikách a simuláciách pri zisťovaní optimálneho objemu distribuovanej výroby (DV), rozdelenej podľa technológie výroby v jednotlivých uzlových oblastiach (UO). Táto hodnota výkonu je dostatočne vysoká pri použití v metodikách, keďže sa neplánuje vyšší nárast inštalácie týchto zdrojov a tým pádom zvyšovanie jej hodnoty (do 2030).

1.3 Rozdelenie distribuovaných zdrojov podľa technológie výroby

Distribuované zdroje je možné rozdeliť podľa druhu technológie výroby elektrickej energie. Toto rozdelenie je potrebné ozrejmiť z dôvodu ďalšieho pridelenia významu vplyvov zdrojov na ES, a taktiež preto, lebo na základe tohto rozdelenia je aj stanovená metodika určovania optimálneho objemu DZ podľa technológie výroby.

Predikovateľné distribuované zdroje

Predikovateľné OZE, patria predovšetkým do kategórie DZ s vyššou presnosťou predikcie výstupného výkonu, vďaka čomu len minimálne nepriaznivo vplyvajú na elektrizačnú sústavu. Podľa [2] patria medzi predikovateľné OZE zdroje využívajúce nasledovné formy energie: vodná energia, geotermálna energia, biomasa vrátane všetkých produktov jej spracovania, bioplyn, skládkový plyn, plyn z čističiek odpadových vôd, biometán, aerotermálna energia, hydrotermálna energia.

Fotovoltické elektrárne

Produkcia výkonu týchto zdrojov je absolútne závislá od počasia, čo môže spôsobiť výrazné výkyvy vo výrobe elektriny. Pri tomto druhu elektrární je možné definovať ich výstupný výkon ako ťažko predikovateľný len počas dňa (max 16 hodín), keďže v noci nevyrábajú elektrinu. Každé zvyšovanie penetrácie týchto zdrojov implikuje pravdepodobnosť potreby navýšenia objemu podporných služieb, a preto musí byť zabezpečená disponibilita dostatočného počtu zdrojov v prípadoch náhleho poklesu výkonu v sústave [3]. Pri FVE je ich výstupný výkon ťažko predikovateľný, avšak je ho možné vymedziť v daných časových intervaloch a to konkrétne od doby východu slnka po jeho západ (bez uvaženia sily intenzity žiarenia).

Veterné elektrárne

Pri tomto druhu elektrární je možné definovať ich výstupný výkon ako ťažko predikovateľný po dobu 24 hodín počas dňa. Z pohľadu spätných vplyvov na ES majú VTE najnepriaznivejší vplyv. Podľa NAP by sa malo do roka 2020 na území SR inštalovať ešte takmer 350 MW VTE. Avšak to nie je pravdepodobne reálne, keďže SR je vnútrozemská krajina s nízkym veterno-energetickým potenciálom. Veľmi dobré podmienky pre prevádzku VTE sú miesta s priemernou rýchlosťou vetra 8,5 m/s. Nanešťastie na Slovensku sa takmer nevyskytujú oblasti nad 5 m/s (vo svete sú to podpriemerné rýchlosti), asi okrem Krížnej a Chopka. Na základe informácií podľa [8] je určený technický využiteľný potenciál z VTE na 605 GWh/rok, čo vychádza približne 300 – 350 MW inštalovaného výkonu vo VTE. Z tohto dôvodu sú v metodike stanovenia optimálneho výkonu z DZ do jednotlivých UO identifikované UO, do ktorých nie je možné pripojiť VTE alebo je možné pripojiť iba obmedzený výkon z VTE (UO1, UO2, UO7, UO9, UO13 – UO16, UO20 = 0 MW vo VTE).

1.4 Zdrojový mix

V energetickom mixe SR majú zastúpenie zdroje s inštalovaným výkonom od jednotiek kW až po výrobné jednotky s inštalovaným výkonom rádovo stovky MW. Funkčnosť týchto zdrojov je založená na odlišných princípoch výroby elektrickej energie, preto existuje niekoľko zaužívaných rozdelení výrobných zdrojov [7]. Podobnejšie popísaná pravdepodobnostná analýza je vysvetlená na jednom type zdroja popísanom v nasledujúcej podkapitole.

1.4.1 Vodné elektrárne

Veľkosť technického hydroenergetického potenciálu vodných tokov SR je podľa [10] cca 6700 GWh/rok [9]. Skutočne využitý hydroenergetický potenciál SR dosahuje až 75 %. V súčasnosti sa na Slovensku nachádza a prevádzkuje 24 veľkých vodných elektrární, 203 malých vodných elektrární (MVE) a 4 prečerpávacie elektrárne [8]. Celkový inštalovaný výkon vodných elektrární je 2537 MW. Táto hodnota je veľmi vysoká, avšak využiteľný výkon je na úrovni 80 – 954 MW (za obdobie 2016 – 2017), keďže tieto elektrárne sú závislé od klimatických podmienok (množstva vody v riekach).

V Tab. 2 je znázornená pravdepodobnosť výskytu hodnoty výkonu z vodných elektrární (VE) v určenom rozsahu výkonov v jednotlivých mesiacoch počas rokov 2016 a 2017. Hranica od – do predstavuje rozsah výkonov z VE, ktorý je hľadaný počas daného mesiaca v roku. Prvá a posledná hranica (hrubo vyznačené) sú zvolené na základe maximálnej a minimálnej hodnoty výstupného výkonu z daného zdroja počas skúmaného roka. Ostatné hranice sú rozdelené na päť častí (päť rozsahov zoradených od najvyššieho po najnižší). Ku každému mesiacu je vypočítaná pravdepodobnosť výskytu zvoleného intervalu hodnôt výkonu. Na základe pravdepodobnosti výskytu výstupného výkonu z VE v roku 2017 je zrejmé, že ich výroba je maximálna v jarnom období v mesiaci máj (87 mm zrážok za mesiac, priemer za celý rok je 69 mm). Pre rok 2016 je maximálna výroba taktiež vo februári (teplejší začiatok zimy, topenie snehu, až 135 mm, priemer za celý rok je 77 mm). V zimnom a v letnom období sú zrážky na nízkych úrovniach. V tomto období je výkon z VE prevažne nižšia ako ich celková ročná priemerná hodnota výroby. Na základe analýzy vyplýva, že počas zimných mesiacov kedy sa predpokladá vyššie zaťaženie v sústave je výkon z VE na nižších hodnotách (252 – 424 MW) a musí

byť nahradený iným zdrojom (alebo nakúpený zo zahraničia / importovaný). V letných mesiacoch kedy sa predpokladá nižšie zaťaženie v sústave je výkon z VE taktiež na nízkych hodnotách (80 – 468 MW), čo z pohľadu zaťaženia sústavy môže byť vyhovujúce. Avšak z pohľadu zabezpečenia PpS, ktoré VE poskytujú to môže byť nevýhoda. Pri zisťovaní optimálneho výkonu z DZ sa preto berie do úvahy pravdepodobnosť výskytu výstupného výkonu z VE na základe analýz spracovaných v Tab. 2.

Tab. 2. Pravdepodobnosť výskytu hodnoty výkonu z VE v daných rozsahoch počas rokov 2017 a 2016

	Vodné el. 2017					Vodné el. 2016				
Hranica od [MW]	939	767	595	424	252	954	783	613	442	271
Hranica do [MW]	767	595	424	252	80	783	613	442	271	100
Mesiac	Pravdepodobnosť výskytu hodnoty v určených hraniciach [%]									
január	0,00	0,00	0,67	88,31	11,02	0,00	0,00	14,00	62,72	23,28
február	7,44	8,33	10,12	61,31	12,80	13,10	45,39	35,42	6,10	0,00
marec	3,23	33,11	60,57	3,10	0,00	0,00	10,77	65,01	24,23	0,00
apríl	1,67	13,33	60,00	23,06	1,94	0,00	0,97	55,69	39,58	3,75
máj	4,70	52,15	34,27	8,87	0,00	1,08	11,69	45,70	39,78	1,75
jún	0,00	0,28	18,33	70,42	10,97	1,25	28,89	57,36	12,50	0,00
júl	0,00	0,94	17,20	73,79	8,06	0,54	22,85	37,63	33,74	5,24
august	0,00	1,89	24,93	57,68	15,50	1,88	12,77	48,52	31,18	5,65
september	0,00	5,05	40,67	26,93	27,35	0,00	0,69	8,47	63,89	26,94
október	0,00	5,43	29,31	59,43	5,83	0,00	0,94	30,34	59,33	9,40
november	0,00	8,52	80,31	11,17	0,00	0,00	3,61	51,94	44,44	0,00
december	0,00	4,38	70,62	25,00	0,00	0,00	0,00	43,01	56,45	0,54
Spolu	1,39	11,23	37,18	42,46	7,74	1,40	11,30	41,11	39,76	6,42

1.5 Zaťaženie a výroba

Namerané hodnoty prevádzkových stavov siete sú taktiež vyhodnotené na základe pravdepodobnostnej analýzy pre každú samostatne. Hodnoty zaťaženia sa počas roka 2017 menia v rozmedzí 2320 – 4541 MW. Z pohľadu hodnotenia výsledkov výroby sa počas rokov 2016 a 2017 mení hodnota výroby v rozmedzí 1885 – 4377 MW.

Na základe analýzy pravdepodobnosti zaťaženia a pravdepodobnosti výroby bola vykonaná taktiež ich vzájomná pravdepodobnostná analýza. Podľa Tab. 3, na ktorej je zobrazená pravdepodobnosť výskytu určeného intervalu hodnôt výroby, počas určených intervalov zaťaženia v roku 2017 je možné identifikovať maximá a minimá týchto prevádzkových stavov siete (bolo vykonaná pravdepodobnostná analýza aj z roku 2016, ale z dôvodu zjednodušenia výsledkov sa bude v práci uvažovať len s rokom 2017). Z pravdepodobnosti výskytu hodnôt je zrejmé, že pri maximálnych hodnotách zaťaženia sa vyskytuje aj maximálna hodnota výroby a naopak pri minimálnej záťaži je aj výroba minimálna. Je to najmä z toho dôvodu že pri vysokej záťaži, je potrebné vyrobiť aj dostatok elektrickej energie. Naopak nie je vôbec pravdepodobné, že pri maximálnej záťaži budú hodnoty výroby minimálne (prípadne pri minimálnej záťaži bude maximálna výroba). Na základe pravdepodobnosti výskytu určeného intervalu hodnôt výroby, počas určených intervalov zaťaženia v danom roku sú identifikované maximá a minimá, ktoré sú následne využité pri hľadaní maximálneho objemu DV.

Tab. 3. Pravdepodobnosť výskytu v [%] určeného intervalu hodnôt výroby v [MW] počas určených intervalov zaťaženia v [MW] v roku 2017

Medza od	Výroba	4377	3953	3529	3105	2681
Zaťaženie	Medza do	3953	3529	3105	2681	2257
4541	4096	0,33	3,80	3,41	0,00	0,00
4096	3652	0,24	5,38	10,45	3,62	0,01
3652	3208	0,00	1,91	19,84	13,36	1,21
3208	2764	0,00	0,51	10,46	12,71	3,48
2764	2320	0,00	0,00	1,05	5,06	3,16

2 Vplyvy distribuovaných zdrojov na elektrizačnú sústavu

Začleňovaním DV vo väčších množstvách, najmä ťažko predikovateľnej, môže dôjsť k ohrozeniu bezpečnej prevádzky sústavy z dôvodu ich nepriaznivých vplyvov na ES. Práca sa zameriava na analýzu systémových vplyvov na sústavu ako celok. Jednotlivé metodiky stanovenia optimálneho objemu DV podľa technológie výroby uvažujú s niektorými systémovými vplyvmi ako kritériami, a preto sú podrobnejšie analyzované.

2.1.1 Navýšenie hodnoty tranzitných tokov

Tranzit je prenos zmluvne dohodnutého množstva elektrickej energie prenosovou sústavou regulačnej oblasti bez spotreby tejto elektriny v regulačnej oblasti, ktorá prenos uskutočňuje [14]. Tieto toky pretekajú cez RO, či už so zámerom ďalšieho predaja elektriny v inej RO, alebo z iných neplánovaných pretokov elektriny v iných RO. V SR existujúce tranzitné toky (1400 MW – 2400 MW) spôsobujú zvýšenie zaťažovanie vnútorných a cezhraničných vedení PS ale aj DS. V súčasnosti sú najviac zaťažované cezhraničné vedenia Slovensko – Maďarského (SR – HU) a Slovensko – Ukrajinského (SR – UA) cezhraničného profilu. Pri dodržiavaní bezpečnostného kritéria n-1 sú tieto vedenia najviac obmedzujúcimi prvkami PS SR. S pribúdajúcim výkonom distribuovaných zdrojov sa môže zvýšiť hodnota exportu z RO SR do zahraničia. Zvýšený export spolu s hodnotou tranzitných tokov zvýši zaťaženie vnútorných a cezhraničných vedení, čo môže ohroziť bezpečnosť prevádzky ES. Taktiež do tohto faktoru treba počítať s výstavbou nových dvoch blokov jadrovej elektrárne Mochovce, ktorá navýši inštalovaný výkon SR približne o 1000 MW, čo zvýši aj hodnotu vyrábaného výkonu a s ním sa ešte viac zvýši export.

Tab. 4. Priemerné mesačné toky výkonov cez cezhraničné profiley za obdobie roka 2017 [5]

Profil	$P_{\text{výstup,RO}}$ [MW]			$P_{\text{výstup,RO}}$ [MW]		
Mesiac	CZ-SR	PL-SR	UA-SK	SR-CZ	SR-HU	SR-UA
1	1551	765,2	0	0	1247	440,5
2	1505	706,8	0,043	0	1345	419,5
3	1102	476,1	1,02	1,698	1125	286,2
4	1549	478,1	0	0	1109	429,6
5	1347	476,9	0,111	0	1162	377,8
6	1339	419,6	0,417	0	931,9	294,1
7	919,3	537,2	0,261	0	972,2	374,4
8	1000	434	0,016	0	938,1	336,9
9	973,4	378,6	7,655	0,151	909	247,6
10	1282	441,6	0,128	0	954,5	243,1
11	1418	419,3	0	0	1172	397,3
12	1053	392,6	2,892	1,466	917,9	263,1
Priemer	1253	493,8	1,045	0,276	1065	342,5

Typický smer toku výkonu cez RO SR je cez profil Česká republika (CZ) a Poľsko (PL) (vedenia 5x400 kv a 2x220 kv) smerom do profilov Maďarska (HU) a Ukrajiny (UA) (3x400 kv). Toky výkonu z UA do SR a z SR do CZ sú zanedbateľné, preto sa uvažuje iba už s vyššie opísanými profilmi. Na základe Tab. 4 je zrejme, že najviac zaťažované profiley sú v smere z CZ (vedenia 3x400 kv a 2x220 kv) do profilu HU (vedenia 2x400 kv). Je to najmä profil do HU, keďže tam vedú iba 2 vedenia [5].

Na základe hodnôt z Tab. 4 sa vypočíta priemerná hodnota tranzitu podľa rovnica (2).

$$Transit = (\min(P_{\text{výstup,RO}}, P_{\text{výstup,RO}}))$$

Priemerné hodnoty tranzitu v jednotlivých mesiacoch sa pohybujú v rozsahu od 1182 do 1687 MW (priemerný tranzit za obdobie roka 2017 je 1408 MW), pričom maximálny tranzit cez RO SR v roku 2017 bol 2621 MW.

Priemerné hodnoty tranzitu počas celého roka sú na úrovni 1408 MW. Táto hodnota je pomerne vysoká, keďže do profilu HU a UA sú len 3 vedenia, ktoré majú podľa [6] prenosovú schopnosť 3600 MVA pri 100 % zaťažení (pri n-1 je to približne 2500 MVA). Pri spomínaných hodnotách tranzitu (ale aj vyšších – (v roku 2017 bol maximálny tranzit 2621 MW) môže dochádzať k nedodržaniu n-1 prenosových vedení. Najmä, ak k tejto hodnote je pripočítaná hodnota exportovaného výkonu z RO SR, ktorý môže

byť až 642 MW (v 2015 to bolo až 1009 MW). Avšak maximálna hodnota tranzitu s maximálnym exportujúcim výkonom sa v rovnakom čase v sústave vyskytujú s nulovou pravdepodobnosťou. Avšak z dôvodu preťažovania profilov v smere do HU sú vo výstavbe 2 vedenia a to 2x400 kV Gabčíkovo – Gonyu – Veľký Ďur a 2x400 kV Rimavská Sobota – Sajóivánka. Výstavba nových prenosových vedení zvýši prenosovú kapacitu v profile v smere z SR do HU o 100 %.

Nie len tento profil, ale taktiež aj profil z CZ a PL do SR je zaťažovaný vyššími hodnotami. Najvyšší zaznamenaný tok výkonu z týchto profilov je 3463 MW (8. 7. 2017 o 14:45, 1050 import a 2289 tranzit). Takéto vysoké toky výkonov môžu spôsobiť preťaženie vnútroštátnych PS vedení [5].

Tab. 5. Pravdepodobnosť výskytu hodnoty tranzitu v daných rozsahoch počas pracovných dní a cez víkendy v roku 2017

Tranzit cez pracovné dni						Tranzit cez víkendy				
Hranica od [MW]	2458	1975	1492	1009	525	2458	1967	1475	983	492
Hranica do [MW]	1975	1492	1009	525	42	1967	1475	983	492	0
Mesiac	Počet výskytu hodnôt zaťaženia v daných hraniciach [%]									
január	0,94	4,66	2,66	0,52	0,00	0,16	5,13	2,57	0,72	0,12
február	1,11	5,12	3,77	0,65	0,03	1,28	4,45	1,00	0,96	0,00
marec	0,22	2,05	2,15	0,84	0,06	0,28	4,29	2,69	1,28	0,08
apríl	0,05	1,37	3,90	2,45	0,64	0,12	1,68	3,13	2,36	0,40
máj	0,00	0,38	2,50	3,88	1,24	0,00	1,20	2,97	3,97	1,44
jún	0,08	1,26	4,52	2,04	0,51	0,00	0,88	3,85	2,73	0,24
júl	1,64	4,14	2,90	0,11	0,00	0,64	4,49	2,40	0,16	0,00
august	0,06	2,66	4,80	0,49	0,00	0,28	5,01	3,21	1,08	0,04
september	0,32	3,55	3,64	0,83	0,06	0,44	3,33	2,44	1,48	0,00
október	0,10	1,32	3,93	2,39	0,67	0,84	4,97	2,04	0,52	0,32
november	0,11	2,51	4,12	1,18	0,10	1,32	4,97	1,76	0,48	0,12
december	2,94	4,87	0,92	0,05	0,00	4,33	3,33	0,00	0,00	0,00
Spolu	0,63	2,82	3,32	1,29	0,28	0,81	3,64	2,34	1,31	0,23

Avšak pre využitie hodnôt z najreálnejších prevádzkových stavov siete je potrebné použiť pravdepodobnosť výskytu hodnoty tranzitu počas špecifických rozsahov hodnôt výroby a zaťaženia, ktoré sú spracované v Tab. 6 a Tab. 7. V Tab. 6 je znázornená vzájomná kombinácia výskytu hodnôt tranzitu, výroby, zaťaženia v konkrétnych hraniciach (Hranica od a Hranica do) zoradených od najväčšieho rozsahu (interval 1) až po najmenší (interval 5). Na základe týchto hodnôt je možné identifikovať maximá, minimá a priemerné hodnoty jednotlivých prevádzkových stavov siete.

Tab. 6. Hranice hodnôt tranzitu, výroby a zaťaženia od maximálnych po minimálne rozdelené rovnomerne do 5 intervalov počas roka 2017

Označenie pre typy scenárov		Max		Priem		Min	
Interval		1	2	3	4	5	
Tranzit (T) [MW]	Hranica od	2583	2069	1556	1042	529	
	Hranica do	2069	1556	1042	529	15	
Výroba (V) [MW]	Hranica od	4377	3953	3529	3105	2681	
	Hranica do	3953	3529	3105	2681	2257	
Zaťaženie (Z) [MW]	Hranica od	4541	4096	3652	3208	2764	
	Hranica do	4096	3652	3208	2764	2320	

V Tab. 7 je vyjadrená pravdepodobnosť výskytu vzájomnej kombinácie hodnôt tranzitu, výroby a zaťaženia v roku 2017 (bolo vykonaná pravdepodobnostná analýza aj z roku 2016, ale z dôvodu zjednodušenia výsledkov sa bude v práci uvažovať len s rokom 2017). K stĺpcom tranzit (T), záťaž (Z) a výroba (V) je priradený interval reprezentujúci rozsah hodnôt (Hranica od – Hranica do) z Tab. 6 (pričom 1 určuje maximálny interval a 5 reprezentuje minimálny interval). V stĺpcoch sú kombinácie intervalov a k nim vypočítaná pravdepodobnosť výskytu tejto kombinácie počas reálnych prevádzkových stavov siete na základe hodinového merania roka 2017.

Príklad použitia Tab. 6 a Tab. 7: Podľa Tab. 6 sa identifikuje kombinácia prevádzkového stavu siete. Na základe intervalov sa identifikujú hranice hodnôt. Vyberie sa tranzit, interval 1 (stĺpec, T riadok 1 -

maximálna hodnota tranzitu v rozsahu 2583 – 2069 MW) pri maximálnom zaťažení v rozsahu 4096 – 4541 MW (stĺpec Z, riadok 1) a minimálnej výrobe v rozsahu 3553 – 4377 MW (stĺpec V, riadok 5). Kombinácia T = 1, Z = 1 a V = 5 v Tab. 7 sa vyskytne s pravdepodobnosťou 0 %, čo znamená že takýto prevádzkový stav nenastal. Najbližšie k spominatej kombinácii je T1 V1 S3 alebo T = 1, V = 2, S = 4.

Tab. 7. Pravdepodobnosť výskytu v % vzájomnej kombinácie hodnôt tranzitu, výroby a zaťaženia v roku 2017 na základe intervalov v Tab. 6

T	Z	V	Prav.	T	Z	V	Prav.	T	Z	V	Prav.	T	Z	V	Prav.
1	1	1	0	2	1	1	0,01	3	1	1	0,25	4	1	1	0,08
1	1	2	0,32	2	1	2	1,43	3	1	2	1,44	4	1	2	0,63
1	1	3	0,23	2	1	3	1,32	3	1	3	1,22	4	1	3	0,67
1	1	4	0	2	1	4	0	3	1	4	0	4	1	4	0
1	1	5	0	2	1	5	0	3	1	5	0	4	1	5	0
1	2	1	0	2	2	1	0,12	3	2	1	0,08	4	2	1	0,05
1	2	2	0,73	2	2	2	2,03	3	2	2	2,27	4	2	2	0,82
1	2	3	0,89	2	2	3	4,28	3	2	3	4,44	4	2	3	1,04
1	2	4	0,06	2	2	4	0,96	3	2	4	1,66	4	2	4	0,83
1	2	5	0	2	2	5	0	3	2	5	0,01	4	2	5	0
1	3	1	0	2	3	1	0	3	3	1	0	4	3	1	0
1	3	2	0,12	2	3	2	0,97	3	3	2	0,68	4	3	2	0,16
1	3	3	1,22	2	3	3	7,23	3	3	3	9,65	4	3	3	2,15
1	3	4	0,47	2	3	4	4,63	3	3	4	7,18	4	3	4	1,41
1	3	5	0	2	3	5	0,18	3	3	5	0,77	4	3	5	0,29
1	4	1	0	2	4	1	0	3	4	1	0	4	4	1	0
1	4	2	0	2	4	2	0,14	3	4	2	0,30	4	4	2	0,08
1	4	3	0,20	2	4	3	3,40	3	4	3	4,69	4	4	3	1,92
1	4	4	0,35	2	4	4	1,54	3	4	4	6,52	4	4	4	1,35
1	4	5	0,05	2	4	5	0,56	3	4	5	2,33	4	4	5	0,62
1	5	1	0	2	5	1	0	3	5	1	0	4	5	1	0
1	5	2	0	2	5	2	0	3	5	2	0	4	5	2	0
1	5	3	0	2	5	3	0,18	3	5	3	0,27	4	5	3	0,34
1	5	4	0	2	5	4	0,43	3	5	4	2,86	4	5	4	1,58
1	5	5	0,06	2	5	5	0,34	3	5	5	1,64	4	5	5	1,09

Je zrejmé že pri maximálnych hodnotách tranzitu sa vôbec nevyskytuje maximálna hodnota výroby. Najviac pravdepodobné je, že výskyt tranzitu bude v rozmedzí 1042 – 1556 MW a zároveň výroba bude počas tohto tranzitu v rozmedzí 3105 – 3529 MW.

Najčastejší prevádzkový stav siete je pri priemerných hodnotách (T=3, Z=3, V=3) kedy je pravdepodobnosť ich výskytu skoro 10 %.

Inštaláciou nových distribuovaných zdrojov by bolo možné počas obdobia s vysokým zaťažením sústavy znížiť hodnotu importovaného výkonu a tým znížiť zaťaženie vedení do RO SR, avšak naopak, počas obdobia s nízkym zaťažením sústavy sa môže zvýšiť hodnota exportovaného výkonu, čo zvýši zaťaženie prenosových vedení z RO SR. Sústava s vysokým tranzitom a možným prírastkom exportujúceho výkonu, ktorý navýši pripájanie nových distribuovaných zdrojov môže zapríčiniť nedodržanie bezpečnostného kritéria n-1 na prenosových vedeniach (najmä pri výpadku jedného z cezhraničných vedení). Z tohto dôvodu je bezpečnostné kritérium n-1 PS vedení volené ako hlavné kritérium. Toto kritérium má najvýznamnejší vplyv z pohľadu bezpečnosti na prevádzku sústavy.

Na základe analýzovanej pravdepodobnosti výskytu určeného intervalu hodnôt tranzitu, zaťaženia a výroby sú identifikované maximá a minimá jednotlivých prevádzkových stavov siete, ktoré sú naďalej použité pri vytváraní metodiky optimálneho objemu DV v jednotlivých UO SR. Doposiaľ sa existujúce postupy pripájania DV zameriavajú najmä na lokálne vplyvy, pričom by mohli byť podrobnejšie

skúmané aj systémové vplyvy, ktoré vplývajú na celú sústavu čím môže byť ohrozená bezpečnosť prevádzky ES.

2.1.2 Preťažovanie a smer toku výkonov v prenosových transformátoroch

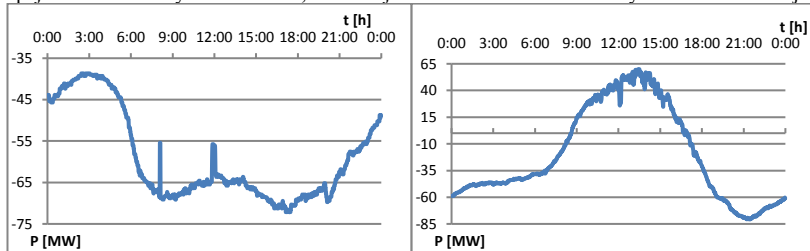
Prenosové transformátory PS/DS slúžia na transformáciu napätia z PS do DS zo 400 kV na 110 kV prípadne z 200 kV na 110 kV (medzi prenosové transformátory patria aj transformátory z PS do PS zo 400 kV do 220 kV).

Ukážka opačného toku výkonu cez prenosový TR, ktorý nastal v stanici 18 v TR1 znázorňuje Obr. 1 (znázornený je iba TR1). Zo zaťaženia transformátorov počas prevádzky s nízkou výrobou v UO je zrejmé, že tok výkonu má smer z PS do DS, ale počas prevádzky s vysokou výrobou (počas dňa) je to naopak, keďže do danej UO, ktorú napája táto stanica je vyvedený veľký výkon z FVE, ktorý mení tento výkon na záporný (viac výkonu je v danom mieste a momente vyrábaného ako spotrebovaného).

Na základe týchto zistení je zrejmé, že zvýšenie výroby z DZ v jednotlivých UO SR môže mať vplyv na zmenu tokov výkonov v sústave, čo môže mať za následok zvýšenie zaťaženia PS ale aj samotných PS TR (ak je vyrábaný výkon z DZ dostatočne vysoký).

Prenosové TR sa prevažne prevádzkujú v rozsahu zaťaženia tak, aby bola splnená požiadavka dodržania bezpečnostného kritéria n-1. Ďalší problém môže vzniknúť pri výpadku niektorého vnútroštátneho prenosového vedenia, kedy môže tok výkonov smerovať cez distribučnú sústavu a tým cez prenosové TR. S dodatočne veľkým príspevkom z novoinštalovanej DV môžu byť tieto TR preťažované nad povolené hodnoty.

Na základe týchto faktov bolo ďalším kritériom zvolené zaťaženie TR pri bezpečnostnom kritériu n-1. Pokiaľ je hodnota výkonu TR na maxime, tak tým pádom je aj výkon pripájaný do danej UO, ktorý spája TR maximálny. To znamená, že sa dá jednoznačne určiť hodnota výkonu z DZ v danej UO.



Obr. 1. Meranie v stanici 18 na TR1 počas nízkej výroby (vľavo) v UO a počas vysokej výroby v UO

2.1.3 Vplyv na reguláciu napätia v prenosovej sústave

Regulácia napätia je proces udržiavania predpísaného napätia v požadovaných toleranciách v celej sústave. Dosahuje sa zmenou požiadaviek na reaktančný výkon v sústave, najmä použitím zariadení na kompenzáciu reaktančného výkonu (napr. spomínanou sekundárnou reguláciou napätia SRN) [4]. Vysoká hodnota inštalovaného výkonu DZ pripájaných do DS spôsobí odľahčovanie vedení PS/DS, čo má za následok zvyšovanie napätia na strane PS a aj DS strane TR.

Na základe tohto vplyvu bola vykonaná simulácia kde je vybraná UO, v ktorej došlo k zmene napätia dôsledkom inštalácie väčšieho množstva DZ. Napätie je zaznamenané na PS a DS strane prenosového TR (bez regulácie napätia). Model pozostáva z PS a distribučnej sústavy, pričom je simulované premenlivé zaťaženie a výroba v RO pri zníženom tranzitnom toku (900 MW). Simulácia prebehla v časoch od 5 hodiny ráno do 21 hodiny, kedy je najvýznamnejší vplyv pripojených FVE. Simulujú sa premenlivé hodnoty výroby a zaťaženia podľa reálnych hodnôt dostupných v [5]. V UO, pre ktorú je simulovaná táto situácia, má maximálnu výrobu o hodnote 119 MW (vo FVE) a max zaťaženie o hodnote 95 MW, ktoré sa počas simulácie menia, čomu zodpovedajú aj hodnoty v Tab. 8.

Tab. 8 znázorňuje pre každú hodinu napätie na PS strane transformátora (400 kV) a na DS strane transformátora (110 kV), ktoré sú závislé od zmeny hodnôt výroby a zmeny hodnôt zaťaženia v UO. Z Tab. 8 je zrejmé, že v čase kedy FVE nevyrába, je hodnota napätia na PS strane TR na hodnote 419,124 kV (zvýšené z dôvodu nízko zaťaženej sústavy), ale postupným zvyšovaním výroby

v konkrétnej UO sa hodnota napätia zvyšuje, pričom pri max. výrobe z FVE až o 0,937 kV. Maximálna hodnota napätia je na úrovni 420,02 kV, čo je hodnota, ktorá prekračuje povolené limity. Je to spôsobené zmenou tokov výkonov cez prenosové vedenia, ktoré napájajú danú UO cez prenosový TR. Odľahčením TR sa odľahčia aj tieto prenosové vedenia čo spôsobí zvýšenie napätia v danej oblasti. Dokonca v krajných situáciách (nižšie zaťaženie sústavy s vysokým napätím) môže dôjsť k prekročeniu limitných hodnôt napätia ako to bolo v tejto simulácii.

Tab. 8. Zmeny napätia na PS a DS strane prenosového TR pri náraste generovaného výkonu z DZ v UO

t [hod]	400 kV	110 kV	P _{Genmax} [%]	P _{ZatUOmax} [%]
5	419,12	119,116	0	88,4
6	419,11	119,113	3,7	91,5
7	419,32	119,195	22,2	93,9
8	419,51	119,269	40,7	95,1
9	419,77	119,360	68,5	96,3
10	419,9	119,403	83,3	93,9
11	419,94	119,418	88,8	92,7
12	419,98	119,428	94,4	92,8
13	420,02	119,438	100	92,8
14	419,97	119,426	93,3	93,9
15	419,93	119,413	87,6	95,1
16	419,89	119,401	82,6	98,7
17	419,74	119,351	69,5	100
18	419,45	119,247	37	97,5
19	419,25	119,167	18,5	96,8
20	419,04	119,083	1,8	96,3
21	419,08	119,1	0	92,1

Maximálny rozdiel hodnoty napätia na DS strane TR je 0,338 kV (nárast z 119,1 na 119,44 kV), čo je taktiež značné zvýšenie napätia blízko limitných hodnôt. Na základe tejto simulácie je zrejmé, že nárast DV môže mať nežiaduci vplyv na napäťové pomery v ES.

Pri inštaláciách väčšieho množstva DV by bolo vhodné vypracovanie podrobnejšej štúdie, ktorá by simulovala odľahčenie prenosových TR, čiže jednotlivých UO. Zo simulácií by sa zistili napäťové pomery pri odľahčených TR, na základe ktorých by sa mohla navrhnuť (odsimulovať) implementácia vhodných regulačných prostriedkov (ktoré by toto napätie kompenzovali) v konkrétnych uzloch.

Na základe vplyvov regulácie napätia je zvolené ďalšie kritérium a to dodržanie hodnoty napätia vo všetkých uzloch. Napätie sa môže pri nízko zaťaženej sústave (vyššie napätia v sieti) nebezpečne zvýšiť nad povolené hodnoty odľahčením vedenia, ale naopak sa môže aj znížiť následne jeho zaťažením.

2.1.4 Objem a disponibilita podporných služieb

Výška objemu distribuovaných zdrojov elektriny s fluktuáciou výroby výrazne vplýva na výšku požadovaného objemu PpS potrebného na zabezpečenie bezpečnej a spoľahlivej prevádzky ES SR. Inštalácia veľkého objemu DZ, ktoré sú dotované štátom, zapríčiniuje vytlačanie z prevádzky veľké regulačné zdroje elektriny, čím sa zhoršuje možnosť zabezpečenia dostatočných objemov jednotlivých druhov PpS. Na zabezpečenie pokrytia potrebnej disponibilít PpS vplýva zloženie palivového mixu zdrojov elektriny v ES SR.

Terciárna regulácia činného výkonu je manuálna alebo automatická zmena činného výkonu výrobných zariadení presunom ich pracovných bodov s cieľom zaručiť dostatočnú rezervu SRV, ktorá zodpovedá potrebe z hľadiska veľkosti v danom čase [4]. Potrebná výkonová rezerva na zabezpečenie TRV môže byť pre obidva regulačné smery, preto sa rozdeľuje na kladnú a zápornú TRV.

TRV sa rozdeľuje na 3 minútovú kladnú (3MIN+), 3 minútovú zápornú (3MIN-), 10 minútovú kladnú (10MIN+), 10 minútovú zápornú (10MIN-), 15 minútovú kladnú (15MIN+) a 15 minútovú zápornú (15MIN-) [4].

Podľa [4] sa dajú určiť jednotlivé regulácie, pričom bude vysvetlená iba TRV10MIN+ a TRV10MIN-. Pri TRV15MIN± sa neuplatňuje zložka ovplyvňujúca vplyv prevádzky OZE a taktiež je to aj pri TRV3MIN±, ktorá je odvodená od výpadku najväčšieho bloku prevádzkovaného v regulačnej oblasti. Z tohto dôvodu bude určená len rezerva TRV10MIN±.

$$TRV10MIN\pm = \frac{1}{2} \times TRV_{OZE}$$

$$TRV_{OZE} = P_{INST} \times k_{NP} \times k_{súdob}$$

kde P_{INST} je inštalovaný výkon OZE [MW],

k_{NP} – koeficient nepresnosti predpovede vypočítaný za obdobie max. 5 rokov.

$k_{súdob}$ – koeficient zahrňujúci rozmiestnenie zdrojov OZE.

Z počiatku sa s oboma koeficientmi uvažovalo s hodnotou 1 (nedostatok informácií o OZE). Podľa [15] bol stanovený regulačný rozsah za TRV10MIN+ = 215 a TRV10MIN- = 100 MW

Inštaláciou nových distribuovaných zdrojov, najmä ťažko predikovateľných, by sa hodnota SRV zvýšila, čo aj vychádza zo vzťahov (3), (6) a (7). Taktiež by to malo za následok zvýšenie hodnoty TRV, čo vychádza zo vzťahov (8) a (9). Nárast podporných služieb (TRV10min± a SRV_{OZE}) na základe zvýšenia distribuovaných zdrojov je určený podľa už spomínanej metodiky [4] v Tab. 9. Metodika výpočtov TRV podľa [15] nezodpovedá reálne zvoleným hodnotám (TRV10MIN+ = 215 MW podľa [15] a podľa výpočtu 259 MW a TRV10MIN- = 100 MW podľa [15] a podľa výpočtu 259 MW). Reálne určené hodnoty by mali zodpovedať postupom metodiky, prípadne by sa mala zmeniť metodika výpočtu TRV10min±. Hodnoty v Tab. 9 sú rátané podľa tejto metodiky. Distribuované zdroje s predikovateľným výstupným výkonom majú v porovnaní s ťažko predikovateľnými zdrojmi (stabilný výstupný výkon) len minimálny vplyv na hodnotu PpS, a preto sa do výpočtov nezahrňujú.

Tab. 9. Hodnoty SRV_{OZE} a TRV10min± pri postupnom pridávaní FVE a VTE elektrární vypočítané podľa [4]

P_{inst} FVE [MW]	P_{inst} VTE [MW]	Spolu [MW]	SRV _{OZE} denná [MW]	SRV _{OZE} nočná [MW]	TRV10min± [MW]
532	3	535	42,8	0,24	269
560	65	625	50	5,2	312,5
590	130	720	57,6	10,4	360
610	195	805	64,4	15,6	402,5
630	260	890	71,2	20,8	445
660	325	985	78,8	26	492,5
690	390	1080	86,4	31,2	540
720	450	1170	93,6	36	585

S pribúdajúcim objemom ťažko predikovateľných DZ pribúda aj hodnota PpS (SRV a TRV10min±), ktoré musia byť nakúpené pre spoľahlivé a bezpečné fungovanie siete. Pri TRV10min± je to hodnota výkonu, ktorá zodpovedá polovici inštalovanému výkonu z ťažko predikovateľných DZ, čo je výrazná hodnota. Pri SRV by sa musela zaviesť nočná SRV, pretože sa predpokladá nárast VTE, ktoré vyrábajú aj počas noci, pričom FVE, ktoré doteraz prevládajú vyrábajú iba cez deň. Na základe tohto zhrnutia je zvolené kritérium disponibilít podporných služieb a to konkrétne SRV a TRV10MIN. Toto kritérium bude zvolené v druhej fáze a to pri stanovení optimálneho výkonu z DV podľa technológie výroby elektriny.

3 Návrh metodiky stanovenia optimálneho objemu distribuovanej výroby

Metodika stanovenia optimálneho objemu DV pozostáva z dvoch hlavných postupov (metodík). Prvá časť stanovuje maximálny objem DV pripájanej do jednotlivých uzlových oblastí v RO a zároveň stanovuje sumárny maximálny objem DV. Druhá metodika stanovuje optimálny objem DV rozdelenej podľa technológie výroby elektriny v jednotlivých uzlových oblastiach RO. Metodika vychádza z namodelovanej siete. Na základe spracovanej analýzy súčasného stavu RO SR (kap. 1), boli spracované všetky prevádzkové stavy sústavy v jednotlivých mesiacoch v rokoch 2014 až 2017. Pre namodelovanú sieť je navrhnutých niekoľko základných prevádzok siete (scenárov), ktoré boli následne simulované v jednotlivých metodikách. Na základe spracovaných systémových vplyvov (kap. 0), ktoré môžu ohroziť bezpečnosť prevádzky siete, je určený zoznam kritérií, ktoré slúžia ako limitné hodnoty pre testované scenáre. Kritériá sú popísané v postupoch jednotlivých metodík. Tieto kritériá sú následne kontrolované na základe navrhnutých metodík vo všetkých scenároch. Po zrealizovaní oboch metodík sú dosiahnuté odsimulované výsledky zhrnuté v kap. 4.

3.1 Typy scenárov siete

Metodika je aplikovaná na rôznych typoch scenárov znázornené v Tab. 10, pričom všetky vychádzajú zo základného modelu ES. Tieto typy scenárov sú zvolené podľa najpravdepodobnejších zmien pri prevádzke elektrizačnej sústavy. V práci sú použité scenáre, ktoré majú najvýznamnejší vplyv na bezpečnosť prevádzky siete vzhľadom na pridávanie nových DZ.

Tab. 10. Kombinácie jednotlivých scenárov prevádzkových stavov siete

Kombinácie jednotlivých scenárov					
Č.	T/Z/V	Scenár	Č.	T/Z/V	Scenár
1	5/5/5	MinT/MinZ/MinV	15	3/3/2	PriemT/PriemZ/MaxV
	[MW]	529-15/2764-2320/2681-2257		[MW]	1556-1042/3652-3208/3953-3529
2	5/5/3	MinT/MinZ/PriemV	16	3/2/5	PriemT/MaxZ/MinV
	[MW]	529-15/2764-2320/3529-3105		[MW]	1556-1042/4096-3652/2681-2257
3	5/5/3	MinT/MinZ/MaxV	17	3/1/3	PriemT/MaxZ/PriemV
	[MW]	529-15/2764-2320/3529-3105		[MW]	1556-1042/4541-4096/3529-3105
4	5/3/5	MinT/PriemZ/MinV	18	3/1/1	PriemT/MaxZ/MaxV
	[MW]	529-15/3652-3208/2681-2257		[MW]	1556-1042/4541-4096/4377-3953
5	5/3/3	MinT/PriemZ/PriemV	19	1/5/5	MaxT/MinZ/MinV
	[MW]	529-15/3652-3208/3529-3105		[MW]	2583-2069/2764-2320/2681-2257
6	5/3/2	MinT/PriemZ/MaxV	20	1/4/3	MaxT/MinZ/PriemV
	[MW]	529-15/3652-3208/3953-3529		[MW]	2583-2069/3208-2764/3529-3105
7	5/2/4	MinT/MaxZ/MinV	21	1/4/3	MaxT/MinZ/MaxV
	[MW]	529-15/4096-3652/3105-2681		[MW]	2583-2069/3208-2764/3529-3105
8	5/1/3	MinT/MaxZ/PriemV	22	1/3/4	MaxT/PriemZ/MinV
	[MW]	529-15/4541-4096/3529-3105		[MW]	2583-2069/3652-3208/3105-2681
9	5/1/2	MinT/MaxZ/MaxV	23	1/3/3	MaxT/PriemZ/PriemV
	[MW]	529-15/4541-4096/3953-3529		[MW]	2583-2069/3652-3208/3529-3105
10	3/5/5	PriemT/MinZ/MinV	24	1/3/2	MaxT/PriemZ/MaxV
	[MW]	1556-1042/2764-2320/2681-2257		[MW]	2583-2069/3652-3208/3953-3529
11	3/5/3	PriemT/MinZ/PriemV	25	1/2/4	MaxT/MaxZ/MinV
	[MW]	1556-1042/2764-2320/3529-3105		[MW]	4096-3652/4096-3652/3105-2681
12	3/4/2	PriemT/MinZ/MaxV	26	1/1/3	MaxT/MaxZ/PriemV
	[MW]	1556-1042/3208-2764/3953-3529		[MW]	2583-2069/4541-4096/3529-3105
13	3/3/5	PriemT/PriemZ/MinV	27	1/1/2	MaxT/MaxZ/MaxV
	[MW]	1556-1042/3652-3208/2681-2257		[MW]	2583-2069/4541-4096/3953-3529
14	3/3/3	PriemT/PriemZ/PriemV			
	[MW]	1556-1042/3652-3208/3529-3105			

Skúmané sú prevádzkové stavy siete, pri ktorých sa mení veľkosť tranzitného výkonu, hodnoty výroby s ohľadom na technológiu výroby a hodnoty zaťaženia RO. Pre stanovenie týchto hraničných prevádzkových stavov je použitá pravdepodobnostná analýza výskytu hodnoty tranzitu, výroby a zaťaženia z kap. 2.1.1. Z týchto prevádzkových stavov sú zvolené konkrétne scenáre, ktoré sú namodelované, simulované a následne opísané. Taktiež bol do týchto scenárov zohľadnený existujúci zdrojový mix v UO, ktorý je nasadzovaný podľa vyhodnotených hodnôt z kap. 1.4 pre každú

technológiu výroby. Jednotlivé scenáre a samostatná prevádzka siete je inšpirovaná reálnymi údajmi o prevádzke elektrizačnej sústavy SR od roku 2014 po rok 2017, ktoré sú dostupné v [5]. V každom scenári sú postupne pripájané distribuované zdroje, následne na čo sú kontrolované a analyzované zvolené kritériá.

V Tab. 10 sú uvedené všetky navrhnuté kombinácie scenárov pre maximálny, minimálny a priemerný tranzit, zaťaženie a výrobu. Kombinácie vychádzajú z Tab. 6 a Tab. 7, kde sú tranzit (T), zaťaženie (Z) a výroba (V) rozdelené do 5 typov intervalov hodnôt (od 1 maximálny do 5 minimálny).

Následne sú k jednotlivým scenárom priradené intervaly hodnôt výkonov, ktoré reprezentujú spomenuté prevádzkové stavy siete. Pre niektoré scenáre nebolo možné vytvoriť hraničné kombinácie prevádzkových stavov siete, pretože je 0 % pravdepodobnosť (na základe nameraných údajov), že by sa v sieti vyskytli, preto boli nahradené najbližším možným intervalom hodnôt (všetky modré riadky). Pre scenár 20 a 21 vyšli na základe spomenutej metódy identické hodnoty. Na základe týchto hodnôt a metód sú skúmané a vyhodnocované pre obe metodiky všetky typy scenárov.

3.2 Metodika určovania maximálneho objemu distribuovanej výroby

Postup určovania maximálneho výkonu v každej UO má niekoľko krokov počas, ktorých sa musí počítať s rôznymi neočakávanými situáciami prevádzky siete, ktorými sú poruchy, odstávky, nedostatočná prenosová kapacita vvn/vn TR atď. Navrhnutý základný model ES pozostáva z 22 uzlových oblastí, avšak nie každá z týchto oblastí bude skúmaná, pretože niektoré uzlové oblasti predstavujú veľkých odberateľov, pre ktorých bude hodnota DV nulová (nie sú priamo uzlové oblasti ale vo výsledkoch sú spomenuté ako UO z dôvodu znázornenia aktuálnej výkonovej bilancii vo všetkých UO). V práci sa bude predovšetkým venovať 18 UO, ktoré pozostávajú z 431 uzlov predstavujúcich výrobu, spotrebu alebo prípojnicu. Nie v každom z týchto vybraných uzlov môže byť pripojený nový DZ. Z tohto dôvodu sa DZ nepripájali do UO, v ktorých sa nachádzal centrálny zdroj (VE, TE, ZE), tie ktoré slúžili ako prípojnice a spojovacie uzly. Po tejto korekcii bolo vybraných 213 uzlov, do ktorých je možné inštalovať DZ. Vybrané uzly, ktoré spĺňali podmienky, napájajú určitú distribučnú oblasť prostredníctvom výkonového vn TR. Veľkosť je závislá od spotreby v danom uzle. Z dôvodu zjednodušenia bola zvolená jednotná hodnota inštalovaného výkonu vn TR pre všetky vybrané uzly a to výkon o hodnote 25 MVA. Z konštantnej hodnoty inštalovaného výkonu vn TR 25 MVA a počtu 213 uzlov znamená, že je teoreticky možné pripojiť 5325 MW do celej RO. Z praktického hľadiska je nereálne pripojiť tak vysoký výkon, pretože sieť nie je na takýto výkon dimenzovaná, a tým pádom by bolo narušené bezpečnostné kritérium n-1 TR, vedení, napätie by bolo príliš vysoké. Na základe týchto premenných boli navrhnuté metodiky a vykonané simulácie, pri ktorých sa zisťuje maximálny možný pripojiteľný výkon celkovo, ale aj vo všetkých RO.

3.2.1 Maximálny výkon pri vyvedení výkonu cez inú uzlovú oblasť

Prenosové schopnosti okolitých UO sú obmedzené na základe aktuálnej výroby a zaťaženia v danej UO, a preto prírastok výkonu z UO, kde nastala porucha (odstávka) ju môže neprimerane preťažiť a ohroziť bezpečnú prevádzku siete. V simuláciách sú testované scenáre s maximálnou, priemernou a minimálnou výrobou počas maximálneho a minimálneho zaťaženia. Scenáre s tranzitom neboli brané do úvahy, nakoľko UO boli testované vzájomne a tranzit by mal na zaťaženie prvkov v nich mal len minimálny vplyv.

Pre každú UO je vypočítané maximálne množstvo výkonu znázornené v Tab. 11, ktoré je možné pripojiť v troch možných verziách, keďže niektoré UO sú napájané z troch rôznych staníc (niektoré z 2 a niektoré z 1), čím vzniká možná variabilita porúch a vyvedení cez iné UO. V stĺpcoch sú hodnoty maximálne dosiahnutého výkonu v každej UO v troch verziách pre najčastejšie prevádzkové stavy siete (maximálnu, priemernú a minimálnu výrobu v sústave a maximálnu a minimálnu záťaž a ich kombinácie). Najhorší prevádzkový stav siete pre pripájanie max. množstva DV je tak isto počas minimálnej záťaže v rozmedzí od 2764 do 2320 MW a maximálnou výrobou v rozpätí od 3529 do 3105 MW pri týchto prevádzkových hodnotách siete je možné pripojiť 2659 MW. Pri posudzovaní bezpečnosti sa berie najhorší prevádzkový stav siete, čiže pri ďalšom postupe sa bude vychádzať z vyššie spomenutých výsledkov. UO, do ktorých nie je možné pripojiť viac výkonu sa nebudú posudzovať. Zvyšné maximálne hodnoty v každej UO budú brané ako hraničné (aj celkový maximálny výkon 2659 MW bude braný ako hraničný), čiže viac výkonu v týchto UO nie je možné pripojiť.

Tento výkon sa berie ako maximálny pre každú UO a bude sa používať pri ostatných metodikách. Následne sa pokračuje v ďalších simuláciách pri postupe stanovenia maximálneho objemu DV v jednotlivých scenároch sústavy.

Tab. 11. Výsledky simulácií možnosti pripojenia maximálnej DV v každej UO samostatne počas minimálneho zaťaženia počas min., priem a max. výroby

Minimálne zaťaženie: 2764 - 2320 MW									
[MW]	Min V = 2681 – 2257			Priem V = 3105 – 2681			Max V = 3529 – 3105		
Verzia	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
UO1	0	-	-	0	-	-	0	-	-
UO2	0	-	-	0	-	-	0	-	-
UO3	202	-	-	168	-	-	119	-	-
UO4	382	402	411	376	396	401	344	368	381
UO5	284	448	530	284	424	506	284	389	462
UO6	121	-	-	17	-	-	0	-	-
UO7	244	292	-	244	252	-	216	218	-
UO8	164	-	-	162	-	-	160	-	-
UO9	0	-	-	0	-	-	0	-	-
UO10	164	186	-	164	184	-	161	172	-
UO11	189	-	-	134	-	-	84	-	-
UO12	159	186	-	0	44	-	0	21	-
UO13	143	158	-	77	120	-	0	62	-
UO14	229	256	-	204	231	-	193	179	-
UO15	0	-	-	0	-	-	0	-	-
UO16	144	-	-	144	-	-	122	-	-
UO17	220	241	-	220	241	-	220	241	-
UO18	32	125	-	25	120	-	14	115	-
UO19	162	169	-	145	165	-	58	112	-
UO20	225	-	-	225	-	-	219	-	-
UO21	150	-	-	150	-	-	150	-	-
UO22	395	-	-	375	-	-	315	-	-
Spolu	3609	-	-	3114	-	-	2659	-	-

3.2.2 Postup stanovenia maximálneho objemu distribuovanej výroby

Z predchádzajúcich postupov sa identifikoval maximálne pripojiteľný výkon do každej UO. Naďalej sa s týmto výkonom uvažuje pri určení maximálnej DV, avšak vo všetkých UO pre celú RO naraz pre každý navrhovaný scenár. Ako u predchádzajúcich simuláciách aj v týchto budú testované scenáre s maximálnou, priemernou a minimálnou výrobou a maximálneho, priemerného a minimálneho zaťaženia v daných UO, avšak navyše bude uvažované aj s tranzitom, ktorý bude mať zásadný vplyv na výsledky (tak isto maximálny, priemerný a minimálny). Hodnoty výroby, spotreby a tranzitu na seba nadväzujú z hľadiska pravdepodobnosti výskytu v jednotlivých prevádzkových stavoch siete analyzovaných v kap. 2.1.1. Návrh metodiky na overenie maximálneho objemu distribuovaných zdrojov elektriny v regulačných oblastiach SR pripájaných do DS znázorňuje Obr. 2.

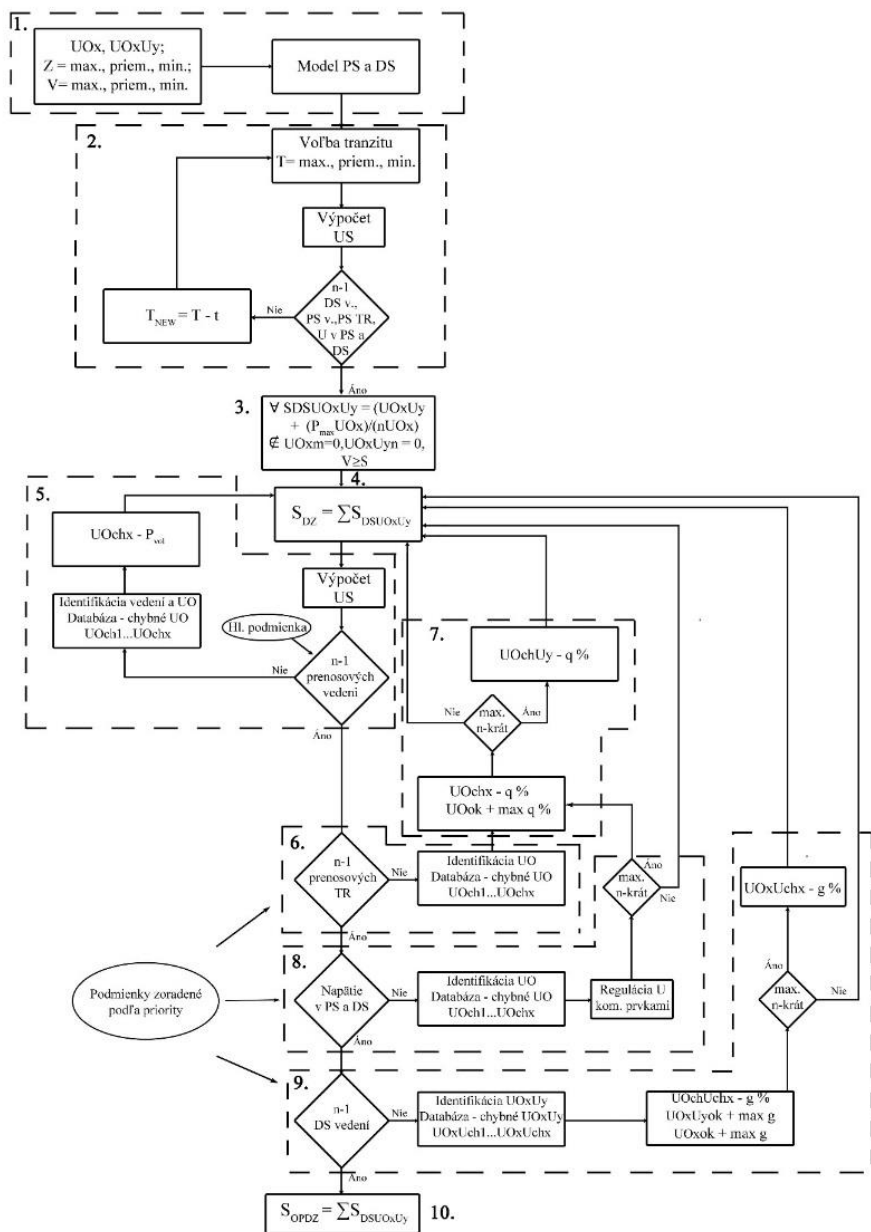
Postup nerozlišuje technológiu výroby elektriny jednotlivých zdrojov, a tým aj umiestnenie zdrojov (včetně elektrárne len v UO opísaných v kap. 1.3.). Umiestnenie a rozdelenie zdrojov podľa technológie výroby obsahuje kap 3.3. Nasledujúce body opisujú postup metodiky:

1. Vytvorenie počítačového modelu obsahujúceho PS a DS (len 110 kV časť sústavy). Model obsahuje jednotlivé uzlové oblasti (UOx) a konkrétne uzly (UOxUy). Model je naplnený hodnotami podľa aktuálne skúmaného scenára siete. Kombinácie maximálneho, priemerného a minimálneho zaťaženia ($Z = \text{max.}, \text{priem.}, \text{min.}$) a výroby ($V = \text{max.}, \text{priem.}, \text{min.}$).
2. Voľba tranzitu, ktorý bude tiecť cez RO. Po výbere tranzitu sa vypočíta ustálený stav a následne sa kontrolujú kritériá n-1 vedení v PS, DS, PS TR a napätia v PS a DS (aby nedošlo k výberu príliš vysokej hodnoty tranzitu). Keď nebude splnená podmienka, tranzit sa zníži o požadovanú hodnotu " t " (napr. 5 MW), až dokiaľ nebudú splnené kritériá.

3. V tomto kroku sa do každého uzla ($UOxUy$) podľa (10), pridá hodnota nových distribuovaných zdrojov (maximálny výkon z každej uzlovej oblasti $S_{max}UOx$ získaný z postupov z kap. 3.2.1, ktorý je rovnomerne pridaný do jednotlivých uzlov, na základe čoho vznikne nová hodnota výkonu v každom uzle ($S_{DSUOxUy}$). Výkon sa nepridá do uzlov, ktoré slúžia ako napájacie uzly alebo pripojnice ($UOxUyn = 0$), do uzlov kde je výroba väčšia ako zaťaženie ($UOxUyn \rightarrow V \geq Z$) a do uzlových oblastí, ktoré podľa spomínaných postupov vyšli ako nevyhovujúce pre pripájanie nových DZ ($UOxm = 0$).

$$S_{SUOxUy} = (UOxUy + \frac{S_{max}UOx}{n_{UOx}})$$

4. Sčítanie predbežného výkonu vo všetkých uzloch ($\sum S_{DSUOxUy}$). Z týchto hodnôt je vypočítaný sumárny výkon DV (S_{DZ}). Po priradení a sčítaní výkonov sa spočíta ustálený chod siete.
5. Kontrola hlavnej podmienky (kritéria), ktorá má najvýznamnejší vplyv na sústavu z pohľadu ohrozenia bezpečnej prevádzky siete pri pridávaní nových zdrojov. Na základe predchádzajúcich vyhodnotení systémových vplyvov v kap. 0 je zvolená za najnepriaznivejšiu kontrola bezpečnostného kritéria n-1 (nemôže presiahnuť hranicu 100 %) na prenosových vedeniach (najmä na cezhraničných vedeniach). Ak všetky prvky siete spĺňajú hodnoty podľa definovaného kritéria, postup pokračuje do kroku 6. Ak budú niektoré prvky mimo dovolených hodnôt, prebehne identifikácia vedení a UOx s nedodrzanými parametrami (zapišu sa do databázy $UOchx$). V týchto $UOchx$ nastane zníženie výroby ($UOchx - P_{vol}$) distribuovaných zdrojov. Postup sa opakuje až dokedy nebude splnená hlavná podmienka pričom postup pokračuje v ďalších podmienkach, kde sú zadané zvyšné kritériá postupne podľa vplyvu na sústavu z pohľadu ohrozenia bezpečnej prevádzky určené na základe vyhodnotenia systémových vplyvov.
6. Podmienka vyhodnotená ako ďalšia v poradí je kontrola bezpečnostného kritéria n-1 prenosových transformátorov (zaťaženie nemôže presiahnuť hranicu 100 %). Ak nebude táto podmienka v požadovaných hodnotách, prebehne identifikácia UOx s nedodrzanými parametrami ($UOchx$). Identifikujú sa celé UO , pretože sú napájané cez tieto prenosové TR.
7. Po identifikácii prebehne zníženie výkonu v UO ($UOchx - q\%$). Následne sa pokúsi tento znížený výkon nahradiť do uzlových oblastí, ktoré nie sú v databáze ($UOok + max. q\%$). Postup pokračuje do bodu, kde sa kontroluje podmienka zacyklenia (max. n-krát), avšak je to len technická záležitosť. Pokiaľ nebude splnená podmienka zacyklenia, budú sa testovať rôzne zmeny výkonov v UOx . Po niekoľkonásobnom neúspešnom pokuse zmeny výkonov v UO sa natrvalo zníži výkon vo všetkých $UOchx$ na pôvodnú hodnotu ($UOchx - q\%$). Postup sa vracia do bodu 4 a pokračuje sa v podmienkach.
8. Kontrola napätia v jednotlivých uzloch ($PS\ 400\ kV \pm 5\%$, $PS\ 220\ kV \pm 10\%$ a $DS \pm 10\%$). Ak budú niektoré prvky mimo dovolených hodnôt, prebehne identifikácia uzlových oblastí s nedodrzanými parametrami (zapišu sa do databázy $UOchx$). Ak napätie nie je v dovolených hodnotách, prebehne regulácia napätia pomocou kompenzačných prvkov. Po kompenzácii sa kontroluje počet regulácií, aby nedošlo k zacykleniu postupu. Pokiaľ nebude splnená podmienka zacyklenia, tak sa budú testovať rôzne typy regulácií napätia v UOx . Po niekoľkonásobnom neúspešnom pokuse regulácie napätia sa následne pokračuje do bodu 7, kde postup pokračuje.
9. Posledná sa testuje podmienka kontroly bezpečnostného kritéria n-1 distribučných vedení (nemôže presiahnuť hranicu 100 %). Toto kritérium bolo zvolené ako posledné, pretože sa vie presne identifikovať problém a taktiež sa mu vie jednoducho predísť. Ak budú niektoré prvky mimo povolených hodnôt, prebehne identifikácia vedení a jednotlivých $UOxUy$ s nedodrzanými parametrami (zapišu sa do databázy $UOxUchx$). Po identifikácii prebehne zníženie výkonu v chybných uzloch ($UOxUchx - g\%$). Následne sa pokúsi tento znížený výkon nahradiť do uzlov, ktoré nie sú v databáze ($UOxUyok + max. g\%$). Taktiež môže byť tento výkon priradený aj do iných $UOxok$ s dodrzanými parametrami. Postup pokračuje do bodu, kde sa kontroluje podmienka zacyklenia (max. n-krát). Pokiaľ nebude splnená podmienka zacyklenia, budú sa testovať rôzne zmeny výkonov v $UOxUchx$. Po niekoľkonásobnom neúspešnom pokuse zmeny výkonov v uzloch sa natrvalo zníži výkon vo všetkých $UOxUy$ na pôvodnú hodnotu ($UOxUchx - g\%$). Po znížení výroby sa postup opätovne vracia do bodu 4 a postup opäť pokračuje. Ak všetky uzly spĺňajú kritériá a podmienky, postup pokračuje do posledného bodu.
10. Ak sú všetky podmienky splnené stanovia sa maximálny objem DV tým, že sa spočíta pridaný výkon vo všetkých uzloch ($S_{OPDZ} = \sum S_{DSUOxUy}$).



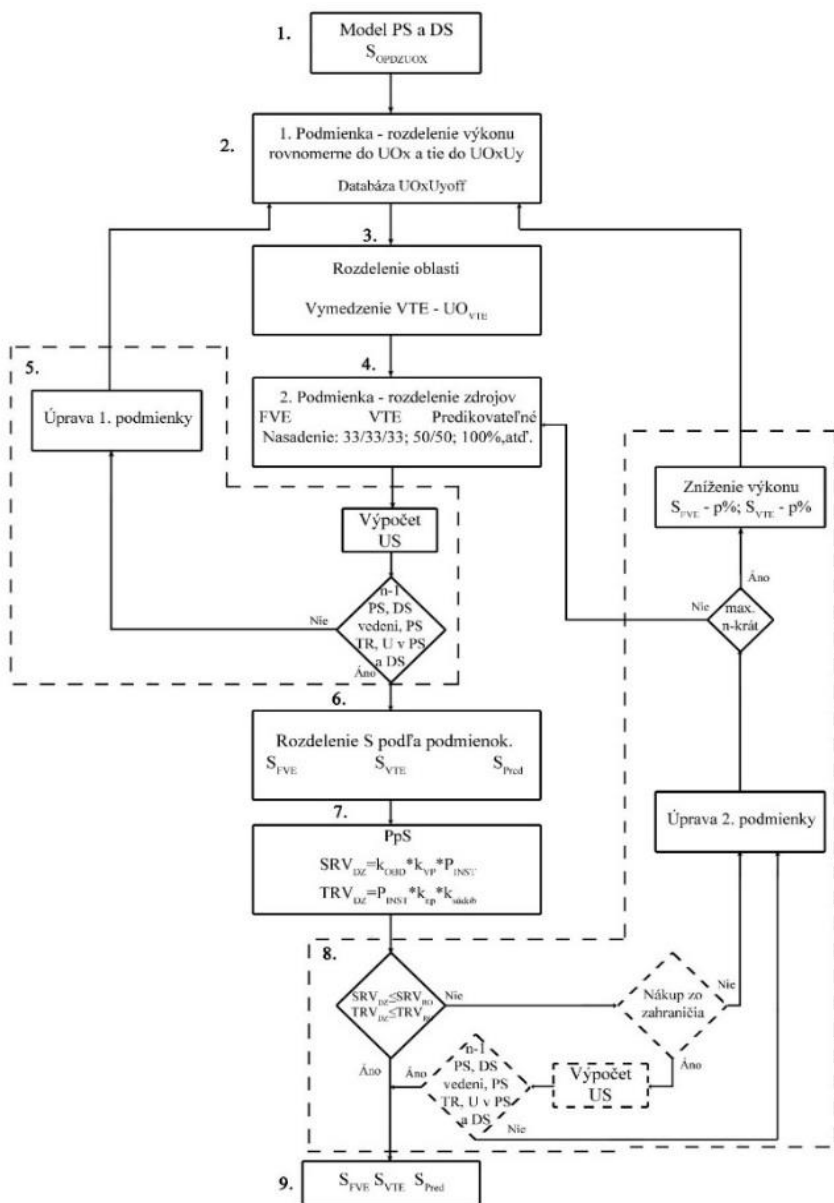
Obr. 2. Vývojový diagram postupu určovania maximálneho objemu distribuovaných zdrojov pripájaných do DS

3.3 Metodika stanovenia optimálneho objemu distribuovanej výroby podľa technológie výroby

Z predchádzajúceho postupu je získaný maximálny možný pripojiteľný výkon (S_{OPDZ}) do RO vzhľadom na určené kritériá pre každý scenár siete. Následne sa výsledný výkon optimálne rozdelí do každej UO RO podľa vopred určených podmienok. Postup zahŕňa dve podmienky a to rozdelenie množstva výroby do konkrétnych uzlov a zároveň rozlišuje technológiu výroby elektriny a tým nasadenie jednotlivých typov zdrojov, znázornený na Obr. 3.

Následujúce body opisujú postup metodiky:

1. Počítačový model z predchádzajúceho postupu spolu s maximálnym výkonom (S_{OPDZ}), ktorý je možné pripojiť do RO. S týmto výkonom a modelom sa v ďalších krokoch naďalej pracuje, aby došlo k jeho prerozdeleniu do UO podľa technológie výroby. Avšak pre optimálne rozdelenie DV do UO sa berie do úvahy maximálna hodnota získaná na základe analýzy zo SEB ($S_{OPDZUOX}$), podľa ktorej by sa malo pripojiť do roku 2030, 888,9 MW distribuovaných zdrojov.
2. 1. podmienka – rozdelenie výkonu ($S_{OPDZUOX}$). Táto podmienka je závislá od účelu a druhu skúmania. Výkon $S_{OPDZSEB}$ sa rozdelí podľa podmienky rozdelenia výkonu. V práci je použité delenie výkonu rovnomerne do všetkých UO (výkon sa prerozdelení rovnomerne do všetkých uzlových oblastí, do konkrétnych uzlov) prihliadajúc na ich maximá, okrem tých, ktoré sú určené ako nevyhovujúce (napájacie uzly, nevyhovujúce z predošlých postupov, prípojnic atď.- UOX_{Uyoff}) a tak isto prihliadajúc na hodnotu získanú so SEB.
3. Rozdelenie UO podľa lokality. Tento krok ma význam najmä pri výbere veterných elektrární, ktoré sú závislé od poveternostných podmienok (spomenuté v kap. 1.3). V tejto časti sa vymedzia UOX (a konkrétne uzly), do ktorých sa neodporúčajú alebo nemôžu pripájať veterné (prípadne MVE) elektrárne. Uzly sú uložené v databáze a označené UO_{VTE} .
4. 2. podmienka – rozdelenie zdrojov podľa technológie na základe 1. podmienky. V druhej podmienke sa vyberie zastúpenie DV podľa technológie výroby do každej uzlovej oblasti (konkrétne do jednotlivých uzlov). DV sa rozdelí podľa technológie výroby na FVE, VTE a predikovateľné. Následne sa určí nasadenie týchto zdrojov v jednotlivých uzloch v každej UO podľa technológie výroby. Uvažuje sa s prerozdelením DV percentuálne vzhľadom na stratégiu energetickej bezpečnosti SR opísanú v kap. 1.2. V nevyhovujúcich uzloch UO_{VTE} , kde nie sú inštalované VTE, sú zastúpené iba zvyšné dva typy zdrojov (taktiež percentuálne podľa SEB).
5. Po výpočte ustáleného stavu sa kontroluje n-1 vedení v PS, DS, PS TR, a povolená hodnota napätia v PS a DS. Ak nebude splnená kontrola týchto parametrov, postup musí prejsť k úprave prvej podmienky, ktorá by mala zabezpečiť dostatočnú zmenu parametrov a dodržanie kritérií. Postup pokračuje do ďalšieho bodu po splnení všetkých kontrolovaných kritérií.
6. Rozdelenie a sčítanie výkonu podľa druhu technológie výroby vo všetkých UO (S_{FVE} , S_{VTE} , S_{Pred}).
7. Pokračuje sa k výpočtom potrebného navýšenia objemu PpS, ktoré sa vykonávajú pre SRV podľa vzorcov (3), (6), (7) a pre TRV podľa vzorcov (8), (9). Získanie hodnôt SRV a TRV (SRV_{DZ} , TRV_{DZ}).
8. Kontrola hodnôt (SRV_{DZ} , TRV_{DZ}) s disponibilitou SRV_{RO} a TRV_{RO} v RO. Ak je dostatok PpS v RO, postup pokračuje v ďalšom bode. Ak ich nie je dostatok (je možné uvažovanie o nákupe PpS zo zahraničia), tak prebehne priamo úprava 2. podmienky. Postup pokračuje do bodu, kde sa kontroluje podmienka zacyklenia (max. n-krát). Po niekoľkonásobnom neúspešnom pokuse úpravy 2. podmienky postup pokračuje k zníženiu výkonu DV pri každom druhu technológie výroby elektriny ($S_{FVE} - p\%$; $S_{VTE} - p\%$). K tomuto bodu nemusí ani dôjsť pri uvažovaní len predikovateľných zdrojov (ktoré nemajú vplyv na PpS), prípadne priameho nákupu PpS zo zahraničia. Z dôvodu neuverejnenia informácií a možnej vysokej variability disponibilít PpS postup počíta s automatickým nákupom PpS zo zahraničia. Následne prebehne výpočet ustáleného stavu následná kontrola n-1 vedení v PS, DS, PS TR, a povolené hodnoty napätia v PS a DS, pretože výkon pre PpS nepriamo navýši zaťaženie prenosových vedení v RO. Potom postup pokračuje do ďalšieho bodu.
9. Stanovenie optimálneho objemu DV podľa druhu technológie výroby (S_{FVE} , S_{VTE} , S_{Pred}).



Obr. 3. Metodika optimálneho objemu distribuovaných zdrojov podľa technológie výroby v jednotlivých UO RO

4 Stanovenie optimálneho inštalovaného výkonu distribuovanej výroby podľa navrhnutých metodík

Na základe spracovaných dát pravdepodobnostnej analýzy súčasného stavu RO SR a analyzovania vplyvov DV na ES je vytvorený model ES s rôznymi navrhnutými testovacími scenármi. Následne je podľa metodík simulované maximálne množstvo DV a optimálne množstvo DV v jednotlivých UO pre všetky navrhované scenáre reprezentujúce prevádzkové stavy siete (kap. 3.1.). Pre jednotlivé scenáre boli postupne uskutočnené jednotlivé simulácie.

4.1 Scenáre s minimálnym tranzitom

Pre každý scenár je na základe oboch metodík simulovaný maximálny výkon DV v RO. Následne je tento výkon optimálne rozdelený v jednotlivých UO podľa technológie výroby (maximálne do hodnoty podľa SEB), simulovaný pre každý scenár.

Scenáre s minimálnymi hodnotami tranzitu (č. 1 až č. 9), predstavujú najvhodnejšie podmienky pre pripájanie DV oproti ostatným, pretože cez celú RO tečú menšie toky výkonov, čím sú menej zaťažované prvky siete. Ďalším faktorom vplyvujúcim na hodnotu DV je aj zaťaženie siete. Zvyšovanie záťaže v sieti predstavuje možné navýšenie pripájania ďalších DZ, ktoré by pokryli toto zaťaženie. Pre príklad sú vysvetlené zjednodušené výsledky pre scenár č.1.

Výsledky simulácií scenára č. 1 - MinT/MinZ/MinV

Pre dosiahnutie optimálneho objemu DV bolo počas simulácií vyhodnotené veľké množstvo výsledkov (prevádzkové hodnoty uzlov, hodnoty napätí uzlov, zaťaženie parametrov prvkov siete, kontrolované kritériá atď.), a preto sú v Tab. 12 znázornené iba vybrané výsledky a to hlavné prevádzkové stavy siete. Hodnota tranzitu, zaťaženia výroby, bilancia pred pripojením DV (záporne import potrebný na vyrovnanie bilancie), S_{OPDZ} (maximálna hodnota DV v RO), výroba spolu s pridanou DV, bilancia po pridaní DV, RO_{vstup} (tok výkonu smerujúci z RO1 a RO5 do RO), RO_{vystup} (smer toku výkonu z RO do RO1, RO3 a RO4) export (kladná hodnota), prípadne import (záporná hodnota) a straty.

V scenári sú simulované minimálny tranzit, maximálne hodnoty zaťaženia, minimálne hodnoty výroby tečúce cez RO (v Tab. 12). Prostredníctvom simulácií a postupným pridávaním DV podľa metodiky z kap. 3.2 je možné do skúmanej RO pripojiť maximálnu distribuovanú výrobu o hodnote 2061 MW. Obmedzujúcim prvkom, ktorý nedovoľoval pripojenie väčšieho množstva DZ, je zaťaženie prenosových medzištátnych vedení. Existujúci tranzit cez sústavu spolu s exportujúcim výkonom o hodnote 1925,59 MW zapríčinili preťaženie PS vedenia (RO3V1) z hlavnej RO do RO3 (pri hodnote $RO_{vystup} = 2445,59$ MW) pri kontrole bezpečnostného kritéria n-1 do 100 %.

Podľa postupu z prvej metodiky je zvolený maximálny pripojiteľný výkon DV v RO. Následne postup pokračuje k druhej metodike, kde je priradený konkrétny typ zdroja podľa technológie výroby elektriny, konkrétne množstvo a konkrétna lokalita inštalácie DZ. V Tab. 13 je zoznam všetkých UO s pôvodne odoberaným a generovaným výkonom, na čo bola vypočítaná aktuálna bilancia každej UO.

Inštaláciou S_{OPDZ} sa táto bilancia zmenila v uzloch, do ktorých je možné inštalovať výkon do maximálnej hodnoty na základe kap. 3.2.1 (prvých 5 stĺpcov). Avšak v najbližších rokoch je nereálna inštalácia 2061 MW v DZ, a preto sa postupuje na základe analýzy zo SEB, keby sa predpokladá do roku 2030 nárast týchto zdrojov o $S_{OPDZUOX} = 888,86$ MW. Z uvedeného dôvodu sa v druhej metodike skúma len takáto hodnota DV.

Voľba zdrojov podľa technológie výroby je rozdelená percentuálne podľa SEB podľa Tab. 1. (VTE 51,5 %, FVE 21,9 %, predikované 22,46 % – Bioplyn 19,02 %, MVE 3,44 %, Geotermálne 5,76 %). Podľa SEB je najviac predpokladaný nárast VTE a to o hodnote 446,86 MW (podľa technicky využiteľného potenciálu spomenutého v kap. 1.2 je málo pravdepodobné dosiahnuť takúto hodnotu, ale aj napriek tomu sa s touto hodnotou v práci uvažuje). V Modeli boli zvolené UO, do ktorých nie je možná inštalácia VTE. Obmedzený výkon bol nahradený do zvyšných UO. Rozdelenie využitia DV podľa technológie výroby do každej UO znázorňuje Tab. 13 (posledné 3 stĺpce).

Tab. 12. Prevádzkové hodnoty v RO pred a po implementovaní DV do modelu (v MW)

Tranzit	Zaťaženie	Výroba	Bilancia pred	S_{OPDZ}	Výroba spolu	Bilancia po
520	2500	2400	-100	2061	4561	1960,74
RO_{vstup}	RO1 / RO5	RO_{vystup}	RO3 / RO4 / RO1	Exp. + / imp.-	Straty	
349,962	170,038	1962,93	461,46	21,2	1925,59	35,15

Tab. 13. Podrobné výsledky prevádzkových hodnôt v UO zo simulácie a optimálne rozdelenie DV do každej UO podľa technológie výroby

Pred implementáciou S _{OPDZ} [MW]			Po S _{OPDZ} [MW]	S _{OPDZUOX} = 888.86 [MW]			
Názov	Podb	Pgen	Bilancia pred	Bilancia po	VTE	FVE	Ost
UO1	51,7	0,0	-51,7	-51,7	0,0	0,0	0,0
UO2	91,7	75,6	-16,1	-16,1	0,0	0,0	0,0
UO3	78,3	17,9	-60,4	58,6	37,7	10,9	14,7
UO4	133,9	10,4	-123,5	61,5	52,0	16,9	22,8
UO5	184,8	54,0	-130,9	71,3	55,7	18,4	24,9
UO6	105,9	79,8	-26,2	-26,2	0,0	0,0	0,0
UO7	100,4	0,0	-100,4	58,0	0,0	14,4	19,5
UO8	106,3	27,5	-78,8	64,1	42,9	13,0	17,6
UO9	168,3	0,0	-168,3	-168,3	0,0	0,0	0,0
UO10	79,0	5,4	-73,6	59,0	40,6	12,1	16,3
UO11	59,0	41,2	-17,8	65,8	30,0	7,6	10,3
UO12	109,9	33,8	-76,2	-76,2	0,0	0,0	0,0
UO13	65,3	36,1	-29,3	-29,3	0,0	0,0	0,0
UO14	190,5	38,6	-151,9	41,1	0,0	17,6	23,8
UO15	22,3	0,0	-22,3	-22,3	0,0	0,0	0,0
UO16	68,2	22,3	-45,9	61,8	0,0	9,8	13,3
UO17	122,7	0,0	-122,7	59,7	51,4	16,6	22,5
UO18	232,9	58,3	-174,6	-160,6	14,9	1,3	1,7
UO19	188,7	103,4	-85,3	-27,3	24,5	5,3	7,1
UO20	93,0	9,6	-83,4	60,3	0,0	13,1	17,7
UO21	33,5	0,0	-33,5	57,0	31,5	8,3	11,2
UO22	213,5	34,3	-179,3	68,4	65,6	22,6	30,5
Spolu	2500,0	648,2	-1851,8	208,9	446,9	188,0	254,0

4.1.1 Vyhodnotenie scenárov s minimálnym tranzitom

V najideálnejšom prípade môže byť implementovaných až 2659 MW DV v scenári č. 8 s minimálnym tranzitom, maximálnou záťažou a priemernou výrobou (taktiež vyšla táto hodnota aj pre scenár č. 4 a č. 7, avšak pri inom prevádzkovom stave siete).

Pri tomto druhu scenára, príliš veľkým začleňovaním DV, dochádza k problémom udržania napätia v stanovených limitoch. Pred pripojením DV sú prvky siete v povolených hodnotách. Po postupnej inštalácii DV s o hodnotu 2659 MW bolo potrebné regulovať napätie siete (znižovať ho pomocou kompenzačných prostriedkov v PS uzloch). Rozdiel napätí pred a po pripojení DV je znázornený v Tab. 14 v scenári č. 8. Rozdiel medzi napätiami v PS je 7 kV a to už po zaradení kompenzácií v PS uzloch. Znamená to, že príliš vysoká výroba v RO nebezpečne zvyšuje napäťové pomery v sústave a pravdepodobne by si vyžiadala začlenenie väčšieho množstva kompenzačných zariadení (tlmiviek v PS uzloch). Taktiež výrazne stúpla aj napätie v 220 kV sieti a v distribučných sieťach (110 kV). Vyššie napätia v DS môžu spôsobiť problémy aj pre odberateľov, ktorí majú podmienené napájanie zníženým napätím. Pripojenie DV má významný vplyv aj na priemerné zaťaženie prvkov siete, čo je znázornené v Tab. 14. Prenosové aj distribučné vedenia sú menej zaťažované, čo spôsobilo začlenenie DV do konkrétnych UO (čiže v mieste spotreby). Umiestnenie DV v mieste spotreby znížilo tok výkonov cez sústavu z PS do DS. Taktiež aj zaťaženie transformátorov je nízke z rovnakého dôvodu, ako je to pri vedení. Výroba je inštalovaná priamo v konkrétnych UO (výroba sa rovná zaťaženiu), a preto tečie len minimálny výkon cez tieto TR. TS sú zaťažované najmä reaktančným výkonom tečúcim do alebo z UO (ale najmä z UO do PS). Je to spôsobené slabou zaťažovanosťou vedeniami, kedy prevažuje kapacitný nabíjaci výkon nad reaktančným výkonom induktívneho charakteru. Ďalšou nevýhodou je zabezpečenie veľkého množstva PpS pri inštalácii ťažko predikovateľných DZ. PpS by sa museli pravdepodobne zabezpečiť prostredníctvom nákupu zo zahraničia, čo môže spôsobiť prídavné zaťaženie prenosových vedení.

Tab. 14. Priemerné hodnoty napätia a zaťaženia prvkov v RO

Pripoj. SOPDZ	Priemerné U 400 kV	Priemerné U 220 kV	Priemerné U 110 kV
Pred [kV]	410,60	232,65	115,84
Po [kV]	417,61	237,14	117,87
Pripoj. SOPDZ	Priem. zať. PS TR	Priem. Zať. PS ved.	Priem. Zať. DS ved.
pred [%]	33,24	27,12	18,41
po [%]	6,05	23,90	10,54

Na základe vyhodnotenia simulácii bol určený kritický faktor, kvôli ktorému nie sú dodržané určené kritériá podľa metodiky. Obmedzujúcim kritériom bolo nedodržanie bezpečnostného kritéria n-1 na prenosových vedeniach v scenároch č. 1 až 3,5,6 a 9 (v scenári č. 4,7,8 nenastalo porušenie žiadnych kritérií). Konkrétne ide o porušenie bezpečnostného kritéria n-1 prenosových vedení v smere z RO do RO3, ktoré nastalo pri scenároch č. 1 až 3,6 a 9 scenároch a z RO do RO4, ktoré nastalo pri scenári č. 5. Výsledný maximálny výkon DV 2659 MW je nereálne pripájať v najbližšej dobe do sústavy (týka sa to aj výsledných hodnôt maximálnych výkonov DV scenárov č. 1 až č. 9), a preto sa pri optimálnom rozdelení DV do UO berie do úvahy hodnota získaná na základe analýzy zo SEB, podľa ktorej by sa malo do roku 2030 pripojiť 888,9 MW distribuovaných zdrojov. Ako najmenej vhodný scenár pri minimálnom tranzite pre inštaláciu DV vyšiel scenár č. 2 a to 1142 MW, čo predstavuje stále hodnotu vyššiu ako hodnota získaná so SEB.

4.1.2 Scenáre s priemerným tranzitom

Scenáre s priemernými hodnotami tranzitu (č. 10 až č. 18) predstavujú najčastejšie sa vyskytujúce prevádzkové stavy v sústave. Priemerná hodnota záťaže sa v sústave vyskytuje s najväčšou pravdepodobnosťou.

Pri najvhodnejších podmienkach môže byť implementovaných až 2506 MW (scenár č. 16) DV, čo nie je až taký rozdiel oproti predchádzajúcim scenárom s minimálnym tranzitom, avšak minimá DV sú na omnoho nižších hodnotách. Vysoký podiel DV si opäť nesie nevýhody vo forme zložitej regulácie napätia a vo forme zabezpečenia dostatočnej disponibilít PpS podobne ako pri scenároch s min. tranzitom (samozrejme v menšom rozsahu). Na základe vyhodnotenia simulácii bol vždy určený kritický faktor, kvôli ktorému nie sú dodržané určené kritériá podľa metodiky. Obmedzujúcim kritériom bolo nedodržanie bezpečnostného kritéria n-1 na prenosových vedeniach vo všetkých scenároch v smere z RO do RO3 (pri scenároch č. 10, 11, 13 až 15 a 18 to bolo vedenie EO3V1 a pri 12, 16 a 17 scenároch vedenie RO3V2). V spomenutom scenári (č. 16) a ďalších piatich scenároch (č. 10, č. 13, č. 14, č. 17 a č. 18) je možné pripojiť väčšie množstvo DV s porovnaním s hodnotou získanou zo SEB. Z tohto dôvodu nie je pre tieto scenáre optimálne rozdelená DV podľa technológie výroby v maximálnej hodnote výkonu, ale len do hodnoty získanej na základe SEB. V ďalších troch scenároch (č. 11, č. 12 a č. 15) je hodnota DV nižšia ako hodnota získaná zo SEB. Znamená to, že množstvo DV je značne obmedzené a už samotný prevádzkový chod siete bez DV môže spôsobiť dodatočné problémy pri prevádzke ES.

Scenár č. 11 vyšiel ako najmenej vhodný prevádzkový stav siete pre pripájanie DV s hodnotou 261 MW pri priemerných hodnotách tranzitu.

4.2 Scenáre s maximálnym tranzitom

Scenáre s maximálnymi hodnotami tranzitu (č. 19 až č. 27) predstavujú najmenej vhodné podmienky pre pripájanie DV, pretože cez celú RO tečú vysoké toky výkonov, čím sú viac zaťažované prvky siete. Ďalším faktorom vplývajúcim na hodnotu DV je aj zaťaženie siete. Nízke zaťaženie siete s novo nainštalovanými DZ môže spôsobiť navýšenie exportovaného výkonu v RO. Exportovaný výkon zvyšuje zaťaženie cezhraničných prenosových vedení, čo môže byť obmedzujúcim faktorom pre pripájanie DV. Pre príklad sú vysvetlené výsledky pre scenár č. 20 (č. 21).

Výsledky simulácií scenára č. 20 (MaxT/MinZ/PriemV) a č. 21 (MaxT/MinZ/MaxV)

V scenári č. 20 sú simulované maximálny tranzit, minimálne hodnoty zaťaženia, priemerné hodnoty výroby tečúce cez RO a v č. 21 sú simulované maximálny tranzit, minimálne hodnoty zaťaženia, maximálne hodnoty výroby tečúce cez RO (znázornené v Tab. 15). Scenáre vyšli na základe spracovania hraničných hodnôt v kap. 3.1 identické. Pri simuláciách mala byť hodnota maximálneho tranzitného toku 2250 MW, avšak bola dosiahnutá len hodnota 2163 MW. Pri tejto hodnote tranzitu

a pôvodných parametroch je obmedzujúcim prvkom PS vedenie (RO3V1) z hlavnej RO do RO3, ktoré pri hodnote $RO_{vystup} = 2422,97$ MW prenášaného výkonu nespĺňa bezpečnostné kritériá n-1 do 100 %. To znamená že, prostredníctvom simulácií a postupným pridávaním DV podľa metodiky z kap. 3.3 nie je možné do skúmanej RO pripojiť žiadnu distribuovanú výrobu bez narušenia bezpečnej prevádzky v sústave. Tieto scenáre sú pre pripájanie nových DV nevhodné a nepokračuje sa v ďalšom postupe. Keďže je to reálny prevádzkový stav, pravdepodobne už v dnešnej dobe dochádza k prevádzkovaniu ES nad dovolené hodnoty zaťaženia.

Tab. 15. Prevádzkové hodnoty v RO pred a po implementovaní DV do modelu (v MW)

Tranzit	Zaťaženie	Výroba	Bilancia pred	S_{OPDZ}	Výroba spolu	Bilancia po
2163	3000	3300	300	0	3000	300,00
RO_{vstup} RO1 / RO5	RO_{vstup} RO3 / RO4 / RO1		Exp. + / imp.-		Straty	
1721,65	440,905	1998,73	424,24	0	260,42	39,58

4.2.1 Vyhodnotenie scenárov s maximálnym tranzitom

V najideálnejšom prípade (scenár č. 26) môže byť implementovaných 1218 MW DV. Oproti hodnotám v predchádzajúcich scenároch s minimálnym a priemerným tranzitom je to výrazný rozdiel, avšak sú tu opäť nevýhody vo forme zložitejšej regulácie napätia a vo forme zabezpečenia dostatočnej disponibilnosti PpS.

Na základe vyhodnotenia simulácií bol vždy určený kritický faktor, kvôli ktorému nie sú dodržané určené kritériá podľa metodiky. Obmedzujúcim kritériom bolo nedodržanie bezpečnostného kritéria n-1 na prenosových vedeniach vo všetkých. Konkrétne ide o porušenie bezpečnostného kritéria n-1 prenosových vedení v smere z RO do RO3, ktoré nastalo pri scenároch č. 19 až 22, 24, 25 a 27 z RO do RO4, ktoré nastalo pri scenároch č. 23 a 26. Na základe všetkých simulácií je zrejme, že cezhraničný profil z RO do RO3 je obmedzujúcim prvkom pri inštalácii novej DV. Z tohto dôvodu potrebné navýšenie prenosových schopností týchto profilov. Vo výstavbe sú nové 400 kV vedenia do HU, pričom ich dokončenie výrazne zvýši maximálnu prenosovú kapacitu profilu smerujúceho do HU (RO3) až o 100 %, avšak by mohlo byť vhodné v najbližšej dobe zvýšiť prenosovú schopnosť do UA (RO4), keďže aj toto vedenie počas simulácií vyšlo ako jeden z kritických prvkov siete.

V spomenutom scenári č. 26 a v scenári č. 25 je možné pripojiť väčšie množstvo DV s porovnaním s hodnotou získanou zo SEB. Z tohto dôvodu nie je pre tieto scenáre optimálne rozdelená DV podľa technológie výroby v maximálnej hodnote výkonu, ale len do hodnoty získanej na základe SEB. V ďalších štyroch scenároch (č. 19, č. 22, č. 23 a č. 27) vyšla hodnota DV nižšia ako hodnota získaná zo SEB. Znamená to, že množstvo DV je značne obmedzené a už samotný prevádzkový chod siete bez DV môže spôsobiť dodatočné problémy pri prevádzke ES.

Scenáre č. 20 č. 21 a č. 24 vyšli ako najmenej vhodné prevádzkové stavy siete pre pripájanie DV. V týchto scenároch nebola ani len dosiahnutá hodnota maximálneho tranzitu z čoho vyplýva, že nie je ani len možné pripojiť žiadne nové DZ.

Keďže sú tieto scenáre inšpirované reálnymi prevádzkovými stavmi ES, pravdepodobne už v dnešnej dobe dochádza k prevádzkovaniu ES nad dovolené hodnoty zaťaženia pri zvýšených hodnotách tranzitu, ktorým dochádza počas roka s pravdepodobnosťou 0,2 % pre scenár č. 20 a č. 21 a 0,12 % pre scenár č. 24. Počas hodinového merania v roku 2017 až 28 krát (8760 meraní) bola nameraná kombinácia prevádzkových stavov, ktoré podľa simulácií ohrozujú bezpečný chod sústavy. Pribúdajúcou DV by pravdepodobne táto pravdepodobnosť výskytu problémových situácií vzrástla čo by mohlo zapríčiniť značnú destabilizáciu sústavy. Doposiaľ sa v postupoch uplatňovali deterministické prístupy, ktoré vychádzajú z predkladov prevádzkovateľov sústav a predpokladov ich prevádzok. Z dôvodov určenia presnejších výsledkov simulácií je vhodné zahrnúť do postupov pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy.

Prínos pre Prax

Na základe predpokladov dizertačnej práce boli analyzované systémové vplyvy, ktoré sú považované ako hlavné kritériá pri stanovení metodiky maximálneho množstva DV. Na základe týchto kritérií boli navrhnuté dve metodiky, z ktorých sa najskôr určí maximálny objem DV, z ktorého sa na základe požadovaných podmienok určí optimálny objem DV rozdelený podľa technológie výroby do jednotlivých UO v RO. Postupným implementovaním týchto metodík na simuláciách sú vyhodnotené konkrétne výsledky.

Prínosom práce sa môže považovať:

Analýza súčasného stavu regulačnej oblasti SR:

- Pravdepodobnosť výskytu hodnoty výkonu zo zdrojového mixu SR.
- Pravdepodobnosť výskytu intervalu hodnôt výroby počas intervalov spotreby v RO SR.

Analýza systémových vplyvov na prevádzku PS spôsobených pripájaním DV:

- Pravdepodobnosť výskytu hodnoty tranzitu počas výroby a spotreby.
- Navýšenie hodnoty tranzitných tokov.
- Spätňý tok výkonu cez PS TR – nárast napätia.
- Objem a disponibilita PpS – nedostatky v metodikách určovania PpS.

Ako hlavný prínos práce sa môže považovať:

Zmena deterministického prístupu na pravdepodobnostný prístup hodnotenia stavov sústavy.

Návrh metodiky pre pripojenie maximálneho množstva DV do RO:

- Pravdepodobnostný prístup k návrhu metodiky
- Postup pre určenie maximálneho množstva DV pre každú UO
- Univerzálna metodika na stanovenie maximálneho množstva DV pripájaných do RO vzhľadom na systémové vplyvy (kritériá).

Návrh metodiky pre optimálne množstvo DV v jednotlivých UO RO podľa technológie výroby:

- Pravdepodobnostný prístup k návrhu metodiky
- Univerzálna metodika na stanovenie optimálneho množstva DV pripájaných do UO v RO vzhľadom na technológiu výroby elektriny z jednotlivých zdrojov.

Navrhnuté odporúčania vyplývajúce na základe dizertačnej práce:

- Existujúce postupy uplatňovali najmä deterministické prístupy, ktoré vychádzajú z podkladov prevádzkovateľov sústav a predpokladov ich prevádzok. Z dôvodov určenia presnejších výsledkov je vhodné zahrnúť do postupov pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy.
- Vypracovanie podrobnejšej štúdie, ktorá by simulovala odľahčenie prenosových TR, čiže jednotlivých UO. Zo simulácií by sa zistili napäťové pomery pri odľahčených TR, na základe ktorých by sa mohla navrhnuť (odsimulovať) implementácia vhodných regulačných prostriedkov (ktoré by toto napätie kompenzovali) v konkrétnych uzloch.
- Možná zmena legislatívy, ktorá by dovoľovala prevádzkovateľom DS obmedziť (znižovať) výkon z ťažko predikovateľných DZ (diaľkové ovládanie zdrojov), vďaka čomu by bola jednoduchšia regulácia výkonu v sieti. Avšak táto možnosť je pravdepodobne nereálna, keďže prevádzkovatelia DZ majú podpísané dlhoročné kontrakty s PDS.
- Navrhnutie novej PpS, ktorú by mohli poskytovať prevádzkovatelia DZ. Diaľkové vypnutie zdrojov (prípadne zníženie výroby) ako prídavná PpS, ktorá by finančne neobmedzila prevádzkovateľov týchto zdrojov (cena PpS by sa minimálne rovnala cene výkupu elektriny z týchto zdrojov za dobu, keď elektrárne mohli vyrábať, ak to je ekonomicky výhodné).
- Pri výraznom navýšení DV je potrebné zvýšenie objemu PpS v RO, ktoré by pokrývali náhle zmeny výroby ťažko predikovateľných zdrojov. Jedným z riešení je tvorba PpS na základe využitia virtuálnych blokov.
- Obmedzenie inštalácie ťažko predikovateľných DZ len pre vlastnú spotrebu (bez dodávky do siete, s vlastnou batériou).
- Zavádzanie smart grids, ktoré výrazne zlepšia monitorovanie a riadenie sietí, čím sa zvýši bezpečnosť dodávky elektriny z distribuovaných zdrojov.

Záver

V práci sú opísané príčiny zavádzania nových distribuovaných zdrojov elektriny ako aj ich výhody, ale najmä nežiaduce vplyvy na elektrizačnú sústavu, ktorými sa musí zaoberať z dôvodu zachovania bezpečnej a spoľahlivej prevádzky elektrizačnej sústavy.

Distribuované zdroje boli v práci rozdelené podľa technológie výroby elektrickej energie z dôvodu ďalšieho pridelenia významu vplyvov zdrojov na elektrizačnú sústavu na veterné (ťažko predikovateľný výstupný výkon po dobu 24 hodín počas dňa), fotovoltaické (ťažko predikovateľný výstupný výkon, avšak je ho možné vymedziť v daných časových intervaloch) a predikovateľné (predikovateľný výstupný výkon).

V práci bol analyzovaný súčasný stav elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky. Pri posudzovaní množstva a typov elektrární, ktoré sa budú v nasledujúcich rokoch pripájať sa vychádza z analýzy stratégie energetickej bezpečnosti, podľa ktorej sa plánuje nainštalovať 889 MW distribuovanej výroby. V práci je zohľadnený a navrhnutý pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy, pričom sa doposiaľ uplatňovali najmä deterministické prístupy, ktoré vychádzajú z podkladov prevádzkovateľov sústav a predpokladov ich prevádzok. Z tohto dôvodu je z analýzy súčasného stavu regulačnej oblasti SR spracovaná pravdepodobnostná analýza výskytu hodnoty výkonu každého typu zdroja zo zdrojového mixu SR a taktiež pravdepodobnosť výskytu hodnoty v stanovených intervaloch výroby počas konkrétnych intervalov zaťaženia v RO SR.

Z charakteristík zaťaženia je zrejmé, že počas zimného obdobia vzniká väčší priestor pre inštaláciu distribuovanej výroby, čím by bolo možné znížiť hodnotu importu a tým pokryť zaťaženie (najmä biomasa a malé vodné elektrárne, ktoré majú stabilnejšiu výrobu). V letných mesiacoch je situácia opačná, kedy je výroba vyššia ako zaťaženie, čo by pri inštalácii nových distribuovaných zdrojov mohlo ešte viac navýšiť vyrábanú energiu, čím by mohli vzniknúť už spomínané nežiaduce vplyvy. Hodnota výroby a spotreby v elektrizačnej sústave SR sa každým rokom viac vyrovnáva, pričom inštalácia nových distribuovaných zdrojov by mohla obrátiť terajšiu situáciu a z regulačnej oblasti importujúcej elektrinu sa stane regulačná oblasť exportujúca elektrinu.

V práci sú podrobnejšie analyzované systémové vplyvy, z ktorých sú vyhodnotené kritériá potrebné pri vytváraní metodík. Navýšenie distribuovaných zdrojov môže zapríčiniť zvýšenie exportovanej elektriny (spolu s tranzitom navýšenie tokov energie prenosovou sústavou), čím sa zvýšia zaťaženia cezhraničných vedení, kedy sa môže vyskytnúť problém s nedodržaním bezpečnostného kritéria n-1 na týchto vedeniach. Tok výkonu je najväčší (viac ako dvojnásobný) v smere z profilu Česká republika do SR a z SR do profilu Maďarsko oproti tokom výkonov z profilu Poľsko do SR a z SR do profilu Ukrajina. Z analýzy tranzitu cez regulačnú oblasť SR je spracovaná pravdepodobnostná analýza výskytu hodnoty v stanovených intervalov tranzitu počas konkrétnych intervalov zaťaženia a konkrétnych intervalov výroby v RO SR. Na základe zanalyzovanej pravdepodobnosti výskytu sú identifikované maximá a minimá jednotlivých prevádzkových stavov siete, ktoré sú naďalej použité pri vytváraní scenárov použitých v metodikách.

Taktiež výrazné zvýšenie objemu distribuovanej výroby v jednotlivých uzlových oblastiach SR môže mať vplyv na tok výkonov a zaťaženie prenosových transformátorov nadlimitné hodnoty. Môže dôjsť k zmene tokov (z nižšej napäťovej hladiny na vyššiu), čo je aj znázornené na meraní, ktoré znázorňuje Obr. 1. Počas letnej prevádzky (počas dňa) je tok výkonu opačný, pretože do danej stanice je vyvedený veľký výkon z FVE (viac výkonu je v danom mieste a momente vyrábaného ako spotrebovaného). Opačný tok výkonov môže mať vplyv na zaťažovanie ostatných prvkov PS (vnútroštátne, cezhraničné vedenia). Ďalší problém môže vzniknúť pri výpadku niektorého vnútroštátneho prenosového vedenia, kedy môže tok výkonov smerovať cez distribučnú sústavu a tým cez prenosové transformátory, ktoré nemusia spĺňať bezpečnostné kritérium n-1. Inštalácia nových distribuovaných zdrojov a tým odľahčovanie prenosových transformátorov môže taktiež spôsobovať zvyšovanie napätia na prenosovej strane transformátora.

Z analýzy dodávky regulačnej elektriny má inštalácia nových ťažko predikovateľných distribuovaných zdrojov vplyv na podporné služby, najmä na sekundárnu reguláciu výkonu a terciálnu desaťminútovú reguláciu výkonu. Na základe analyzovaných vplyvov sú vyhodnotené kritériá, ktoré vplývajú na veľkosť maximálnej DV, pričom sú jednotlivé kritériá kontrolované pri jednotlivých simuláciách.

V práci sú navrhnuté dve metodiky. Obe metodiky vychádzajú z namodelovanej siete pre každý scenár samostatne, ktoré sú následne simulované na základe spracovaných kritérií, ktoré slúžia ako limitné hodnoty pre testované scenáre. Po zrealizovaní oboch metodík sú dosiahnuté odsimulované výsledky.

Najskôr je na základe postupov stanovené maximálne množstvo DV pripájanej do jednotlivých uzlových oblastí v RO, spolu 2569 MW. Po odsimulovaní scenárov podľa metodiky stanovenia maximálneho objemu distribuovanej výroby je táto hodnota dosiahnutá v scenároch č. 4, č. 7 a č. 8. Tieto scenáre reprezentujú najvhodnejšie podmienky pre pripájanie DV (Scenáre s minimálnym tranzitom, maximálnym, prípadne priemerným zaťažením a minimálnou, prípadne priemernou výrobou. S touto maximálnou hodnotou DV dochádza k problémom udržania napätia v stanovených limitoch, bolo potrebné kompenzovať napätie siete (znížiť ho pomocou kompenzačných prostriedkov v PS uzloch). Pripájaním ešte vyššej hodnoty DV by dochádzalo k destabilizácii sústavy.

Druhá metodika stanovuje optimálny objem distribuovanej výroby rozdelený podľa technológie výroby elektriny do všetkých UO, maximálne však do hodnoty získanej podľa analýzy SEB. Pri simuláciách dochádza k zvýšeným napäťovým pomeroch a k problému zabezpečiť dostatočné množstvo podporných služieb samozrejme ak by táto množina DV bola z ťažko predikovatelných distribuovaných zdrojov. Scenáre č. 20, č. 21 a č. 24 vyšli ako najmenej vhodné prevádzkové stavy siete pre pripájanie DV. V týchto scenároch nie je možné pripojiť žiadne nové DZ. Na základe týchto simulácií pravdepodobne už v dnešnej dobe dochádza k prevádzkovaniu ES nad dovolené hodnoty zaťaženia prenosových medzištátnych vedení pri zvýšených hodnotách tranzitu, ku ktorým dochádza počas roka s pravdepodobnosťou 0,32 %. Pribúdajúcou DV by táto pravdepodobnosť výskytu problémových situácií vzrástla, čo by mohlo zapríčiniť značnú destabilizáciu sústavy.

Aj na základe vyššie uvedených dôvodov nie je príliš vhodné pripájanie veľkého množstva nových DZ, minimálne do doby kedy budú dostavané nové cezhraničné vedenia do Maďarska, čo aspoň čiastočne odľahčí vedenia od vysokých tranzitných tokov. Doposiaľ sa pri navrhovaní metodík uplatňovali najmä deterministické prístupy, a preto je dôležité uviesť, že jednotlivé výsledky zahŕňajú pravdepodobnostný prístup hodnotenia technických parametrov sústavy, na základe čoho sú výsledky reálnejšie (pravdepodobnejšie).

Literatúra

- [1] HVIŽDOŠ, M. Podmienky pre pripojenie decentralizovaných zdrojov elektriny do distribučnej sústavy z hľadiska chránenia. International scientific and Professional journal on electrical engineering Elektroenergetika - Vol. 5, No. 2, 2012, ISSN 1337-6756.
- [2] Zákon č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov z 19. júna 2009 (Zmeny: zákony č. 492/2010 Z. z., č. 558/2010 Z. z., č. 136/2011 Z. z., č. 189/2012 Z. z., č. 373/2012 Z. z., č. 30/2013 Z. z., č. 218/2013 Z. z., č. 382/2013 Z. z.) Dostupné na internete: <http://jaspi.justice.gov.sk/jaspiw1/htm_zak/jaspiw_mini_zak_zobraz_clanok1.asp?kotva=k1&skupina=1>.
- [3] ZHIJIA, W., LIANG, H., XU, C., JIEQIONG, H. Method for short-term photovoltaic generation power prediction base on weather patterns, Publikované v: Electricity Distribution (CICED), 2014 China International Conference, Shenzhen, IEEE, S:213-215
- [4] Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s., (SEPS, a. s.). Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidiel prevádzkovania prenosovej sústavy, platné od júla 2014. Zdroj obsahuje: Dokument A, B, C, D, E, F. Dostupné na stránke. <<http://www.sepsas.sk/seps/TechPod.asp?kod=281>>
- [5] Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s., (SEPS, a. s.). Údaje o prevádzke. Dostupné na internete: <http://sepsas.sk/seps/ÚdajePrevadzkaDenne.asp?Kod=416>>
- [6] Rokovanie vlády Slovenskej republiky. Návrh stratégie energetickej bezpečnosti SR, 2008, Dostupné na internete: <<http://www.rokovania.sk/Rokovanie.aspx/BodRokovaniaDetail?idMaterial=14372>>
- [7] Technické podmienky výroby a rozvodu elektrickej energie. Dostupné na internete: <http://www.webareal.sk/fotky4725/kurzy/Technicke_podmienky_1.pdf>
- [8] FÁBER, A., A KOL. Atlas obnoviteľných zdrojov energie na slovensku, Energetické centrum Bratislava, 2012. ISBN 978-80-969646-2-8
- [9] Slovenské elektrárne, a. s., Technické informácie o elektrárnach. Dostupné na internete: <<http://www.seas.sk/elektrarne/>>
- [10] Ministerstvo životného prostredia, Koncepcia využitia hydroenergetického potenciálu vodných tokov SR do roku 2030. Dostupné na internete: <<http://www.minzp.sk/files/sekcia-vod/vlastny-material-pdf-387-kb.pdf>>
- [11] Smernica európskeho parlamentu a rady 2009/28/ES z 23. apríla 2009 o podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov energie a o zmene a doplnení a následnom zrušení smerníc 2001/77/ES a 2003/30/E Dostupné na internete: <<http://www.economy.gov.sk/smernica-c-2009-28-es-zo-dna-23-aprila-2009-o-podpore-vyuzivania-energie-z-oze/130393s>>.
- [12] Národný akčný plán pre energiu z obnoviteľných zdrojov. Ministerstvo hospodárstva a výstavby SR, 6.10. 2010., Dostupný na internete: <<http://www.economy.gov.sk/narodny-akcny-plan-pre-energiu-z-obnovitelnych-zdrojov/135436s>>
- [13] REVÁKOVÁ, D., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž., Prechodné javy v elektrizačných sústavách, 2008, STU v BA, ISBN 978-80-227-2868-3
- [14] Energoforum, Slovník pre elektrinu. Dostupné na internete: <http://www.energoforum.sk/sk/energetika/slovník-pre-elektrinu>
- [15] Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s., (SEPS, a. s.). Požiadavky na PpS pre rok 2013. Dostupné na internete: <http://sepsas.sk/seps/PoziadavkyPpS_na_2015.asp?kod=582>
- [16] CLEVELAND, M.F. IEC 61850-7-420 communications standard for distributed energy resources (DER). Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, 2008, s: 1 – 4, ISBN 978-1-4244-1905-0.
- [17] Zelená domácnostiam – podpora využívania obnoviteľných zdrojov energie v domácnostiach. Stav čerpania. Dostupné na internete: <<http://zelenadomacnostiam.sk/sk/domacnosti/stav-čerpania>>
- [18] CITYPLAN spol. s r. o., Využití potenciálu decentralizované výroby tepla a elektiny v kogeneraci., 2008, Dostupné na internete: <<http://docplayer.cz/6276901-Vyuziti-potencialu-decentralizovane-vyroby-tepla-a-elektiny-v-kogeneraci.html>>

Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [1] CINTULA, Boris - KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton. Concept of distributed generation. In Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 65-69. ISBN 978-80-89402-73-1.
- [2] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton. Theoretical analysis of distributed sources. In ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, [6] p. ISBN 978-80-227-4171-2.
- [3] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - HERETÍK, Pavol. Sources of reactive power and its compensation in photovoltaic power. In Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 181-184. ISBN 978-80-89402-73-1.
- [4] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - HERETÍK, Pavol - VOLČKO, Vladimír. Connection of distributed resources to the distribution system and their impact on the power system. In Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 95-99. ISBN 978-80-89402-73-1.
- [5] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - IVANIČ, Marián. Systemic impact of distributed sources on power system. In ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4358-7.
- [6] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik. Reactive power regulation in photovoltaic power plants from the view of voltage in the distribution network. In Elektroenergetika 2015 [elektronický zdroj] : 8th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovakia. September 16-18, 2015. Košice : Technical University of Košice, 2015, CD-ROM, S. 488-491. ISBN 978-80-553-2187-5.
- [7] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - IVANIČ, Marián. Impact of distributed sources on safety operation of power system. In Elektroenergetika 2015 [elektronický zdroj] : 8th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovakia. September 16-18, 2015. Košice : Technical University of Košice, 2015, CD-ROM, S. 492-495. ISBN 978-80-553-2187-5.
- [8] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - IVANIČ, Marián. Design methodology of verification the optimum volume of distributed generation. In Power engineering 2016. Renewable Energy Sources 2016 : 6th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, S. 83-89. ISBN 978-80-89402-82-3.
- [9] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - IVANIČ, Marián. Design procedure of verification the maximum power of distributed sources in regulatory area. In ELITECH'16 [elektronický zdroj] : 18th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4561-1.

Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

- [1] KONÍČEK, Michal - CINTULA, Boris. Theoretical analysis of generation and compensation of reactive power in photovoltaic power plants. In Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. Tom 6, no. 2 (2016), s. 38-41. ISSN 2083-0157.