

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 751

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. František Bernáth

**Rozptýlená výroba
a jej vplyv na kvalitu dodávok
elektrickej energie**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

Ing. František Bernáth

**ROZPTÝLENÁ VÝROBA A JEJ VPLYV
NA KVALITU DODÁVOK ELEKTRICKEJ ENERGIE**

DISTRIBUTED GENERATION AND ITS INFLUENCE
ON POWER QUALITY

Skrátená verzia Ph.D. Thesis

Obor: Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika
Školiteľ: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
Oponenti: prof. Ing. Pavel Santarius, CSc.
doc. Ing. Peter Bracíník, Ph.D.
Dátum obhajoby: 16. júna 2014

Kľúčové slová

Lokálne a systémové vplyvy rozptýlených zdrojov elektrickej energie, obnoviteľné zdroje energie, Pravidlá prevádzkovania distribučnej sústavy, výkonová bilancia, kvalita elektrickej energie, kompenzácia účinníku, riadenie jalového výkonu

Keywords

Local and Systemic Influences of Dispersed Power Sources; Regenerative Sources of Energy; Rules of Operation of the Power Distribution System; Power Balance; Power Quality; Power Factor Compensation; Reactive Power Control

Práca je k dispozícii

na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,
Technická 10, Brno, 602 00.

© František Bernáth, 2014

ISBN 978-80-214-5001-1

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
3	VPLYV ROZPTÝLENEJ VÝROBY NA SIEŤOVÉ NAPÄTIE	6
4	ROZDELENIE OPATRENÍ PRE ELIMINÁCIU VPLYVU ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV NA NAPÄTIE	7
5	DISPEČERSKÉ RIADENIE JALOVÉHO VÝKONU ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV	7
5.1	Technické možnosti riešenia dispečerského riadenia účinníku FVE	8
6	MODELOVANIE SÚSTAVY S ROZPTÝLENÝMI ZDROJMI Z HĽADISKA ICH VPLYVU NA NAPÄTIE	9
6.1	Vplyv FVE ($\cos \varphi = 1$) na zmenu napätia	11
6.2	Vplyv FVE so zadanou hodnotou účinníku $\cos \varphi = 0,95$ na zmenu napätia	12
6.3	Vplyv FVE so zadanou hodnotou jalového výkonu na zmenu napätia	14
6.4	Zhodnotenie výberu stratégie riadenia jalového výkonu zdrojov na základe matematického modelovania sústavy	15
7	SPÔSOBY RIADENIA NAPÄTIA V DS PODĽA STUPŇA VYUŽITIA NADRADENÉHO RIADIACEHO SYSTÉMU	18
7.1	Lokálna forma riadenia napätia	18
7.2	Decentralizovaná forma riadenia napätia	19
7.3	Centralizovaná forma riadenia napätia	20
8	NAVRHOVANÉ OPATRENIA PRE RIEŠENIE AKTUÁLNYCH PROBLÉMOV A ROZVOJA SYSTÉMU REGULÁCIE NAPÄTIA V DS S RASTÚCIM ZASTÚPENÍM ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV	21
8.1	Zapojenie dodatočne inštalovaných jednotiek dispečerského riadenia jalového (resp. činného) výkonu do systému spätnoväzobnej regulácie napätia v mieste pripojenia	21
8.2	Dynamické riadenie odbočky transformátora 110/22kV podľa diagramu výroby rozptýlených zdrojov a diagramu zaťaženia DS	21
8.3	Inštalácia distribučných transformátorov s možnosťou zmeny nastavenia odbočky počas zaťaženia	22
8.4	Budovanie decentralizovanej architektúry regulácie napätí v DS	22
9	ZÁVER	26
9.1	Súčasný stav	26
9.2	Navrhované opatrenia	26
9.2.1	Úprava spôsobu riadenia jalového výkonu rozptýlených zdrojov	26
9.2.2	Dynamické riadenie napätia odbočkovým transformátorom	27
9.2.3	Zapojenie regulačných nástrojov do decentralizovanej architektúry regulácie napätia v DS	27
9.3	Význam a využitie dosiahnutých výsledkov	27

1 ÚVOD

Práca sa zameriava na oblasť vplyvov rozptýlených zdrojov na kvalitu napätia. Lokálne vplyvy sú kľúčovým bodom rozvoja smerom k decentralizovanej energetike. Orientácia na lokálne vplyvy je umocnená profesijným zameraním autora, ktorý v pracovnej oblasti rieši problémy s kvalitou napätia vo firme Befra elektro servis. Tematicky sa venuje problematike kompenzácie účinníka a jalového výkonu (vrátane kompenzácie rozptýlených zdrojov elektrickej energie).

Dôraz práce je kladený na tému udržiavania napätia v predpísaných limitoch, ktorá sa ukazuje ako najpálčivejší problém z lokálnych vplyvov. Podľa základných elektrotechnických zákonov dochádza v okolí výroby k zvýšeniu napätia, čo môže mať za následok nedodržanie napäťových koridorov stanovených normou kvality napätia (ČSN EN 50160) nielen v mieste pripojenia zdroja, ale takisto v bodoch pripojenia ostatných koncových zákazníkov DS. Zmeny napätia sú spriahnuté s nepredikovateľnou výrobou a prejavujú sa teda v rytme časového diagramu výroby. Práca analyzuje možné aparáty riešenia problému. V rámci ekonomicky a technicky optimálneho riešenia sú predstavené nástroje riadenia jalového výkonu zdrojov a dynamického riadenia napätia transformátorom s možnosťou zmeny nastavenia odbočky počas zaťaženia. Tieto nástroje pri aktuálnom spôsobe prevádzkovania nenapĺňajú svoj potenciál, z čoho pramenia podnety pre ich efektívnejšie prevádzkovanie. Návrhový proces vychádza z matematického modelovania reálnej časti DS s vysokým zastúpením FVE.

Vplyvy rozptýlených zdrojov súvisia s tým, že transformácia smerom k decentralizovanej energetike mení celkovú štruktúru fungovania ES, pre ktorú bol charakteristický jednosmerný tok výkonu od centrálnych výrobných blokov k spotrebičom. Pôvodná forma prevádzkovania sústavy je z pohľadu riadenia napäťových pomerov zvládnutá na dostatočnej úrovni, avšak výraznejší pokrok na úrovni decentralizovanej výroby (najmä výroby s nepredikovateľnou dodávkou) musí byť spojený s rozvojom prevádzkovania DS.

V práci navrhované opatrenia sa snažia byť systémové a ekonomicky efektívne pre konkurencieschopnú energetiku. Práve vytýčenie optimálnej formy rozvoja a prevádzkovania systému regulácie napätia v DS je cieľom tejto dizertačnej práce.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ciele dizertačnej práce boli vytýčené nasledovne:

- 1) Analýza súčasných problémov na úrovni lokálnych vplyvov, ku ktorým dochádza pri pripojovaní rozptýlených zdrojov.
 - 2) Analýza a návrh individuálnych nástrojov pre elimináciu problémov (s dôrazom na prostriedky eliminácie vplyvu rozptýlených zdrojov na sieťové napätie).
- Problém prekračovania predpísaného koridoru napätia je možné riešiť niekoľkými spôsobmi.

Nasledovné nástroje riešenia sú pritom uvážené:

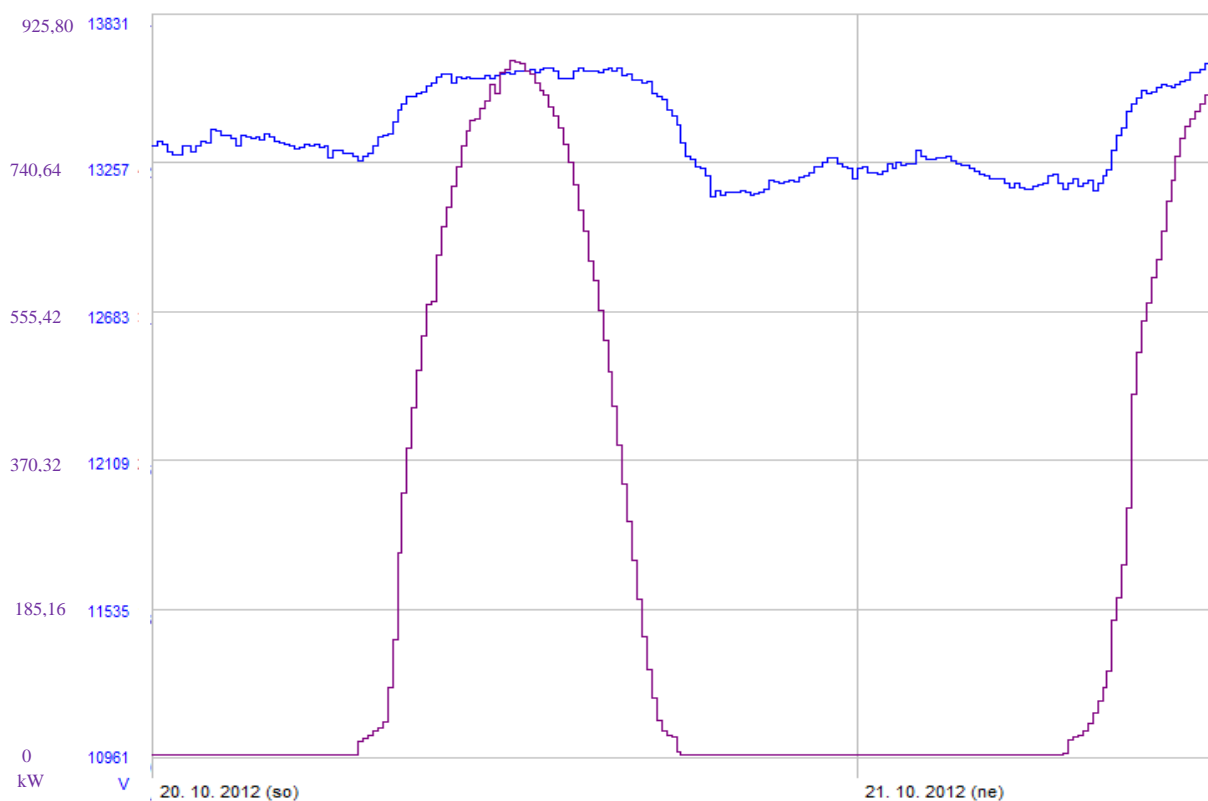
- Dynamické riadenie úrovne napätia prostredníctvom transformátorov s nastaviteľnou odbočkou počas zaťaženia podľa podmienok v DS.
- Dispečerské riadenie jalového (resp. činného) výkonu zdrojov. Súčasný spôsob prevádzkovania týchto zariadení nenapĺňa svoj potenciál, preto potrebné prehodnotiť využitie iných stratégií riadenia jalového výkonu ako je súčasné riadenie podľa zadanej hodnoty účinníku. Pre tieto účely je nutné využiť matematické modelovanie chovania častí DS z hľadiska napätia.

3) Návrh úpravy systému regulácie napätia v DS pre potreby zapojenia analyzovaných regulačných nástrojov.

Adaptácia regulačných nástrojov musí byť systémová, aby sa dosiahol súlad s predpísaným koridorom napätí v celej uzlovej oblasti (UO) a boli pritom efektívnym spôsobom využité dostupné regulačné nástroje pre minimalizáciu požiadaviek na posilňovanie, resp. rekonštrukciu siete.

3 VPLYV ROZPTÝLENEJ VÝROBY NA SIEŤOVÉ NAPÄTIE

Konkrétny prípad zvýšenia napätia v bode pripojenia je predstavený na *obr. 1*. Jedná sa o meranie v odovzdávacom bode FVE 1MW pripojenej do DS 22kV.



Obr. 1: Denný priebeh fázového napätia vplyvom výroby z FVE 1MW

Úroveň napät'ovej zmeny vplyvom výroby rozptýlených zdrojov je teda určená impedanciou vedení a káblov (skratová impedancia v mieste pripojenia) a časovou

závislosťou výkonov (činného, jalového) výroby zdroja. Kľúčovú úlohu pritom zohráva nepredikovateľnosť výroby z fotovoltických a veterných elektrární.

Okrem týchto faktorov sa na úrovni nárastu napätia čiastočne podieľajú aj výkonové toky určené spotrebou v lokalite pripojeného zdroja.

Obr. 1 vypovedá o tom, prečo má prevádzkovateľ DS náročnú úlohu udržiavať napätie v predpísaných limitoch. Keďže sa zmeny prejavujú v rytmoch denného diagramu výroby zdroja, prepínanie odbočky distribučného transformátora VN/NN nie je aplikovateľné (inštalované distribučné transformátory umožňujú prepínanie odbočky len pri vypnutom stave).

Nárast napätia v lokalite pripojenia zdrojov spôsobuje v mnohých prípadoch prepätie, a však plošné zníženie úrovne napätia kontrolného bodu by mohlo spôsobiť podpätie inej skupine koncových zákazníkov. Preto je potrebné riešenie dynamickými aparátmi, ktoré sú súčasťou nasledujúcej kapitoly.

4 ROZDELENIE OPATRENÍ PRE ELIMINÁCIU VPLYVU ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV NA NAPÄTIE

Aktuálny problém prekračovania garantovaných štandardov kvality napätia (ČSN EN 50160) spôsobený vysokým zastúpením FVE v sieťach VN, NN vníma PDS, ktorý má náročnejšiu (a niekedy nemožnú) pozíciu kontinuálne poskytovať elektrickú energiu s predpísanými parametrami kvality napätia, na ktorú majú koncoví zákazníci právny nárok. PDS je preto nútený reagovať na problém s nedovolenými odchýlkami napätia. Všeobecne sa možnosti riešenia uvedeného problému dajú rozdeliť nasledovne:

- Opatrenia v režii PDS,
 - posilňovanie prvkov siete – znižovanie skratovej impedancie,
 - regulácia napätia odbočkovými transformátormi (zmena nastavenia odbočky transformátora počas zaťaženia),
- Opatrenia v režii prevádzkovateľov výrobní,
 - dispečerské riadenie jalového výkonu zdroja.

V súlade s logickým postojom, aby problém riešil ten, kto ho spôsobuje, sa ako primárne riešenie považuje druhá varianta – povinnosť vybaviť rozptýlené zdroje nad 100kWp dispečerským riadením jalového výkonu.

5 DISPEČERSKÉ RIADENIE JALOVÉHO VÝKONU ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV

Dodatočná povinnosť vybaviť zdroje EE nad inštalovaným výkonom 100kWp dispečersky riadenými kompenzačnými zariadeniami je reakciou PDS na zvýšený počet prekročení limitných hodnôt charakteristiky efektívnej hodnoty napätia vyhodnotenej podľa ČSN EN 50 160.

Podľa PPDS je jalový výkon pri výrobe činného výkonu nastavený pevnou hodnotou alebo žiadanou hodnotou. Žiadané veličiny môžu byť nasledovné:

- hodnota zadaného účinníka $\cos \varphi$,
- charakteristika $\cos \varphi = f(P)$,

- zadaná hodnota jalového výkonu Q ,
- zadaná hodnota napätia U ,
- charakteristika $Q = f(U)$.

5.1 TECHNICKÉ MOŽNOSTI RIEŠENIA DISPEČERSKÉHO RIADENIA ÚČINNÍKU FVE

Existuje niekoľko možností riešenia dispečerského riadenia. Premennými parametrami pri voľbe riešenia sú investičné náklady, kvalita regulačného procesu (presnosť a dynamika dosahovania žiadanej hodnoty, resp. charakteristiky) a činné straty kompenzačného zariadenia (prevádzkové náklady). Možnosti sú nasledovné:

Využitie jestvujúcich striedačov

Niektoré typy striedačov zahŕňajú možnosť (alebo možnosť dovybavenia modulom) riadenia výstupného účinníka od určitej hodnoty vyrábaného činného výkonu. Komunikačné rozhranie je obyčajne súčasťou celku. Takéto striedače sú zriedkavým javom s ohľadom na ich vyššie obstarávacie náklady. Prevádzkovanie striedačov v režime riadeného výstupného účinníka spôsobuje dodatočné činné straty, ktorých veľkosť závisí od konkrétneho typu meniča. Všeobecne sú však tieto straty najvyššie v porovnaní s ostatnými riešeniami odberu alebo dodávky jalového výkonu. Takáto forma kompenzácie nie je schopná slúžiť na účely kompenzácie účinníka v prípade spotreby FVE.

Stupňovitá kompenzácia

Stupňovitá kompenzácia je najčastejšie realizovaným riešením z dôvodu optima z hľadiska výšky dodatočnej investície a činných strát pri prevádzkovaní kompenzácie. Zároveň je správne navrhnuté zariadenie schopné vyhovieť požiadavkám PDS na prevádzkové vlastnosti.

Stupňovitá kompenzácia predstavuje súbor kompenzačných stupňov – kapacitných a induktívnych, napojených na spoločné prípojnice kompenzačného rozvádzača. Jednotlivé stupne sú navrhnuté na daný kompenzačný výkon, ktorý je hradený kompenzačnými kondenzátormi a dekompenzačnými tlmivkami. Kompenzačné stupne sú vhodne istené (s ohľadom na spínacie nadprúdy kondenzátorov) a obsahujú kompenzačný stykač (s predstihovými kontaktmi a predradnými odpormi pre tlenie spínacích nadprúdov), ktorý spína kondenzátory alebo tlmivky. Spínanie je automaticky riadené prostredníctvom riadiacej jednotky – regulátoru jalového výkonu (napr.: Novar 1xxx). V prípade dispečersky riadeného účinníka je regulátor prispôbený, t.j. je vybavený komunikačným modulom pre registráciu zmeny zadanej hodnoty. Regulátor je schopný automaticky rozpoznať hodnoty kompenzačného výkonu jednotlivých stupňov. Na základe tejto evidencie a vyhodnocovania výkonových pomerov v reálnom čase (pomocou meracieho transformátoru prúdu, resp. napätia) spína príslušnú kombináciu jednotlivých stupňov tak, aby bola dodržaná zadaná hodnota výsledného účinníka. Sekundárne je výber spínaných stupňov podmienený históriou prevádzky jednotlivých stupňov tak, aby bolo zaistené ich rovnomerné zaťažovanie. Regulátor je nastaviteľný z hľadiska dynamiky regulačného procesu.

Kompenzačný rozvádzač sa z dôvodu minimalizácie nákladov (ako aj z dôvodu minimalizácie spínacích pochodov na úrovni vn) realizuje a pripojuje do napäťovej hladiny NN. Fyzické pripojenie do systému vyvedenia výkonu FVE je realizované priamo na svorky NN strany transformátora alebo na prípojnice NN rozvádzača. Prípojny bod, resp. rozdelenie kompenzačného výkonu na viac prípojných bodov je podmienené samotným riešením FVE. Dodatočne inštalované kompenzačné zariadenie nesmie spôsobiť preťaženie niektorého prvku inštalácie výrobné. Kľúčovými prvkami pri tejto podmienke je menovitý výkon transformátora, resp. menovitý prúd NN rozvádzača.

Hybridná kompenzácia

Ďalšou možnosťou regulácie účinníka je využitie prostriedku statického synchrónneho kompenzátoru v kombinácii so stupňovitou kompenzáciou pre docielenie vysokej regulačnej presnosti a akceptovateľných investičných nákladov.

Kompenzátor je podobne ako stupňovitá kompenzácia, pripojený paralelne k elektrickej sieti. Hlavnou časťou celku je trojfázový napäťový striedač (z IGBT tranzistorov), ktorý udržiava napätie kondenzátora (akumulačný prvok) na požadovanej hodnote. Úbytok napätia na väzobnej indukčnosti je rozdielom absolútnych hodnôt napätia siete a napätia napäťového zdroja.

6 MODELOVANIE SÚSTAVY S ROZPTÝLENÝMI ZDROJMI Z HĽADISKA ICH VPLYVU NA NAPÄTIE

Cieľom tejto kapitoly je overenie vplyvu rozptýlených zdrojov na napätie v DS za pomoci matematického modelovania sústavy.

Modelovanie je realizované v aplikácii Matlab / Simulink / SimPowerSystems, ktorá disponuje knižnicou prvkov ES.

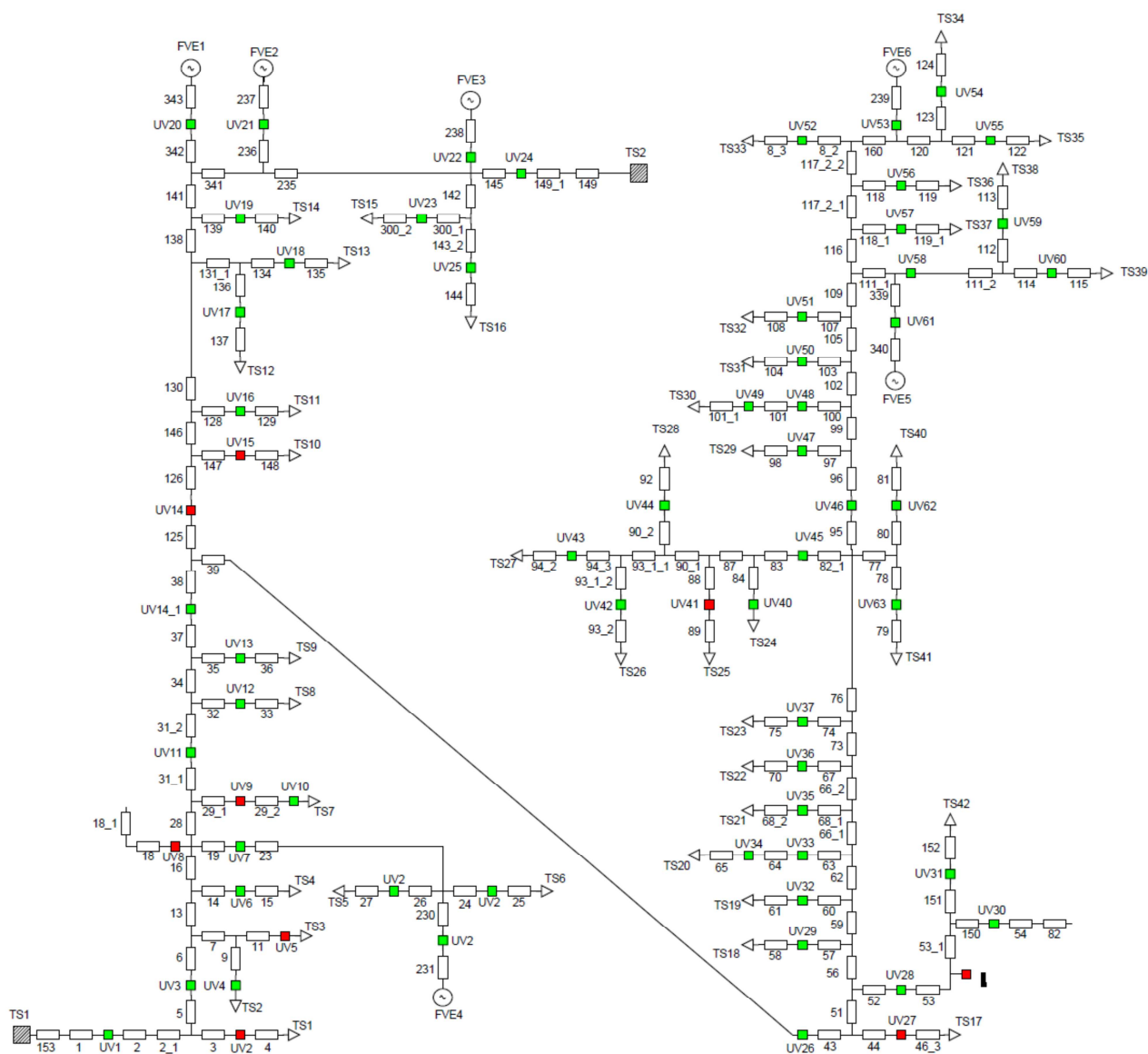
Predmetom skúmania je reálna časť DS, ktorá je s ohľadom na požiadavku poskytovateľa údajov prezentovaná ako slepá mapa DS s konkrétnymi parametrami jej prvkov. Zadanými hodnotami sú skratové výkony v napájacích bodoch (S_K), parametre vedenia (činný odpor R , induktívna reaktancia jX , kapacitná susceptancia jB) a transformátorov (menovitý výkon transformátorov S_{Tn}). Jedná sa o 22kV DS, ktorá je napojená z dvoch napájacích uzlov 110/22kV. Podobne ako väčšina DS, je aj táto prevádzkovaná ako radiálna sieť. Za týmto účelom je spínacím prvkom rozdelená sústava na dve UO podľa *obr. 2*.

V úvodnej fáze modelovania prebieha zapojenie sústavy v sw prostredí tak, aby zodpovedala reálnej schéme. Vedenia sú reprezentované článkami π . Napájacie body zo strany nadradenej siete sú z pohľadu výpočtu ustáleného chodu siete bilančnými uzlami (zadaná konštantná hodnota a uhol napätia U , resp. φ). Odberové distribučné transformátory a pripojené FVE sú reprezentované napájacími alebo odberovými uzlami (zadaná hodnota činného výkonu P a jalového výkonu Q so zodpovedajúcou polaritou pre režimy odberu a dodávky).

V procese modelovania je uvažovaná konštantná hodnota výkonu spotreby. Tento výkon pretekaný cez jednotlivé odberové distribučné transformátory smerom ku koncovým zákazníkom je stanovený na 30% menovitého výkonu

transformátorov. Zdanlivý výkon odberu má účinník $\cos \varphi = 0,95$ ind. Celkový inštalovaný výkon všetkých odberových transformátorov je $\Sigma S_{TN} = 7170\text{kVA}$, z čoho vyplýva, že sa pri výpočte uvažuje s odberom zdanlivého výkonu $\Sigma S_o = 2151\text{kVA}$ ($\Sigma P_o = 2043,45\text{kW}$, $\Sigma Q_o = 671,65\text{kVAr}$).

Celkovo je do DS pripojených 6 FVE so sumárnym inštalovaným výkonom $\Sigma P_{iFVE} = 8369\text{MW}$. Modelovanie predpokladá geografickú blízkosť zdrojov, čo ústi do súdobnosti jednotlivých FVE. Pri výpočte ustáleného chodu teda vyrábali jednotlivé FVE činný výkon s rovnakým percentuálnym podielom vo vzťahu k ich inštalovanému výkonu ako ostatné zdroje zahrnuté do DS. Výkony pripojených FVE sú premenlivé, aby demonštrovali svoj vplyv na napätie pri rozličných prevádzkových režimoch.

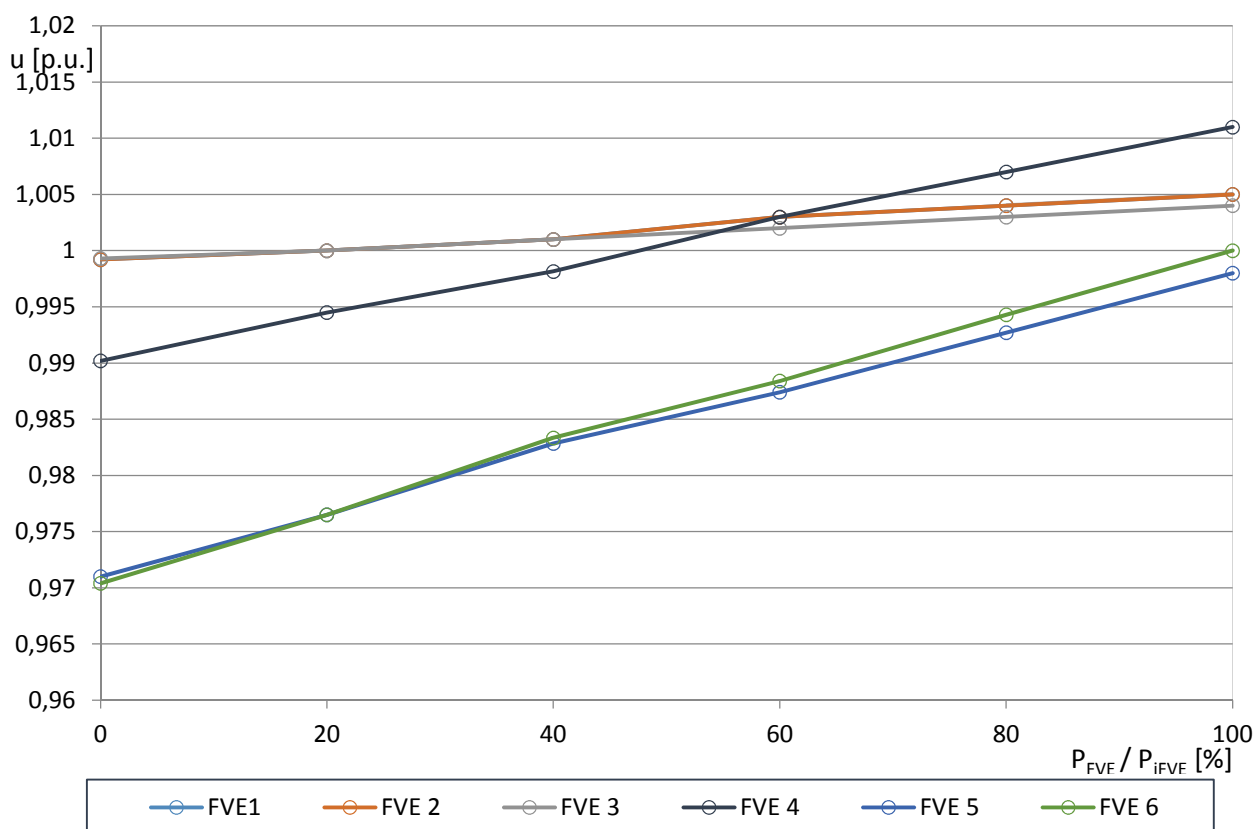


Obr. 2: Schéma modelovanej DS

Modelovanie bolo realizované v niekoľkých etapách a postupne riešilo nasledovné úlohy.

- Vplyv FVE s účinníkom rovným 1 na napätie, výstupom je priebeh napätia v závislosti na dodávke činného výkonu v bode pripojenia FVE (PU krivka).
- Vplyv FVE na napätie, ak je jalový výkon FVE daný hodnotou účinníka. Uvažovali sa prípady: $\cos \varphi_1 = 0,95_{ind}$, $\cos \varphi_2 = 0,95_{kap}$.
- Vplyv FVE na napätie pri zadanej konštantnej hodnote jalového výkonu FVE. Uvažoval sa indukčný a kapacitný jalový výkon s hodnotou, ktorá prislúcha stavu maxima výkonu výroby P_i a účinníku $\cos \varphi = 0,95$.

6.1 VPLYV FVE (COS $\Phi = 1$) NA ZMENU NAPÄTIA



Obr. 3: Priebehy napätia v bode pripojenia FVE v závislosti na výkone FVE

Priebehy vykazujú takmer lineárnu závislosť napätia na výkone FVE. Charakteristiky FVE1 a FVE2 sú totožné. Podľa Tab. 1 je zrejmé, že až 3 FVE nespĺňajú povolenú hodnotu (2%) trvalej zmeny napätia vplyvom svojej prevádzky.

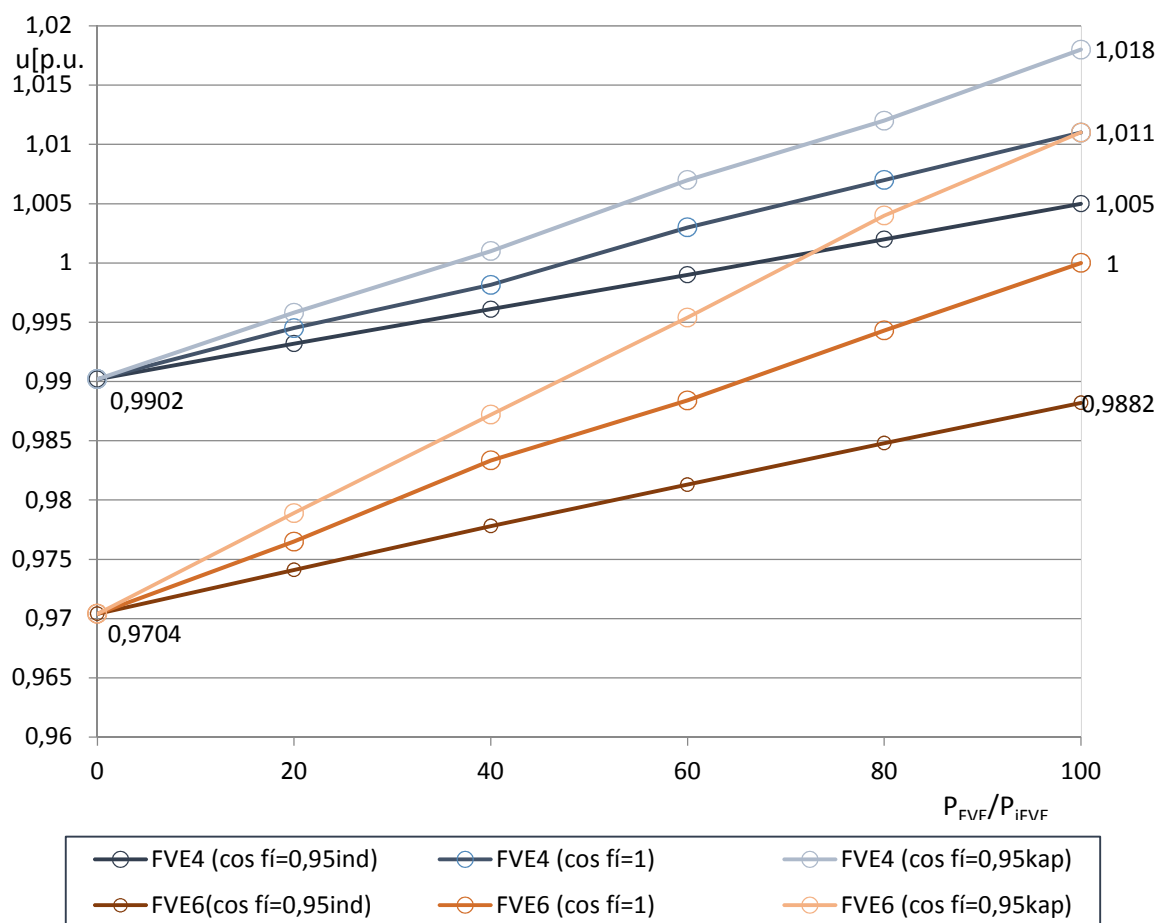
Tab. 1: Vplyv FVE na zmenu napätia v bode pripojenia

Relatívny nárast napätia vplyvom prevádzky FVE 1 až 6						
	FVE1	FVE2	FVE3	FVE4	FVE5	FVE6
P_{iFVE} (MW)	0,99	0,99	0,99	3,8	0,6	0,99
u_1 (p.u.)	0,9992	0,9992	0,9993	0,9902	0,9710	0,9704
u_2 (p.u.)	1,0050	1,0050	1,0040	1,0110	0,9980	1,0000
Δu (%)	0,58	0,58	0,47	2,08	2,7	2,96

S veľkou pravdepodobnosťou, pripojovacia štúdia nepočítala s kumulatívnym vplyvom ostatných FVE. Tak je to najmä v prípade FVE5 a FVE6, kde elektrická blízkosť zdrojov a vzájomná súdobosť zosilňujú mieru nárastu napätia. Ďalším kľúčovým faktorom je relatívne nízka hodnota skratového výkonu, keďže sú uvedené FVE pripojené do vzdialenej časti radiálnej siete. FVE4 sa síce nachádza relatívne blízko nadradenej sústavy (vysoká hodnota skratového výkonu), avšak inštalovaný výkon 3,8MW je dominantný. FVE1 až FVE3 sú pripojené do inej UO.

Uvedená časť modelovania sústavy potvrdzuje mechanizmus vplyvu distribuovanej výroby na napätie v mieste pripojenia. Ďalšia časť modelovania sa zameriava na aparát pre elimináciu neprimeraného nárastu napätia v podobe dispečerského riadenia jalového výkonu. Riadiť jalový výkon je možné podľa niekoľkých stratégií. Najprv sa práca orientuje na najčastejšie žiadanú stratégiu riadenia jalového výkonu podľa zadanej hodnoty účinníku.

6.2 VPLYV FVE SO ZADANOU HODNOTOU ÚČINNÍKU $\cos \Phi=0,95$ NA ZMENU NAPÄTIA



Obr. 4: Priebeh napätia v bode pripojenia FVE pre rozličné hodnoty účinníku

Charakteristiky napätia na obr. 4 sa týkajú FVE4, FVE6. Potvrdzujú skutočnosť, že kapacitný režim výroby zosilňuje nárast napätia v závislosti na miere činného výkonu a induktívny režim eliminuje nárast napätia. Nasledujúca Tab. 2 kvantifikuje

mieru zmeny napätia pri prevádzkovom bode FVE s maximálnym činným výkonom v porovnaní so stavom nevýroby.

Tab. 2: Vplyv FVE na zmenu napätia v bode pripojenia pri rôznych účinníkoch

Relatívny nárast napätia vplyvom prevádzky FVE 4, FVE 6						
	FVE4	FVE4	FVE4	FVE6	FVE6	FVE6
P_{iFVE} (MW)	3,8	3,8	3,8	0,99	0,99	0,99
$\cos \varphi$	1	0,95 _{ind}	0,95 _{kap}	1	0,95 _{ind}	0,95 _{kap}
u_1 (p.u.)	0,9902	0,9902	0,9902	0,9704	0,9704	0,9704
u_2 (p.u.)	1,0110	1,0050	1,0180	1,0000	0,9882	1,0110
Δu (%)	2,08	1,48	2,78	2,96	1,78	4,06

V porovnaní so stavom $\cos \varphi = 1$ je miera vplyvu jalového výkonu na napätie vyjadrená prostredníctvom tab. 3.

Tab. 3: Percentuálny vplyv jalového výkonu na zmenu napätia pri rôznych účinníkoch

Relatívna zmena nárastu napätia v porovnaní s referenčným stavom $\cos \varphi = 1$						
	FVE4	FVE4	FVE4	FVE6	FVE6	FVE6
$\cos \varphi$	1	0,95 _{ind}	0,95 _{kap}	1	0,95 _{ind}	0,95 _{kap}
$(\Delta u_2 - \Delta u_1) / \Delta u_1$ (%)	0,00	-28,35	33,65	0,00	-39,86	37,16

Tab. 3 je možné interpretovať nasledovne. V prípade, že FVE6 bude vyrábať na hranici inštalovaného výkonu, bude pomerná hodnota napätia u_2 (p.u.) = 1,00 (v kombinácii so súdobým diagramom výroby ostatných FVE, ktoré sú zapojené do DS), pričom iniciálna hodnota je 0,9704. Z toho vyplýva percentuálny nárast napätia vplyvom FVE o 2,96%, čo nie je v súlade s požadovanou hodnotou trvalej zmeny napätia vplyvom výroby z rozptýlených zdrojov (podmienka pripojiteľnosti podľa PPDS). Ak dispečing zadá žiadanú hodnotu účinníka $\cos \varphi = 0,95_{ind}$, bude hodnota napätia (pri maximálnej výrobe FVE) $u_2 = 0,9882$ (p.u.). V porovnaní s finálnou hodnotou $u_2 = 1,00$ (referenčná hodnota) je to zníženie o 39,86%.

Riadenie podľa zadanej hodnoty účinníka má v induktívnom režime pozitívny vplyv na napätie. V napäťovej hladine VN 22kV je dosah na elimináciu nárastu napätia závislý na uhle skratovej impedancie (pomer $R_k : X_k \approx 1 : 1,5$ až $2,5$). Percentuálny pokles iniciálneho nárastu tvoril v konkrétnom modelovaní 25 až 40%.

Riadenie podľa zadaného účinníka je doprednou formou riadenia, ktorá predpokladá pozitívny vplyv na napätie, na druhej strane však nereflektuje aktuálnu hodnotu napätia v mieste pripojenia. Na obhajobu tejto regulačnej stratégie je nutné podotknúť, že eliminuje vlastný vplyv FVE na napätie (v induktívnom režime), čo je hlavnou príčinou, prečo je táto stratégia riadenia prevládajúcou v doterajších inštaláciách.

Taktiež je nezanedbateľná otázka strát. Jednak na úrovni samotnej dekompenzačnej tlmivky, kde príkladový výkon 328kVAr ($P_{iFVE} = 1\text{MW}$) spôsobuje činný odber (straty) zhruba 15 až 20kW. O taký výkon je ponížený vyrábaný činný výkon v bode maxima výroby. Tieto straty hradí prevádzkovateľ elektrárne. Na

druhej strane dochádza k dodatočným stratám v DS pri zvýšenom prenose jalového výkonu (kvantifikované v *tab. 4*), čo je ekonomicky nepriaznivé pre PDS, ktorý sa snaží o skresanie prevádzkových nákladov na čo najnižšiu úroveň pri udržaní požadovaných vlastností kvality dodávok EE.

Tab. 4: Činné straty v modelovanej DS pri rôznych prevádzkových režimoch

Činné straty v modelovanej DS pri $P_{FVE} = 0\%$ z P_{iFVE}	[kW]	43
Činné straty v modelovanej DS pri $P_{FVE} = 100\%$ z P_{iFVE} a $\cos \phi = 1$	[kW]	81
Činné straty v modelovanej DS pri $P_{FVE} = 100\%$ z P_{iFVE} a $\cos \phi = 0,95_{ind}$ (FVE sú spotrebičmi jalového výkonu)	[kW]	113
Činné straty v modelovanej DS pri $P_{FVE} = 100\%$ z P_{iFVE} a $\cos \phi = 0,95_{kap}$ (FVE sú zdrojmi jalového výkonu)	[kW]	87

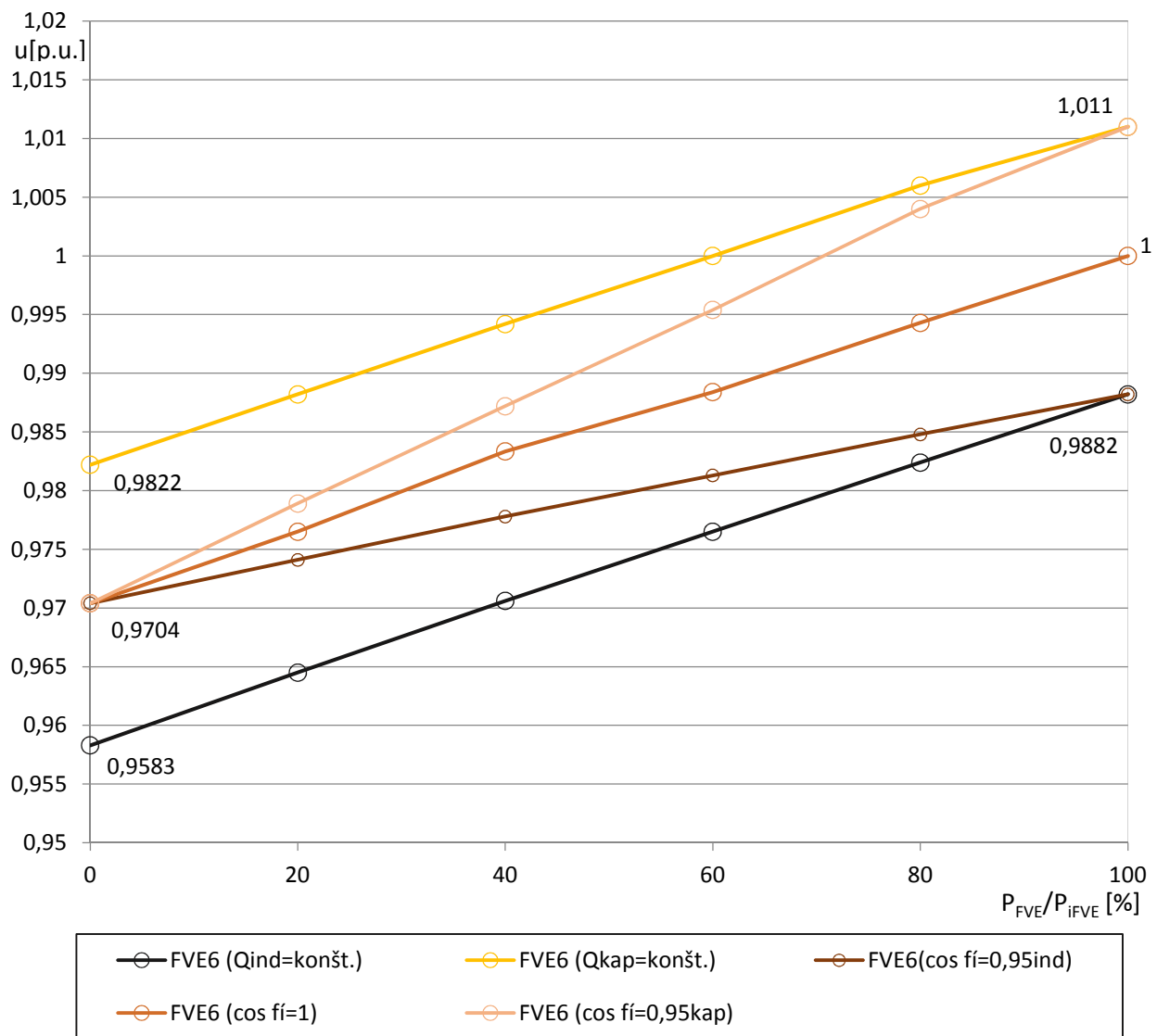
Pôvodné straty modelovanej DS (43kW) sa pri plnom výkone pripojených FVE takmer zdvojnásobia (čo súvisí s tým, že dochádza k otočeniu a navýšeniu výkonového toku v DS). Je jednoznačné, že tento jav nie je v súlade s ideami rozptýlenej výroby. Prevádzkovanie FVE v indukčnom režime s účinníkom $\cos \phi = 0,95$ v tomto prípade znamená navýšenie spotreby jalového výkonu v UO o 2745kVAr (pri maximálnej výrobe FVE), z čoho pramení nárast hodnoty strát z 81kW na 113kW (o 32kW). Táto hodnota strát má krátku dobu trvania, na ktorú vplýva diagram výroby FVE a zadaná hodnota účinníku (znižovanie jalového výkonu pri znižovaní činného výkonu).

6.3 VPLYV FVE SO ZADANOU HODNOTOU JALOVÉHO VÝKONU NA ZMENU NAPÄTIA

Priebehy na *obr. 5* sa ďalej týkajú už len FVE6, keďže chovanie jednotlivých FVE je principiálne rovnaké. Pre modelovanie boli vytýčené dva režimy jalového výkonu – kapacitný a indukčný jalový výkon. Tieto jalové výkony sú nastavené na konštantnú hodnotu bez ohľadu na výkonový diagram FVE. Hodnota je daná pracovným bodom maximálneho činného výkonu FVE pri účinníku $\cos \phi = 0,95$ (napr. pri FVE s $P_{iFVE} = 1\text{MW}$ je hodnota jalového výkonu 328kVAr).

Celkom je na *obr. 5* 5 priebehov. Červený priebeh (prostredný) je základný priebeh napätia pri náraste výkonu FVE ($\cos \phi = 1 = \text{konšt.}$). Odtiene červenej potom reprezentujú priebehy napätia pri FVE s účinníkom $\cos \phi = 0,95 = \text{konšt.}$ (indukčný / kapacitný režim). Žltá a čierna charakteristika reprezentujú samotné priebehy napätia pri zadanej konštantnej hodnote jalového výkonu Q_{kap} , resp. Q_{ind} . V porovnaní so základným priebehom ($\cos \phi = 1 = \text{konšt.}$) sa pri riadení jalového výkonu (podľa požadovanej hodnoty jalového výkonu) jedná o vertikálny posun priebehov.

Konštantná hodnota jalového výkonu teda neeliminuje mieru zmeny napätia.



Obr. 5: Priebehy napätia v bode pripojenia FVE6 pri rozličných prevádzkových režimoch

6.4 ZHODNOTENIE VÝBERU STRATÉGIE RIADENIA JALOVÉHO VÝKONU ZDROJOV NA ZÁKLADE MATEMATICKÉHO MODELOVANIA SÚSTAVY

Voľba jednotnej a vhodnej stratégie riadenia jalového výkonu je kľúčovým bodom pre dosiahnutie žiadaných napäťových pomerov v medziach predpísaných limitov.

Aktuálne využívané riadenie jalového výkonu podľa požadovanej hodnoty účinníka poskytuje možnosť eliminácie nárastu napätia v prípade využitia indukčného režimu činnosti. Miera vplyvu účinníka závisí od uhlu skratovej impedancie v bode pripojenia elektrárne, všeobecne sa táto hodnota v napäťovej hladine VN pohybuje v koridore 25% až 40% zníženia v pomere k iniciálnemu nárastu napätia.

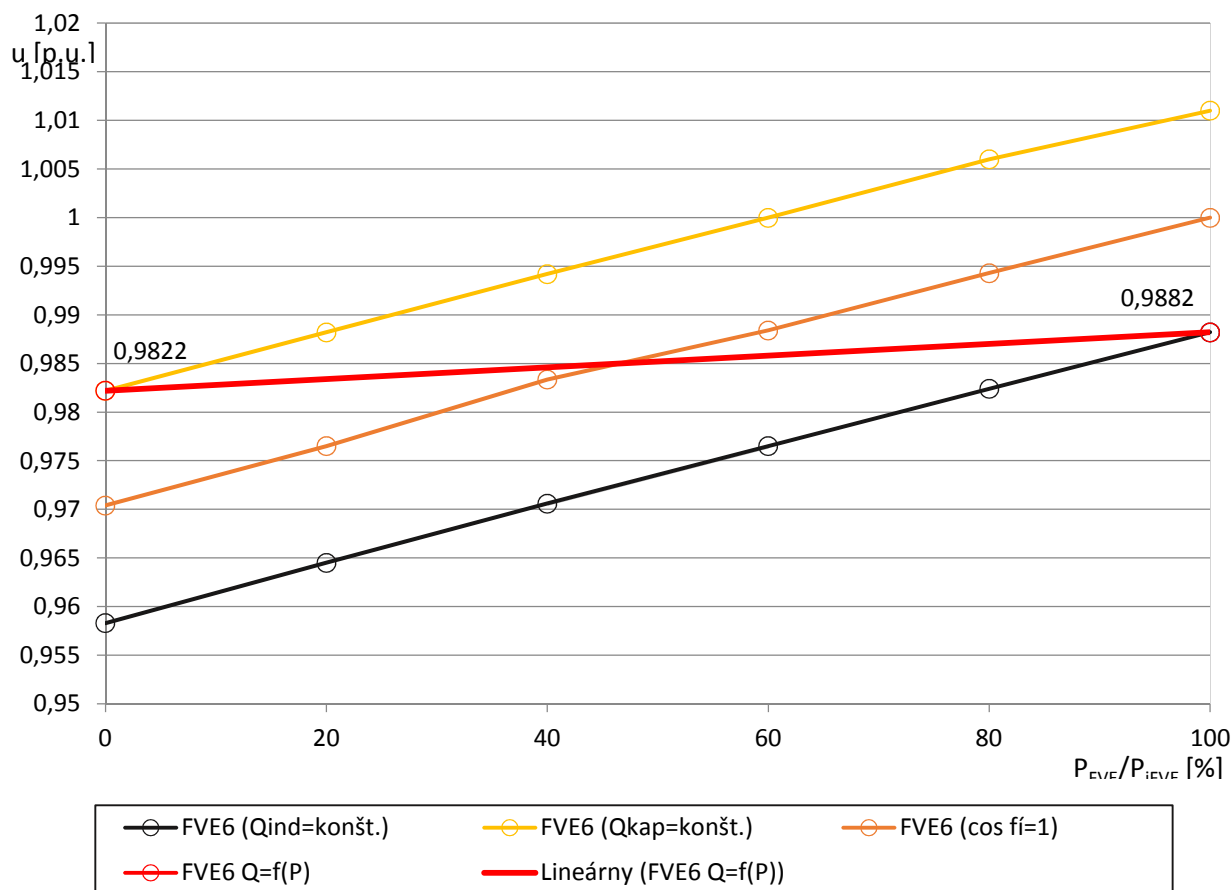
Kapacitný režim pri tejto stratégii riadenia nie je využiteľný, pretože ešte viac zvyšuje napätie. FVE sú pritom obyčajne vybavené kompenzačným zariadením,

ktoré disponuje jalovým kapacitným výkonom (kompenzačné kondenzátory) nezanedbateľnej dimenzie ($0,328 \times P_{iFVE}$).

Positívum riadenia jalového výkonu podľa požadovaného účinníka je skutočnosť, že znižujú svoj vlastný vplyv na napätie, čo bolo dôvodom voľby plošnej aplikácie tejto stratégie.

Riadenie podľa zadanej hodnoty jalového výkonu neznižuje relatívnu zmenu napätia a nedá sa teda pokladať za systémové riešenie.

Najlepšie správanie z hľadiska napätvej stability (pri hodnotení dopredných foriem riadenia jalového výkonu) vykazuje stratégia riadenia podľa charakteristiky $Q = f(P)$ podľa obr. 6, na ktorom je žiadaná krivka vyznačená červenou farbou. Cieľom je dosiahnuť nulový sklon napätia, avšak, FVE6 touto možnosťou nedisponuje, keďže napätie pri maximálnom činnom výkone a jalovom indukčnom výkone je o 0,6% vyššie ako napätie pri nulovom výkone a maximálnom jalovom kapacitnom výkone.



Obr. 6: Návrh charakteristiky riadenia jalového výkonu podľa činného výkonu $Q=f(P)$

Táto forma riadenia sa dá realizovať len, ak je dostupná stupňovitá kompenzácia (striedače nevedia poskytovať jalový výkon pri chode naprázdno). Ekvivalentným riešením pre striedače je charakteristika $\cos \phi = f(P)$, ktorá je zahrnutá v PPDS (na rozdiel od stratégie $Q = f(P)$). Taktiež by bolo nutné vyriešiť otázku merania a vyhodnocovania jalového výkonu pri chode naprázdno. Pri tomto režime je totiž elektrárňou riadnym spotrebiteľom EE, ktorý je penalizovaný za nevyžiadajú

dodávku jalového výkonu a nedodržanie účinníku. Riešením by bolo nevyhodnocovanie v prípade, že je elektrárň zapojená do systému dispečerského riadenia jalového výkonu (a spĺňa technické podmienky prevádzkovania kompenzačnej jednotky, t.j. elektrárň vykazuje predpísané správanie z hľadiska jalového výkonu).

Uvedené stratégie sú doprednou formou riadenia a nerešpektujú pritom aktuálny stav napätia v sieti. Nie vždy si totiž napätie siete žiada, aby bol eliminovaný účinok FVE v podobe nárastu napätia.

Ideálnym spôsobom pre podporu napät'ovej stability v tomto zmysle je spätnoväzobná regulácia jalového výkonu podľa zadanej hodnoty napätia. Táto forma riadenia je v súčasnosti využívaná napr. v prípade VP Horní Lodenice (9 x 2MW pripoj. do VVN). Lepšia uplatniteľnosť pri pripojení výrobní do 110kV pramení z toho, že jalový výkon má na vyšších napät'ových hladinách lepší priemet na napätie vďaka uhlu skratovej impedancie. Regulácia na úrovni VN je v tomto smere menej efektívna. Pre vytýčenie potrebného jalového výkonu induktívneho charakteru výrobní pre úplnú elimináciu nárastu napätia sa využijú charakteristiky napätia FVE6 (1MW) jednak pre prípad nulového jalového výkonu, na druhej strane, pre prípad jalového výkonu s hodnotou $Q = 325_{\text{ind}}\text{kVAr}$. Iniciálny nárast (podľa tab. 5-3) v dôsledku 100% nárastu výkonu FVE6 o hodnotu 2,96% bol pri aplikácii jalového induktívneho výkonu ponížený na hodnotu 1,78% (o 1,18%). Podľa predpokladu lineárnej charakteristiky extrapolovaného jalového výkonu je potrebný jalový výkon pre úplnú elimináciu nárastu napätia rovný hodnote 815kVAr. To je v porovnaní s inštalovaným výkonom zariadenia $P_{\text{IFVE6}} = 0,99\text{MW}$ vysoká hodnota, ktorej adaptácia si vyžaduje zásadné zmeny v inštalácii zariadenia, nehovoriac o činných stratách dekompenzačných tlmiviek. Preto by rozvoj problematiky napät'ovej stability v súvislosti s distribuovanou výrobou nemal viesť výhradne touto cestou. Je potrebné využiť iné formy akčných členov, ponúka sa najmä regulácia napätia zmenou nastavenia odbočiek transformátorov počas zaťaženia.

Spätnoväzobná forma riadenia jalového výkonu podľa zadanej hodnoty napätia je však v súlade s princípom dosahovania vyvážených napät'ových pomerov. Je pritom potrebné akceptovať určitú mieru kolísania napätia, ktorá neznamená nadlimitné zníženie kvality napätia (v opačnom prípade by boli vynaložené prostriedky neefektívne). Hľadanie technických aparátov pre elimináciu vplyvu rozptýlenej výroby na napätie je hlavným cieľom tejto práce, ale zároveň má byť definovaný výstup optimálny na pomedzí redukovania prekročení štandardov kvality napätia, ekonomickej prijateľnosti (na úrovni prevádzkových a investičných nákladov) a má vytvárať rezervu pre pripojovanie nových zdrojov.

Riadenie jalového výkonu podľa napätia je možné realizovať niekoľkými spôsobmi podľa stupňa využitia nadradeného riadiaceho systému. To je náplňou ďalšej časti práce. Jedná sa o systémové prepojenie doposiaľ predstavených individuálnych aparátov (regulácia odbočiek transformátorov, riadenie jalového výkonu a linkový kondicionér).

7 SPÔSOBY RIADENIA NAPÄTIA V DS PODĽA STUPŇA VYUŽITIA NADRADENÉHO RIADIACEHO SYSTÉMU

Spätnoväzobnú reguláciu napätia v DS s významným podielom rozptýlenej výroby je možné realizovať niekoľkými spôsobmi podľa toho, ako na samotnú reguláciu vplýva nadradený riadiaci člen. Existujú tri rôzne stratégie podľa tohto kritéria:

- Lokálna,
- Decentralizovaná,
- Centralizovaná forma riadenia napätia.

Jednotlivé typy sa vyznačujú tým, akým spôsobom sú riadené akčné členy, ktoré ovplyvňujú napätie. Akčnými členmi sú už analyzované prvky:

- Transformátory s prepínateľnou odbočkou počas zaťaženia,
- Prvky s riadením jalového výkonu – jedná sa o striedače, ktoré disponujú možnosťou riadenia jalového výkonu alebo externé kompenzačné zariadenia (stupňovitá, resp. hybridná kompenzácia),
- Riadenie činného výstupného výkonu elektrárne,
- Linkové kondicionéry.

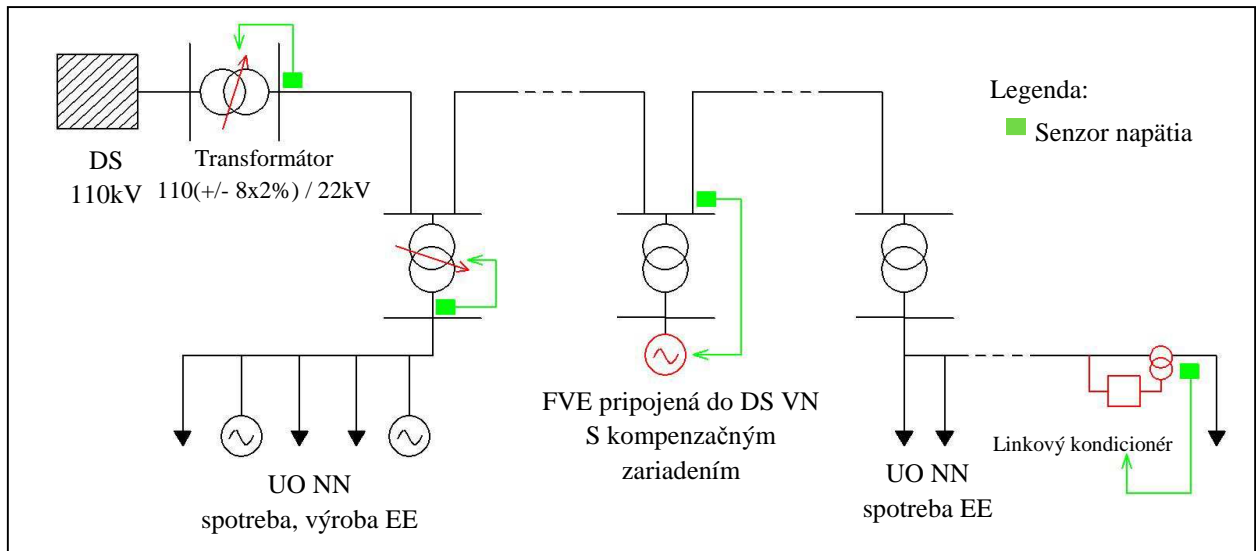
7.1 LOKÁLNA FORMA RIADENIA NAPÄTIA

Jedná sa o distribučnú sústavu, ktoré obsahujú súbor akčných členov. Tieto akčné členy majú prednastavenú úroveň požadovanej hodnoty napätia v mieste ich pripojenia. Impulz na zmenu stavu akčného členu (napr. zmena jalového výkonu) sa zahajuje pri prekročení limitných hodnôt v bode pripojenia, alebo sa jedná o kontinuálnu aktivitu pre dosahovanie predpísanej požadovanej hodnoty. Prvý prípad je menej stratový (napr. z hľadiska indukčného režimu striedača alebo kompenzačnej jednotky), keďže sa akčné členy aktivujú len v prípade potreby.

Príkladová topológia je na *obr. 7*, ktorá obsahuje jednotlivé akčné členy riadenia napätia. Za spätnoväzobnú formu reguláciu napätia sa považuje aj riadenie výstupného účinníku meniča (resp. iného akčného členu) podľa aktuálnej hodnoty napätia v mieste pripojenia. Práve účinník totiž ohraničuje prevádzkový diagram striedača.

Výhodou lokálnej formy regulácie napätia je, že si nevyžaduje prepracovaný informačný a komunikačný systém (súbor akčných členov nie je riadený nadradeným regulátorom) a je teda v porovnaní s ďalšími formami najjednoduchšia a investične najpriateľnejšia.

Na druhej strane sa však pri adaptácii tejto techniky môžu vyskytnúť technické problémy. Rozdielna dynamika jednotlivých regulačných elementov zapojených do regulácie napätia môže viesť k situácii, že sa jednotlivé akčné členy nebudú vyvážené podieľať na regulačnom zásahu. Tento stav je pravdepodobný najmä pre elektricky blízke výrobné vybavené rozdielnou technológiou riadenia jalového výkonu.



Obr. 7: Lokálna forma regulácie napätia

7.2 DECENTRALIZOVANÁ FORMA RIADENIA NAPÄTIA

Decentralizovaná regulácia je riešená na úrovni určitej časti DS (napr. UO NN vrátane transformátora VN/NN alebo na úrovni modelovanej DS 22kV na obr. 2).

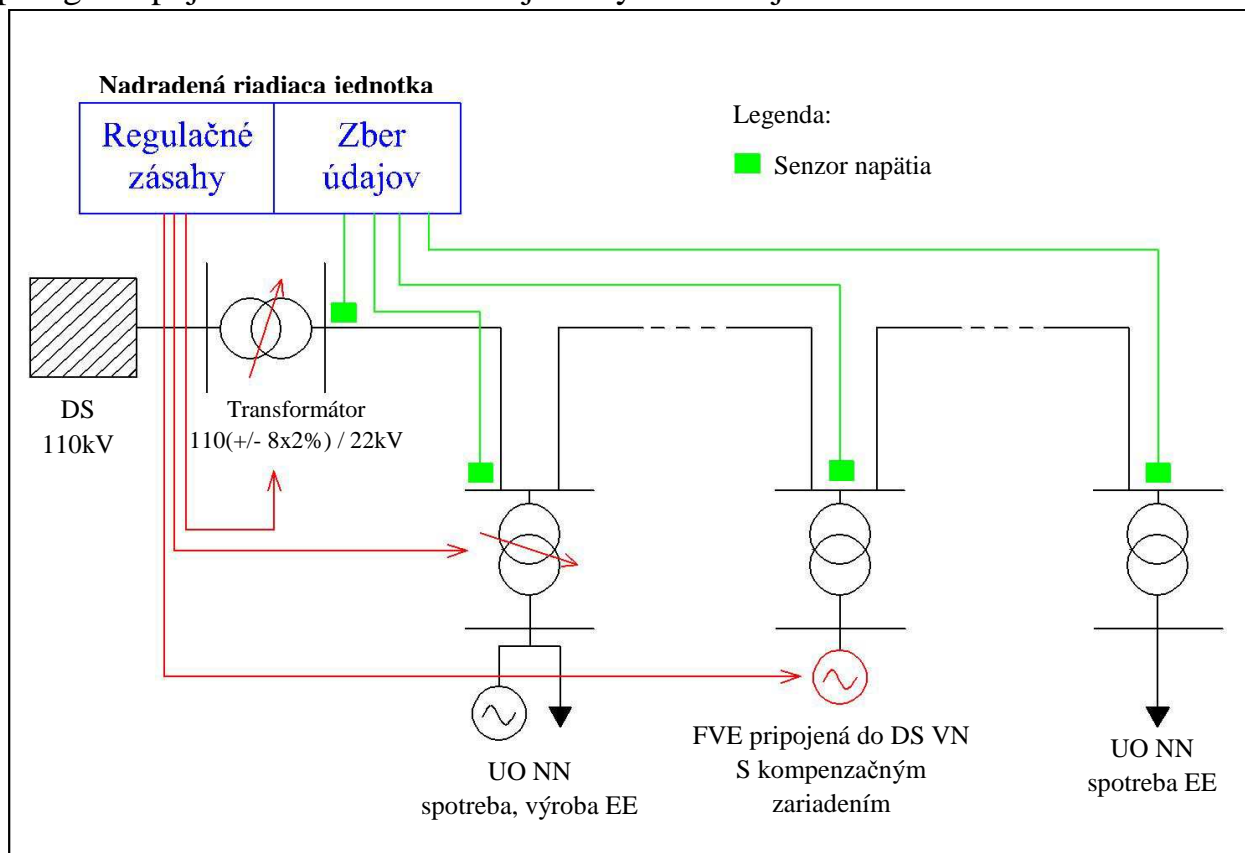
Základnými stavebnými článkami tejto formy regulácie napätia je transformačný uzol, ktorý tvorí bránu do nadradeného systému a ostatné riadené akčné členy (transformátor s nastaviteľnou odbočkou počas zaťaženia, kompenzačné jednotky jalového výkonu, meniče s možnosťou riadenia jalového, resp. činného výkonu, linkové kondicionéry).

Do transformačného uzlu je vhodné situovať riadiacu jednotku systému regulácie napätia. Transformačný uzol môže mať niekoľko úrovní podľa toho, aké možnosti poskytuje pre systém riadenia napätia. Sú to nasledovné varianty:

- Jednoduchý (v súčasnosti využívaný) uzol, ktorý má nasledovné vlastnosti:
 - neobsahuje riadiacu jednotku pre riadenie akčných členov regulácie napätia obsiahnutých v sústave a nie je akčným členom, t.j. nedisponuje možnosťou dynamickej regulácie napätia prostredníctvom transformátora s nastaviteľnou odbočkou počas zaťaženia.
- Riadiaci uzol s nasledovnými črtami:
 - obsahuje riadiacu jednotku pre riadenie akčných členov regulácie napätia obsiahnutých v sústave, v ideálnom prípade sú v mieste pripojenia daných akčných členov obsiahnuté aj senzory napätia. Zber údajov je nutný najmä z miest, kde sa vyskytujú extrémny napätia v danej regulovanej oblasti. Zároveň však nie je akčným členom.
- Riadiaci aktívny uzol, ktorý:
 - je miestom riadiacej jednotky, aktívne sa zapája procesu regulácie napätia prostredníctvom transformátora s nastaviteľnou odbočkou počas zaťaženia.

Decentralizovaná forma na rozdiel od lokálnej umožňuje zapájať akčné členy podľa priority tak, aby boli ušetrení napr. prevádzkovatelia elektrární od

dodatočných činných strát, ktoré vzniknú v dôsledku poskytovania jalového výkonu (t.j. prednosť má dynamická regulácia odbočky transformátora). Príkladová topológia zapojenia decentralizovanej formy riadenia je na obr.8.



Obr. 8: Decentralizovaná forma regulácie napätia

7.3 CENTRALIZOVANÁ FORMA RIADENIA NAPÄTIA

Centralizovaná forma je založená na rovnakom princípe ako decentralizovaná forma, t.j. súbor akčných členov je riadených prostredníctvom centrálnej riadiacej jednotky. V tomto prípade však táto jednotka zastrešuje celú distribučnú sústavu, je umiestnená v dispečerskom centre operátora DS. Rozdistribúovanie povelov je zabezpečené pomocou estimačného algoritmu. K dispozícii sú pre tieto účely statické údaje (topológia siete, parametre prvkov DS) a dynamické údaje (aktuálne napätia, úrovne činných a jalových výkonov, stavy odbočiek transformátorov). Regulačný mechanizmus je o to presnejší, čím lepšie je senzorické vnímanie DS, čo obnáša vysoké nároky na komunikačné a informačné technológie. [11]

8 NAVRHOVANÉ OPATRENIA PRE RIEŠENIE AKTUÁLNYCH PROBLÉMOV A ROZVOJA SYSTÉMU REGULÁCIE NAPÄTIA V DS S RASTÚCIM ZASTÚPENÍM ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV

8.1 ZAPOJENIE DODATOČNE INŠTALOVANÝCH JEDNOTIEK DISPEČERSKÉHO RIADENIA JALOVÉHO (RESP. ČINNÉHO) VÝKONU DO SYSTÉMU SPÄTNOVÄZOBNEJ REGULÁCIE NAPÄTIA V MIESTE PRIPOJENIA.

V prípadoch, ktoré to umožňujú (externá kompenzačná jednotka), je vhodné rozšíriť využiteľnosť pracovného diagramu kompenzácie tým, že sa regulovaná veličina účinníku zmení na veličinu jalový výkon. Toto rozšírenie má opodstatnenie pri nízkom výkone elektrární. Uvedená stratégia riadenia by umožňovala využitie kapacitného režimu. Dodávkou jalového výkonu do siete by sa umelo zvyšovalo napätie v bode pripojenia. Zvýšené napätie v dolnej časti charakteristiky (nízky výkon výroby) by znižovalo celkovú zmenu napätia. Najlepšie tento zámer reflektuje *obr. 6* s charakteristikou $P = f(Q)$. Nastavená hodnota napätia teda musí vzísť zo strednej časti charakteristiky (50% výkon výroby, $\cos \varphi = 1$) na *obr. 6*.

Táto forma zapojenia si vyžaduje nadradený riadiaci člen, ktorý rozdistribuuje požiadavky na jalový výkon (príp. účinník) jednotlivých elektrární. Prítomnosť riadiaceho člena je podstatným článkom, ktorý obmedzí nežiadajú interakciu zdrojov v podobe prelievania jalových výkonov. Tento stav reálne hrozí pri prítomnosti elektricky blízkych výrobní s rozličnou dynamikou poskytovania jalového výkonu pri regulácii na žiadanú hodnotu napätia v lokálnej architektúre (bez nadradeného riadiaceho člena).

Pri aplikácii kapacitného jalového výkonu za účelom zvyšovania napätia v prípade nevýroby (príp. slabej výroby) rozptýlených zdrojov (podľa reálnych napäťových pomerov) musí nadradený člen tiež obmedzovať kapacitný výkon na takú úroveň, aby nedochádzalo k pretokom smerom do nadradenej časti siete. V ideálnom prípade sa bude podieľať na nasýtení spotreby indukčného jalového výkonu v UO. V prípade, že sa jedná o napäťovú úroveň VN, môže aparát kompenzácie hradiť aj spotrebu jalového výkonu v podradených častiach – v DS NN. Naopak, nadradený riadiaci člen musí pre účely prioritného zapájania akčných členov podľa výšky strát uvážiť, že aplikácia indukčného jalového výkonu spôsobuje zvýšené straty. Z tohto hľadiska je žiaduce uprednostňovať dynamické riadenie napätia pomocou transformátorov s možnosťou nastavenia odbočky počas zaťaženia.

8.2 DYNAMICKÉ RIADENIE ODBOČKY TRANSFORMÁTORA 110/22KV PODĽA DIAGRAMU VÝROBY ROZPTÝLENÝCH ZDROJOV A DIAGRAMU ZAŤAŽENIA DS.

Podmienkou fungovania tohto spôsobu riadenia je opäť existencia nadradenej riadiacej jednotky na úrovni transformátora VVN/VN, ktorá bude vyhodnocovať

aktuálne hodnoty napätí v jednotlivých senzorických bodoch a požadované hodnoty napätí (resp. pásmo požadovaných hodnôt) v týchto senzorických bodoch. Jedná sa o body pripojenia zdrojov VN a o transformačné uzly VN/NN, v ktorých by v ideálnom prípade tiež existovali riadiace systémy napätia uvažovanej UO NN (okrem zdrojov EE). Nastavený požadovaný koridor kontrolného bodu VN/NN by mal byť taký, aby v danom okamihu nedochádzalo k prekračovaniu limitov napätia (eliminácia prepätí a podpätí). Tento (pohyblivý) koridor sa riadiaca jednotka (situovaná v bode VN/NN) snaží zaistiť vlastnými prostriedkami. Na úrovni NN sú zatiaľ prostriedky regulácie napätia výnimočné, ale ich adaptáciu je potrebné zvážiť s ohľadom na vážnosť problému.

Ak dochádza v uvedených senzorických bodoch k nesúladu medzi koridorom požadovaných hodnôt a aktuálnym napätím, potom je potrebné voliť regulačný zásah. Ten musí byť overený estimačným algoritmom, ktorý preskúma, či zmena nastavenia odbočky transformátora VVN/VN prinesie požadované zlepšenie. Ak nie, potom by riadiaca jednotka mala voliť iné akčné členy ako napr. riadenie jalového výkonu rozptýlených zdrojov VN.

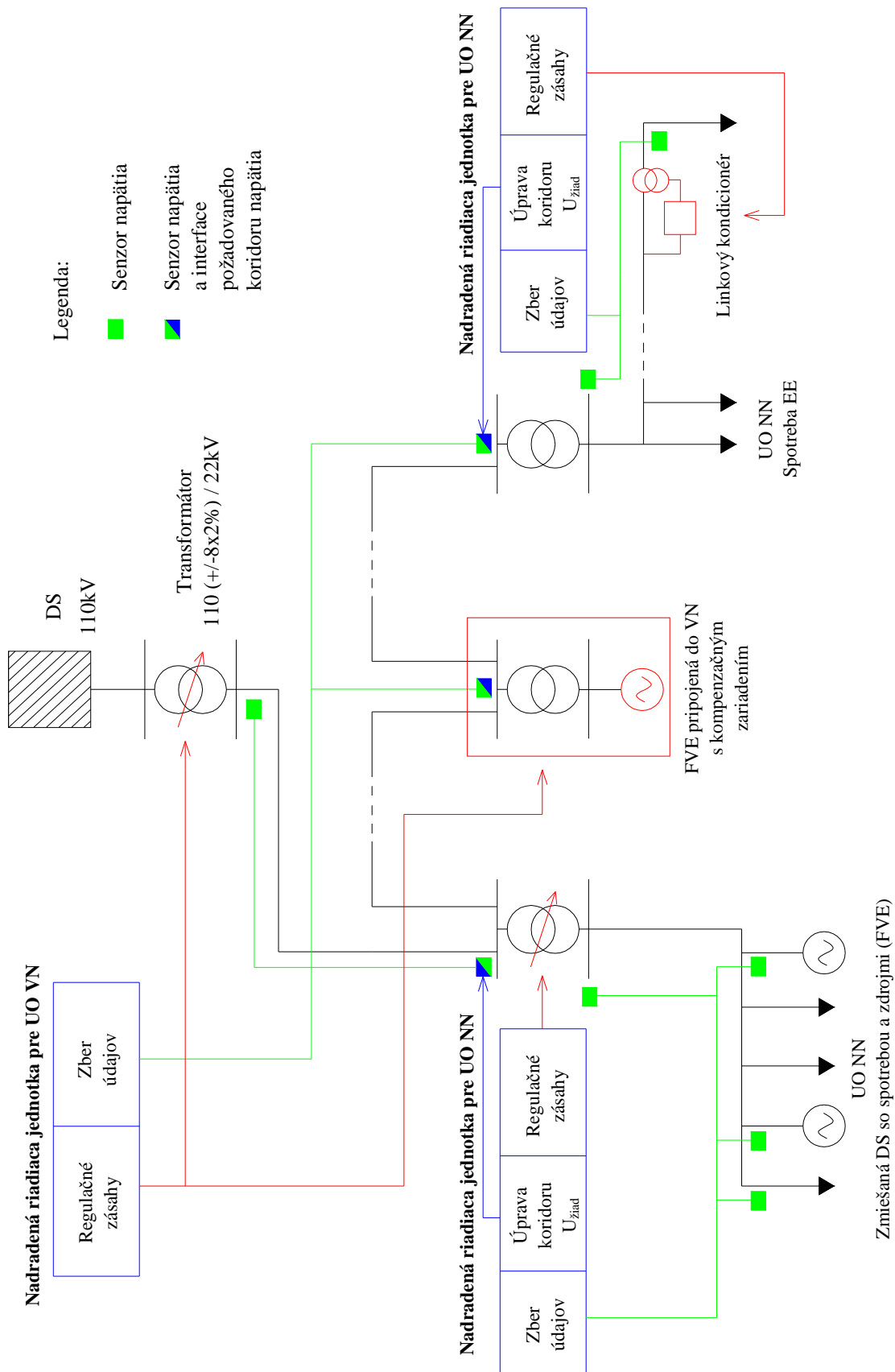
8.3 INŠTALÁCIA DISTRIBUČNÝCH TRANSFORMÁTOROV S MOŽNOSŤOU ZMENY NASTAVENIA ODBOČKY POČAS ZAŤAŽENIA

Ich inštaláciou a aktívnym riadením riadiacou jednotkou by došlo k oslobodeniu od napäťovej väzby medzi napäťovými hladinami VN a NN, čo je pri vysokom zastúpení rozptýlených zdrojov v danej UO alebo v nadradenej časti siete, ktorá danú UO napája, žiaduce. Inštalácia týchto transformátorov musí byť technicky opodstatnená, keďže plošná výmena by bola investične neefektívnou akciou.

8.4 BUDOVANIE DECENTRALIZOVANEJ ARCHITEKTÚRY REGULÁCIE NAPÄTÍ V DS

Všetky popisované a navrhované prostriedky regulácie napätia majú tendenciu naplniť svoj potenciál, ak budú koordinované nadradeným riadiacim členom. Práve decentralizovaná architektúra sa javí ako optimálna z hľadiska miery potrebnej dodatočnej investície do informačných a komunikačných technológií, a tiež z hľadiska jej potenciálu zabezpečiť koordinovanú funkčnosť súboru regulačných akčných členov pri napĺňaní napäťových požiadaviek a minimalizácii strát.

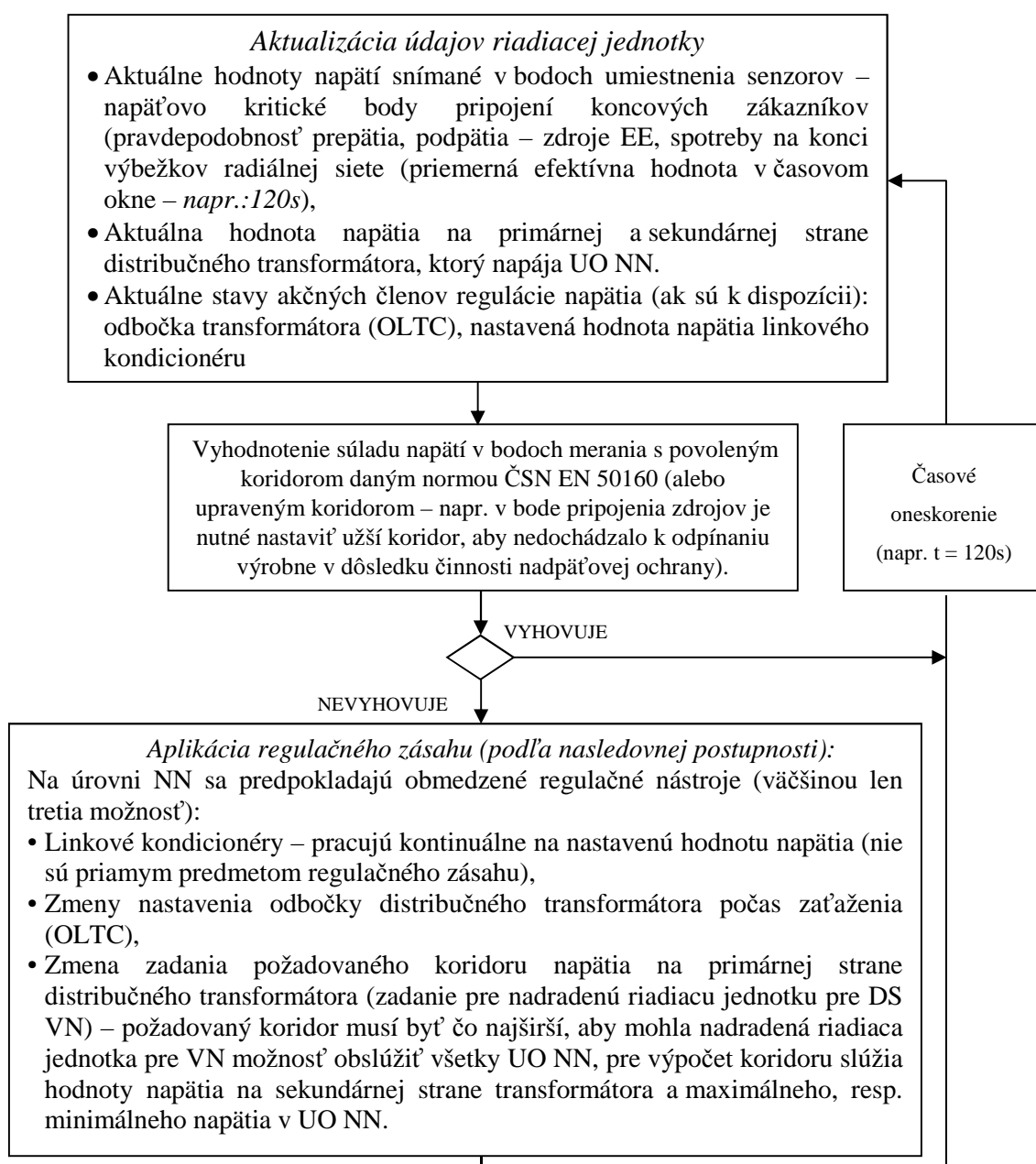
Charakteristiku architektúry, princípu činnosti demonštruje *obr. 9*, resp. algoritmy riadenia regulačných procesov na *obr. 10, 11*.



Obr. 9: Navrhovaný rozvoj systému riadenia napätia v podmienkach DS ČR

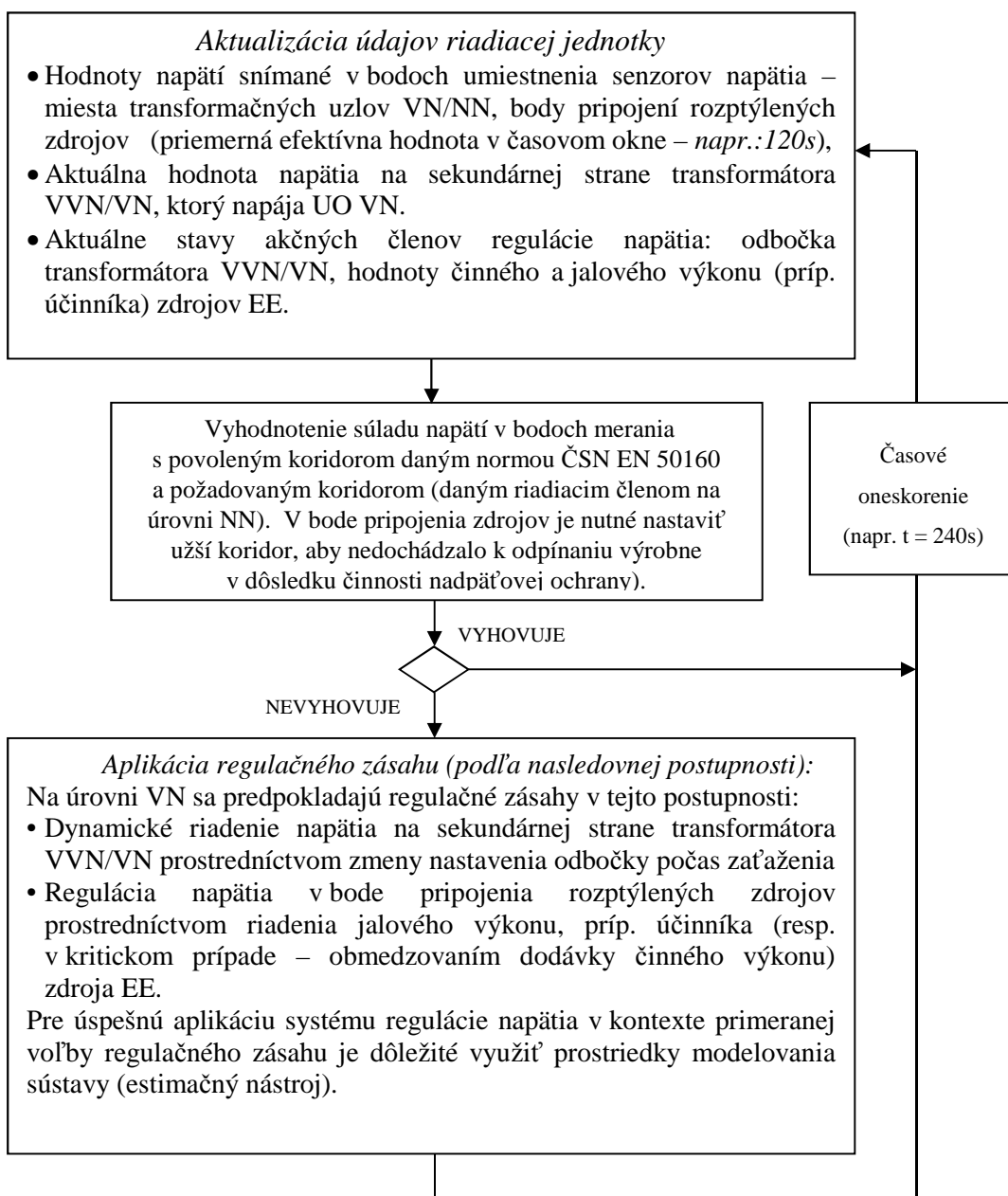
Rozvoj systému regulácie napätia je cielený tak, aby pre dosiahnutie požadovaných napät'ových pomerov boli vynaložené optimálne prostriedky. Preto je potrebné adaptovať navrhované riešenie a architektúru podľa opodstatnenosti v miestnych súvislostiach (nie každá UO NN musí mať svoj nadradený člen, resp. transformátor s možnosťou zmeny nastavenia odbočky počas zaťaženia). Z tohto dôvodu táto práca nenavrhuje ani riadenie jalového výkonu zdrojov do 100kWp. Toto riešenie by muselo byť plošne žiadané (vysoká celková dodatočná investícia) a s ohľadom na uhol skratovej impedancie v sieti NN by neprinášalo požadovaný efekt.

Algoritmus riadenia riadiacej jednotky pre DS NN



Obr. 10: Navrhovaný algoritmus riadenia riadiacej jednotky pre DS NN

Algoritmus riadenia riadiacej jednotky pre DS VN



Obr. 11: Navrhovaný algoritmus riadenia riadiacej jednotky pre DS VN

9 ZÁVER

Úlohou tejto práce je prispieť k riešeniam technických otázok a podporiť tak rozvoj konceptu rozptýlenej výroby v adekvátnej miere, pri zachovaní, resp. vylepšení atribútov spoľahlivosti a kvality dodávok EE koncovým zákazníkom.

Práca je zameraná na riešenie lokálnych vplyvov výrobní, so silným dôrazom na otázku kvality napätia z hľadiska prekračovania predpísaných limitov efektívnej hodnoty napätia. PDS má po sprevádzkovaní zdrojov s nepredikovateľným charakterom dodávky náročnejšiu úlohu udržiavať napätie v predpísanom pásme.

9.1 SÚČASNÝ STAV

Zdroj EE spôsobuje v bode pripojenia a jeho elektrickom okolí nárast napätia, ktorý je závislý na výkone výroby, skratovej impedancii v mieste pripojenia a čiastočne aj na výkonových pomeroch v okolí výroby. Priebehy zmien napätia súvisia s diagramom výroby zdrojov (najmä FVE), t.j. sú poznačené charakterom nepredikovateľnosti. Nárast napätia v DS vytesňuje vyhovujúci koridor napätia kontrolného bodu. V jednom prípade totiž dochádza k prepätiu, na druhej strane, po odznení výroby (FVE) hrozí vo vzdialených častiach radiálnej siete podpätie.

Zvýšený stupeň prekračovania limitov napätia viedol k povinnosti výrobcov doplniť zdroje s $P_i > 100\text{kWp}$ systémom dispečerského riadenia jalového výkonu, resp. činného výkonu. Systém je cielený pre elimináciu nárastu napätia, z čoho pramení výber požadovanej veličiny, ktorou je vo väčšine prípadov účinník.

9.2 NAVRHOVANÉ OPATRENIA

Cieľom práce bolo jednak analyzovať a navrhnúť prostriedky pre elimináciu lokálnych vplyvov, s dôrazom na problematiku sieťového napätia. Na druhej strane bolo potrebné dané prostriedky koncepčne zapojiť do systému riadenia napätia tak, aby bolo zachované optimum pri dosahovaní technických ukazovateľov a rešpektovaní ekonomických faktorov (minimum investičných, prevádzkových nákladov).

9.2.1 Úprava spôsobu riadenia jalového výkonu rozptýlených zdrojov

Súčasný spôsob využitia prostriedku dispečerského riadenia jalového výkonu podľa zadanej hodnoty účinníku nenapĺňa svoj potenciál. Kapacitný režim je prakticky nevyužitelný, keďže ešte viac zvyšuje napätie. Jednotlivé stratégie riadenia jalového výkonu boli overené matematickým modelovaním reálnej časti DS VN s markantným zastúpením zdrojov. V DS VN je priemet jalového výkonu na elimináciu nárastu napätia nižší (v porovnaní s vyššími napäťovými hladinami) v súvislosti s uhlom skratovej impedancie na danej napäťovej úrovni.

Z hľadiska dopredných foriem riadenia jalového výkonu je riadenie podľa účinníku v induktívnom režime pasívnym aparátom, ktorý eliminuje nárast napätia (do úrovne 25 - 40% nárastu na hladine VN). Využitie charakteristiky $Q = f(P)$ disponuje lepšou možnosťou zmiernenia zmeny napätia. Charakteristiku je potrebné nastaviť tak, aby v dolnej časti diagramu výroby dochádzalo k umelému navýšovaniu napätia vplyvom kapacitného režimu a v hornej časti sa počítalo s

aplikáciou indukčného režimu podľa obr. 5-41. Uvedené dopredné formy riadenia jalového výkonu nereflektujú skutočné napätie v mieste pripojenia. Z tohto hľadiska je najvýhodnejšou stratégiou spätnoväzobná regulácia jalového výkonu podľa zadanej hodnoty napätia (resp. napäťového pásma). Jej adaptácia v DS však musí byť koncepčná, aby nedochádzalo k nežiaducej interakcii medzi jednotlivými kompenzačnými zariadeniami. Pre účely opodstatneného zapájania výrobní do systému regulácie napätia musí existovať nadradená riadiaca jednotka.

9.2.2 Dynamické riadenie napätia odbočkovým transformátorom

Aktuálny spôsob prevádzky transformátora 110/22kV na konštantnú hodnotu napätia je nutné prehodnotiť s cieľom odstránenie stavov prepätí a podpätí. Opäť je nutná prítomnosť nadradenej riadiacej jednotky, ktorá pomocou informácií o napätí vo vybraných senzorických bodoch DS realizuje zmenu nastavenia odbočky počas zaťaženia. V DS so silným výkonovým zastúpením FVE sa počíta s tým, že v čase rannej špičky zaťaženia (a súčasne slabšej výroby FVE) bude nastavené napätie na transformátore 110/22kV vyššie, aby nedochádzalo k podpätiám, na druhej strane, v dobe špičky výroby a minima zaťaženia zabezpečí zmena odbočky transformátora nižšie napätie kontrolného bodu, ktoré zamedzí možnosti prepätia.

Vo vybraných problémových UO NN je vhodné inštalovať transformátory VN/NN s možnosťou zmeny nastavenia odbočky počas zaťaženia. Tým sa UO NN oslobodí od napäťových pomerov v nadradenej sieti.

Zapojenie regulačných nástrojov do decentralizovanej architektúry regulácie napätia v DS.

9.2.3 Zapojenie regulačných nástrojov do decentralizovanej architektúry regulácie napätia v DS

Uvedené regulačné nástroje je vhodné využívať koordinovane, s možnosťou výberu regulačného zásahu podľa reálnych napäťových pomerov a výberu priority zapájania akčných členov s ohľadom na prevádzkové straty, resp. náklady. Decentralizovaná architektúra uvedené kritériá napĺňa. Jej aplikácia počíta s nadradenou riadiacou jednotkou, senzorickými bodmi a nástrojmi regulácie. Popis funkcionality a návrh algoritmu riadenia je predmetom kapitoly 8.

9.3 VÝZNAM A VYUŽITIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Práca navrhuje realizáciu systému riadenia napätia v DS s vysokou penetráciou rozptýlenej výroby. Systém počíta s využitím existujúcich zariadení (transformátory 110/22kV, riadenie jalového výkonu výrobní) pri ich rozvinutí do sofistikovaného celku, ktorého súčasťou bude nadradená riadiaca jednotka so senzorickými bodmi. Uvedená architektúra by priniesla vylepšenie napäťových pomerov v DS a zároveň by rozšírila hranice pripojiteľnosti novým výrobným jednotkám.

Takáto forma riešenia je v súlade s udržateľným rozvojom elektroenergetiky.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] FRERIS, L., INFIELD, D.: *Renewable energy in power systems*. John Wiley&Sons, Chichester 2008
- [2] HABRICH, R.: *Regulace napětí a jalového výkonu v distribučních soustavách 110kV*. Sborník konference EPE 2012, Brno, ISBN 978-80-214-4514-7
- [3] HOLOUBEK, J.: *Fotovoltaické elektrárny a jalový výkon*. Sborník konference Energetické rušení, Brno 2012, ISBN 978-80-260-3431-5
- [4] KAŠPÍREK, M.: *Dopad provozu OZE na garantované standardy kvality napětí*. Sborník konference Energetické rušení, Brno 2012, ISBN 978-80-260-3431-5
- [5] KAŠPÍREK, M.: *Problematika vyhodnocování parametru Flicker*. Sborník konference Energetické rušení, Brno 2012, ISBN 978-80-260-3431-5
- [6] KAŠPÍREK, M., JIŘIČKA, J., MEZERA, D., KOUBA, D., HROUDNÝ, M., PROCHÁZKA, A.: *Praktické možnosti eliminace vlivu rozptýlené výroby na kvalitu napětí*. Sborník konference Energetické rušení, Brno 2012, ISBN 978-80-260-3431-5
- [7] KORENC, V., BŮBELA, T.: *Hybridní regulace jalového výkonu fotovoltaických elektráren*. Sborník konference Energetické rušení, Brno 2012, ISBN 978-80-260-3431-5
- [8] KORENC, V., BŮBELA, T.: *Problematika regulace jalového výkonu fotovoltaických elektráren*. Elektro 3/12
- [9] MASTERS, G.M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley&Sons, New Jersey 2004
- [10] VAN GERWEN, R.: *Distributed Generation and Renewables. Introduction*. [online, cit. 16.10.2010], dostupné na: http://www.leonardo-energy.com/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2006/AN_8_1_Introduction-to-distributed-generation-and-renewables.pdf
- [11] VON APPEN, J., BRAUN, M., STETZ, T., DIWOLD, K., GEIBEL, D.: *Time in the Sun. The Challenge of High PV Penetration in the German Electric Grid*. IEEE Power & Energy Magazine - March/April 2013, New York 2013, ISSN 1540-7977

CURRICULUM VITAE AUTORA PRÁCE

VZDELANIE

01.09.2001 - 30.06.2005 Stredná priemyselná škola elektrotechnická, Nové Zámky
20.09.2005 - 20.06.2008 Vysoké učení technické v Brně
bakalárske štúdium, FEKT, Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika,
21.06.2008 - 30.06.2010 Vysoké učení technické v Brně
magisterské studium, FEKT, Elektroenergetika,
od 01.09.2010 Vysoké učení technické v Brně
doktorské studium, FEKT, Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika.

ZAMESTNANIE

Od 30.06.2010 BEFRA elektorservis (www.befra.sk)

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou nasadzovania rozptýlených zdrojov elektrickej energie do elektrizačnej sústavy. Charakter zdrojov spôsobuje, že pri masívnej integrácii môže dochádzať k problémom s kvalitou elektrickej energie v lokálnom kontexte (distribučné sústavy), ale takisto môže byť ohrozená celková spoľahlivosť dodávky v rozsahu prepojených elektrizačných sústav.

Práca je zameraná na lokálne vplyvy so zvláštnym dôrazom na analýzu a návrh prostriedkov regulácie napätia v distribučných sústavách. Prostriedky regulácie (riadenie jalového výkonu rozptýlených zdrojov a dynamické riadenie napätia transformátorom 110/22kV) je účinné využívať ako súčasť jednotnej koncepcie systému regulácie napätia. Navrhovaná forma koncepcie je súčasťou práce.

ABSTRACT

This work deals with the deployment of distributed power sources into the electric power grid. The nature of these sources causes that the massive integration may experience problems with power quality in the local context, and also overall reliability of supply in the range of interconnected power systems may be endangered.

Work is focused on local voltage quality problems with special emphasis on analysis and design of tools (e.g. reactive power compensation units of power plants or dynamic voltage control by transformers 110/22kV) for voltage control in power distribution systems. These tools should be used as a part of uniform concept of voltage control. The proposed concept is involved.