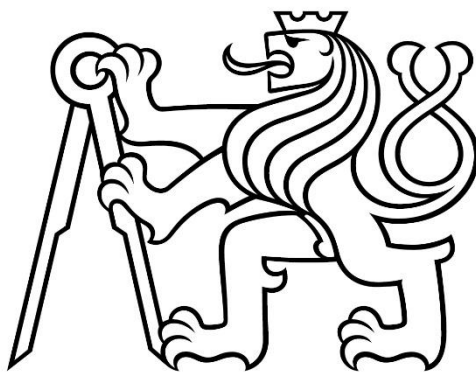


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Michal Koubek

Regulace napětí a jalového výkonu v distribučních sítích

Voltage and Reactive Power Control in Distribution Grids

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koubek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **459397**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Regulace napětí a jalového výkonu v distribučních sítích

Název bakalářské práce anglicky:

Voltage and Reactive Power Control in Distribution Grids

Pokyny pro vypracování:

1. Popište princip regulace napětí v přenosových a distribučních soustavách.
2. Zpracujte přehled prvků pro regulaci napětí a principů jejich funkcí.
3. Vypracujte analýzu vlivu P a Q na napětí v DS, zhodnoťte citlivost vlivu na vybrané parametry v síti.
4. Vypracujte analýzu vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny v síti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mühlbacher, J., Kolcun, M., Griger, V.: Electric power system operation control. Košice, 2004, ISBN: 80-89061-86-9
- [2] Toman, P. a kol.: Pravidla provozování distribuční soustavy. Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04935-8
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.11.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7.1. 2020

Michal Koubek

Poděkování

Děkuji panu Vítu Kleinovi, Ph.D., a společnosti ČEZ Distribuce, a.s., za odborné rady, připomínky a podněty, které pomohly zvýšit úroveň této práce. Dále chci poděkovat mé rodině za ustavičnou podporu během celé délky studia i během psaní bakalářské práce.

Abstrakt:

Bakalářská práce pojednává o regulaci napětí a jalových výkonů v přenosové a zejména distribuční soustavě. Dále jsou rozebrány prvky, kterými lze regulaci napětí provádět. Druhá polovina této práce je zaměřená na parametry vedení ovlivňující regulaci napětí a ovlivňování jiných napěťových hladin v síti.

Klíčová slova:

regulace napětí, jalový výkon, automatická sekundární regulace napětí, parametry vedení ovlivňující regulaci napětí

Abstract:

This bachelor thesis discusses the voltage and reactive power regulation primarily in distribution grids, but also in transmission system. Elements for voltage regulation are also described further. The second part of the thesis is focused on power grid's parameters, which influence voltage regulation and influencing other voltage levels in grid by voltage regulation.

Keywords:

voltage regulation, reactive power, secondary voltage regulation, power grid's parameters influencing voltage regulation

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Regulace napětí v přenosových a distribučních soustavách.....	2
2.1	Elektrizační soustava	2
2.1.1	Popis přenosové soustavy.....	2
2.1.2	Popis distribuční soustavy	2
2.2	Požadavky na dodávané napětí.....	4
2.3	Fyzikální princip regulace napětí	5
2.4	Regulace napětí v přenosové soustavě	7
2.4.1	Automatická sekundární regulace napětí (ASRU).....	7
2.4.2	Terciární regulace napětí (TRN)	9
2.5	Regulace napětí v distribuční soustavě.....	10
2.5.1	Statické řízení napětí	11
2.5.2	Dynamická podpora sítě.....	13
2.5.3	Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách	13
2.5.4	Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách	15
3	Prvky pro regulaci napětí	17
3.1	Buzení synchronního generátoru	17
3.2	Statický VAr kompenzátor (SVC).....	19
3.3	Transformátory s možností přepínání odboček pod zatížením.....	20
3.4	Střídače	21
3.5	Linkový kondicionér.....	23
3.6	Synchronní kompenzátor	24
4	Analýza vlivu činného a jalového výkonu na napětí v distribuční síti.....	26
4.1	Úvod	26
4.2	Popis softwaru E-Vlivy 3	26
4.3	Vliv činného a jalového výkonu na napětí v distribuční síti	27
4.3.1	Parametry vedení ovlivňující regulaci napětí.....	28
4.3.2	Vyhodnocování výsledků získaných ze softwaru E-Vlivy 3	29
4.3.3	Vliv zatížení sítě na regulaci napětí	30
4.4	Analýza citlivosti vlivu regulace napětí na vybrané parametry vedení.....	31
4.4.1	Vedení nízkého napětí (0,4 kV)	31
4.4.2	Vedení vysokého napětí (22 kV).....	34
4.4.3	Shrnutí citlivosti vlivu regulace napětí na vybrané parametry vedení	36
4.5	Vliv zatížení sítě na regulaci napětí.....	37
4.5.1	Vedení nízkého napětí (0,4 kV)	37

4.5.2	Vedení vysokého napětí (22 kV).....	39
4.5.3	Shrnutí vlivu zatížení sítě na regulaci napětí.....	40
4.6	Závěrečné shrnutí.....	41
5	Analýza vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny v síti.....	42
5.1	Vliv regulace napětí na jiné napěťové hladiny	42
5.2	Analýza vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny	43
5.2.1	Zdroj připojený na hladině vysokého napětí	43
5.2.2	Zdroj připojený na hladině nízkého napětí	45
5.3	Závěrečné shrnutí.....	46
6	Závěr.....	47
	Použité zdroje	48
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek.....	50
	Seznam grafů	52

Seznam zkratek

ARN	Automatický regulátor napětí
ASRU	Automatická sekundární regulace napětí
BSC	Breaker Switched Capacitor (spínaný kondenzátor)
BSR	Breaker Switched Reactor (spínaná tlumivka)
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
FV	Fotovoltaická elektrárna
HMP	Hlavní omezovač podbuzení
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
MPPT	Maximum Power Point Tracker (sledovač bodu maximálního výkonu)
NN	Nízké napětí
NU	Napájecí uzel
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PPPS	Pravidla provozování přenosové soustavy
PRN	Primární regulátor napětí
PS	Přenosová soustava
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
QMM	Minimální jalový induktivní výkon
QMN	Maximální jalový induktivní výkon
QXM	Minimální jalový kapacitní výkon
QXN	Maximální jalový kapacitní výkon
SRQ	Sekundární regulátor jalového výkonu
SVC	Static Var Compensator (statický kompenzátor jalového výkonu)
TCR	Thyristor Controlled Reactor (tyristorově řízená tlumivka)

TR	Transformátor
TRN	Terciární regulace napětí
TSC	Thyristor Switched Capacitor (tyristorově spínaný kondenzátor)
TSR	Thyristor Controlled Reactor (tyristorově spínaná tlumivka)
V	Vedení
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
Z	Zátěž
ZVN	Zvlášť vysoké napětí

1 Úvod

Elektrická energie patří v dnešní době mezi nejvíce používanou formu energie. Je nepostradatelná, jak pro běžného spotřebitele v domácnostech, tak pro velké podniky, nevyjímaje veřejný prostor. Díky svým vlastnostem se snadno přenáší na značné vzdálenosti ve velkém množství, čemuž napomáhá poměrně jednoduchá transformovatelnost jejích parametrů. Snadno se také elektrická energie přeměňuje na jiné formy energie – mechanická, světelná, tepelná aj. To využíváme v mnoha případech v domácnosti, ale i mimo ni – v trakci, ve veřejném osvětlení, u indukčních pecí atd. Lidstvo se od prvních pokusů s elektřinou do současnosti naučilo elektrickou energii vytvářet, upravovat a zpracovávat mnoha způsoby. Elektrická energie vzniká z neobnovitelných zdrojů, tedy v elektrárnách tepelných, jaderných, ale i ze zdrojů obnovitelných, tedy z elektráren vodních, solárních, větrných, geotermálních atd. Tu je pak nutné distribuovat do míst, kde se spotřebovává. S rozšiřujícím se využitím elektrické energie začaly vznikat požadavky na její parametry. Jedním z těchto parametrů je elektrické napětí, kterým je třeba se zabývat napříč elektroenergetikou. A právě principům a prostředkům regulace napětí jsou věnovány následující kapitoly.

2 Regulace napětí v přenosových a distribučních soustavách

2.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava je systém, který zajišťuje výrobu, přenos, distribuci a spotřebu elektrické energie. Jedná se zejména o elektrárny, transformační stanice, vedení, ale i o prostředky pro kompenzaci, jištění a měření jednotlivých parametrů elektrické energie. Podle povinností, fungování a provozovatele se v ČR pak rozlišuje na soustavu přenosovou a distribuční.

2.1.1 Popis přenosové soustavy

Přenosovou soustavu v ČR provozuje ČEPS, a. s., jejímž výhradním vlastníkem je stát. Provozovateli přenosové soustavy ukládá energetický zákon povinnost zajištění bezpečného a spolehlivého provozu. Tím se myslí samotný provoz soustavy, její obnova a rozvoj, zabezpečení výkonové rovnováhy a spolupráce se sousedními provozovateli přenosových soustav.

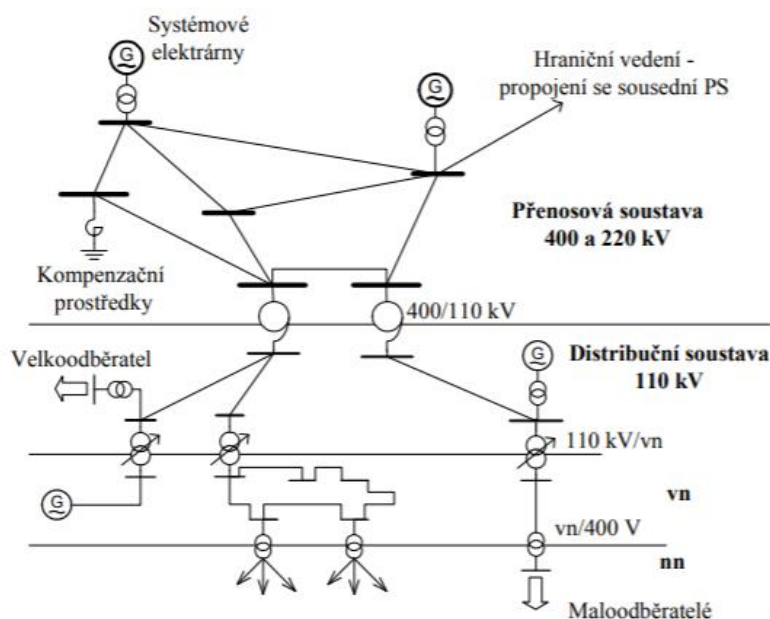
Většina výroby se uskutečňuje ve velkých systémových elektrárnách (výkony v řádech stovky MW), kde se na zpravidla synchronních alternátorech generuje napětí v jednotkách kV, které se v přilehlých transformátorech zvyšuje nejčastěji na 400 kV. Za těmito transformátory pak začíná přenosová soustava vedoucí do nedaleké rozvodny, ze které se vyvádí výkon do přenosové soustavy. Přenosová soustava slouží především pro transport na velké vzdálenosti, kvůli čemuž se využívá vyšších napěťových hladin – velmi a zvláště vysoké napětí, čímž se omezují Jouleovy ztráty. Kromě zmíněného napětí 400 kV je v České republice provozována v přenosové soustavě ještě napěťová hladina 220 kV a 110 kV. Prvně jmenovaná byla vybudována před rozhodnutím provozovat i vyšší napěťovou hladinu a již není v plánu její další rozšiřování. Vedení 110 kV slouží pro náhradní krizové napájení elektráren či rozvoden a jedná se tak jen o krátké úseky.

2.1.2 Popis distribuční soustavy

Distribuční soustavy jsou napojeny na soustavu přenosovou (na rozdíl od lokálních distribučních sítí), a tak slouží k dodávání elektrické energie ke spotřebitelům. Proto počet vedení a jejich délka je řádově větší oproti soustavě přenosové. V České republice se provozují zpravidla napěťové hladiny 110, 35, 22 a 0,4 kV, avšak existují i hladiny jiné, které se již nerozšiřují s cílem soustavy unifikovat. Distribuční sítě spravují provozovatelé

distribučních soustav (PDS), což jsou fyzické či právnické osoby, které mají licenci na distribuci elektřiny. Provozovatel distribuční soustavy má povinnost připojit a distribuovat elektřinu každému, kdo o to požádá a zároveň splňuje povinnosti dané energetickým zákonem a pravidly provozování distribuční soustavy.¹

Cílem provozovatele distribuční soustavy je zajištění spolehlivosti dodávky elektřiny. Tedy snaha vyvarovat se výpadkům elektřiny a udržovat její kvalitu. S ohledem na rozsáhlost distribučních sítí je to nelehký úkol. Na druhou stranu porucha a případný výpadek prvků v přenosové soustavě má dalekosáhlejší dopad na soustavu jako celek. Přiblížení celé elektrizační soustavy je na obrázku níže.



Obrázek 1: Zjednodušené znázornění elektrizační soustavy²

1 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav [online]. 2016, 80 stran [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds_2016.pdf

2 MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

2.2 Požadavky na dodávané napětí

Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí popisuje norma ČSN EN 50160 - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Tato norma je pro provozovatele distribučních soustav právně závazná a určuje nejzásadnější parametry elektrické energie jako jsou: kmitočet sítě, velikost napájecího napětí, odchylky napájecího napětí, krátkodobé poklesy napájecího napětí aj.^{3, 4}

Tato norma je pro regulaci napětí důležitá zejména kvůli odchylce napájecího napětí, jelikož pro hladiny nízkého a vysokého napětí udává:

„Za normálních provozních podmínek, kromě období s přerušením, odchylka napájecího napětí nemá přesáhnout $\pm 10\%$ jmenovitého napětí U_n .“⁵

Povolené odchylky napájecího napětí ze sítě VVN norma nepopisuje, „protože počet uživatelů napájených přímo ze sítě VVN je omezen a obvykle mají individuální smlouvy.“⁶

Pro provozovatele distribuční soustavy je také podstatné dodávané napětí z přenosové soustavy. Odchylka napájecího napětí dodávaného z přenosové do distribuční soustavy nesmí přesáhnout 10 % jmenovité hodnoty napětí u napěťové hladiny 110 kV a 220 kV, u nejvyšší napěťové hladiny v ČR 400 kV je to pak 5 %.⁷

Předávací místo			
Distribuční síť		PS/DS	
Napěťová hladina	Dovolený rozsah	Napěťová hladina	Dovolený rozsah
0,4 kV	0,4 kV $\pm 10\%$	110 kV	110 kV $\pm 10\%$
22 kV	22 kV $\pm 10\%$	220 kV	220 kV $\pm 10\%$
35 kV	35 kV $\pm 10\%$	400 kV	400 kV $\pm 5\%$

Tabulka 1: Dovolené odchylky napětí dané normou ČSN 50160 a pravidly provozování distribučních soustav

3 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 3 [online]. 2011, , 43 stran [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf

4 ČSN EN 50160 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

5 Tamtéž.

6 Tamtéž.

7 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 3 [online]. 2011, , 43 stran [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf

2.3 Fyzikální princip regulace napětí

Dodávku elektrické energie v třífázové soustavě doprovází úbytky napětí dané vztahem:

$$\Delta U_f = ZI = (R + jX)(I_{\check{c}} \mp jI_j)_{KAP}^{IND} \quad (V; \Omega, A; \Omega, \Omega, A, A) \quad (1)$$

Po roznásobení závorek a rozšíření $3U_f$ dostaneme

$$\Delta U_f = \frac{3U_f(RI_{\check{c}} \pm XI_j + jXI_{\check{c}} \mp jRI_j)_{KAP}^{IND}}{3U_f} \quad (V; V, \Omega, A, \Omega, A, \Omega, A, \Omega, A, V) \quad (2)$$

Při zanedbání imaginárních členů v čitateli můžeme uvažovat pouze reálnou část:

$$\Delta U_f = \frac{(RP \pm XQ)_{KAP}^{IND}}{3U_f} \quad (V; \Omega, W; \Omega, VAr, V) \quad (3)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že úbytek napětí souvisí s činným i jalovým výkonem a dále je vidět, že jalový výkon může způsobit úbytek kladný i záporný, tedy přírůstek. Porovnáním skutečného úbytku napětí a úbytku napětí vznikajícího pouze činnou složkou výkonu dostaneme vztah:

$$\frac{\Delta U_{PQ}}{\Delta U_P} = \frac{(RP \pm XQ)_{KAP}^{IND}}{RP} = \left(1 \pm \frac{X}{R} \cdot \frac{Q}{P}\right)_{KAP}^{IND} \quad \left(V, V; \Omega, W, \Omega, VAr, \Omega, W; \Omega, \Omega, VAr, W\right) \quad (4)$$

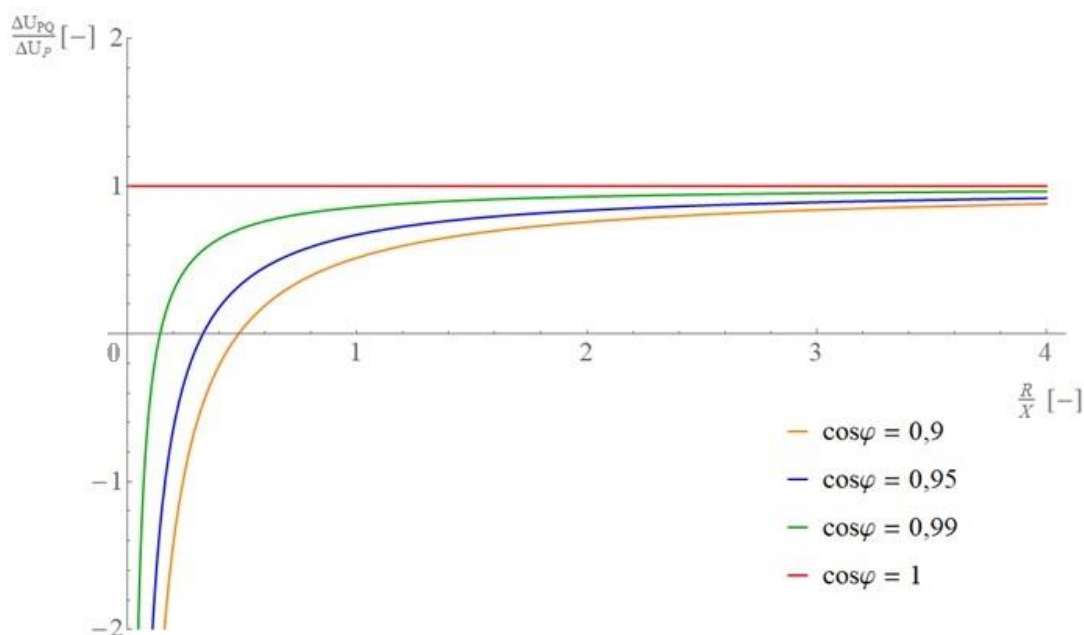
Vyjádřením poměru jalového a činného výkonu pak dostaneme výsledný vztah:

$$\left(1 \pm \frac{X}{R} \cdot \frac{Q}{P}\right)_{KAP}^{IND} = 1 \pm \frac{X}{R} \cdot \text{tg } \varphi \quad (\Omega, \Omega, VAr, W; \Omega, \Omega, -) \quad (5)$$

kde X/R je poměr reaktance a činného odporu celkové napájecí cesty od nadřazené soustavy až k danému prvku soustavy. Tato rovnice se týká spotřebitelského systému, ale vzhledem k tomu, že v kapitolách 4 a 5 je řešena regulace napětí pomocí připojování výroben, je zapotřebí uvést vztah z pohledu výrobního systému. Dodávaný činný výkon souvisí s nárůstem napětí v konkrétním místě, a proto je dále pro další úvahy posuzován pouze induktivní charakter jalového výkonu, který toto zvýšení napětí snižuje. Proto se rovnice (5) změní do tvaru:

$$\left(1 \pm \frac{X}{R} \cdot \frac{Q}{P}\right)_{IND}^{KAP} = 1 - \frac{X}{R} \cdot \text{tg } \varphi \quad (\Omega, \Omega, VAr, W; \Omega, \Omega, -) \quad (6)$$

S poměrem reaktance a činného odporu se standardně pracuje s převrácenou hodnotou, tedy R/X . Pokud uvedený poměr napětí vyneseme jako funkci poměru R/X při konstantním účinníku, dostaneme závislosti uvedené níže.



Obrázek 2: Napěťová citlivost na jalový výkon při různém poměru R/X

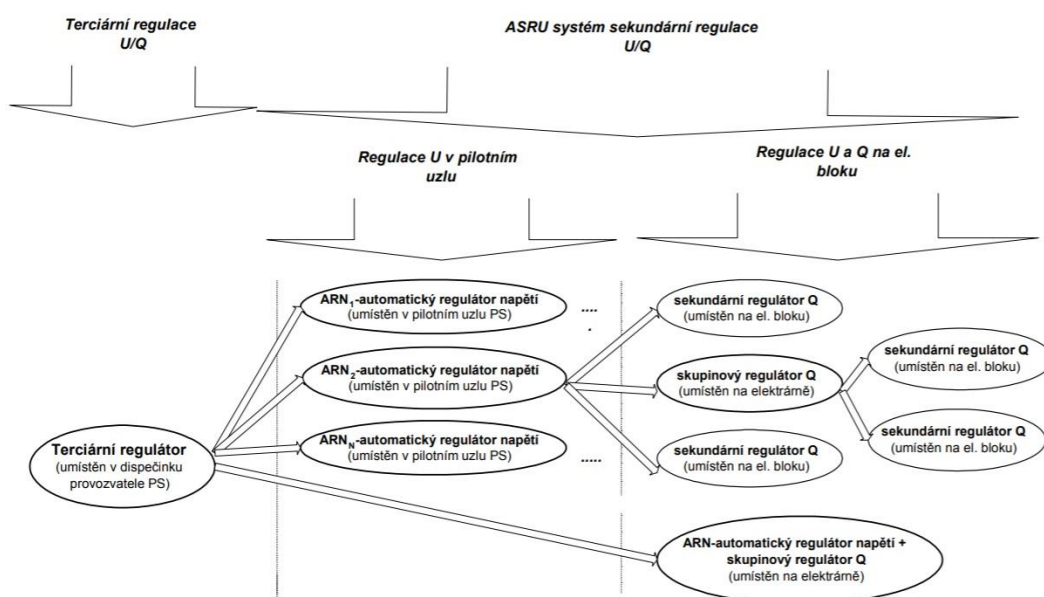
Z tohoto obrázku je patrné, že při účinníku rovnému jedné je poměr těchto úbytků také roven jedné a z toho vyplývá, že vnesený poměr úbytků napětí nezávisí na poměru R/X, jelikož úbytek napětí je v obou případech způsoben pouze činnou složkou impedance. Další vnesené závislosti mají induktivní charakter, nicméně tangens je lichá funkce, a proto by závislosti pro stejné hodnoty účinníku opačného charakteru byly osově souměrné k závislosti $\cos \varphi = 1$. S dodávaným jalovým výkonem se tedy napětí v místě připojení mění v závislosti na jeho charakteru – kapacitní charakter napětí zvyšuje, a naopak induktivní snižuje. Jakýkoliv dodávaný výkon však přesto závisí na poměru R/X. Tento parametr je z pohledu regulace napětí zásadní. Obecně lze tvrdit, že síť s nižší napěťovou hladinou se vyznačují větším poměrem R/X, a z toho důvodu jsou méně napěťově citlivé na jalový výkon. Konkrétními případy napěťové citlivosti se zabývá druhá polovina této práce.

Tato možnost regulace však s sebou nese i ztráty způsobené jalovým proudem, a proto se reálně používá jen v určité míře, kterou udávají pravidla provozování přenosové a distribučních soustav s ohledem na optimální provoz soustavy.

2.4 Regulace napětí v přenosové soustavě

Přenosová soustava v České republice má okružní charakter, a proto se regulace napětí uskutečňuje pomocí koncepce pilotních uzlů. Tyto uzly jsou elektrické stanice, do kterých jsou připojeny elektrárny schopné regulovat napětí za pomoci jalového výkonu. Tyto body jsou zásadní, jelikož slouží jako opěrné body pro hierarchické řízení v přenosové soustavě, což vede ke koordinaci jednotlivých prvků sloužící k regulaci napětí a jalových výkonů.^{8,9}

Regulace napětí a jalových výkonů se dá ve zmíněné hierarchii rozdělit do tří stupňů – primární, sekundární a terciární.



Obrázek 3: Hierarchie regulace napětí a jalových výkonů v elektrizační soustavě¹⁰

2.4.1 Automatická sekundární regulace napětí (ASRU)

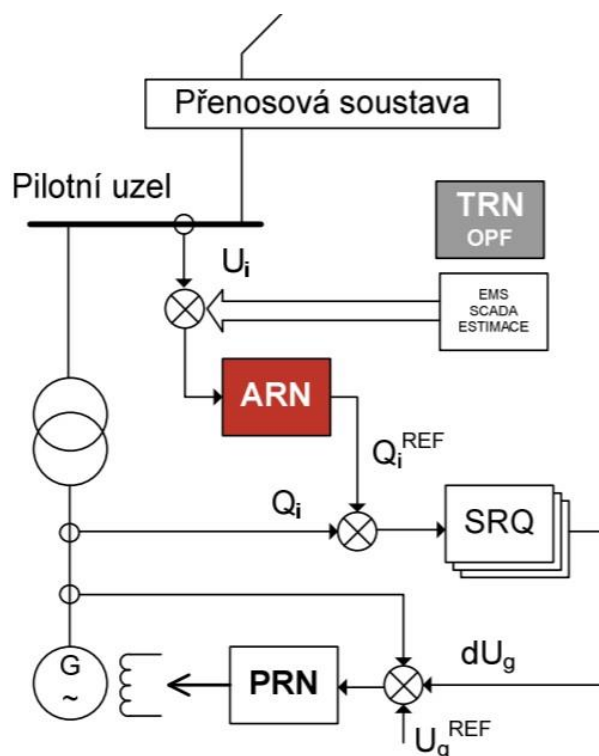
Automatická sekundární regulace napětí je systém, který v pilotním uzlu udržuje napětí pomocí sekundárního regulátoru jalového výkonu (SRQ) a automatického regulátoru napětí (ARN). ARN reaguje na odchylku zadaného požadovaného napětí oproti aktuálnímu napětí v pilotním uzlu a stanovuje potřebný jalový výkon pro vyrovnání dané odchylky. Tento výkon je vypočítáván z tzv. citlivostního koeficientu $\Delta Q/\Delta U$, který udává, jaké množství jalového výkonu je potřeba dodat do pilotního uzlu, aby se změnilo napětí o požadovanou hodnotu. Nejčastěji se udává jako MVar/kV. Sekundární regulátor jalového výkonu

8 MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

9 HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. Energetika [online]. 2015, 2015(5), 264-271 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf

10 KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. [online]. Praha: ČEPS, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

následně určí změnu zadaného napětí primárnímu regulátoru, čímž ovlivní buzení synchronního generátoru a tím pádem dodávaný jalový výkon. V mnoha případech bývá součástí elektrárny skupinový regulátor jalového výkonu, který je nutný tam, kde je prováděna regulace pomocí více výrobních bloků. Tento skupinový regulátor pak rozděluje potřebný výkon na jednotlivé bloky tak, aby bylo zajištěno, že zůstane na všech blocích stejná procentní rezerva jalového výkonu.^{11, 12}



Obrázek 4: Principiální schéma regulační struktury koncepce pilotních uzlů¹³

Jednotlivé provedení skupinové regulace popisují pravidla provozování přenosové soustavy:

„1. ARN je umístěn na elektrárně (je součástí řídicího systému elektrárny). Jeho nedílnou částí je potom tzv. skupinový regulátor buzení, který řídí jalové výkony jednotlivých bloků (pulzní nebo analogovou regulací jalového výkonu).“

11 KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. [online]. Praha: ČEPS, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

12 MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

13 Tamtéž.

2. ARN není na elektrárně (je umístěn např. na blízké rozvodně ZVN a VVN), ale jeho součástí je skupinový regulátor buzení elektrárny, který přímo řídí jalové výkony jednotlivých bloků (pulzní nebo analogovou regulací).

3. ARN není umístěn na elektrárně (je umístěn např. na blízké rozvodně ZVN a VVN), ale zasílá na elektrárnu sumární žádanou hodnotu jalového výkonu. Tato je skupinovým regulátorem, který je umístěn na elektrárně, rozdělována na jednotlivé bloky. ¹⁴

Skutečné provedení pak musí být dohodnuto mezi provozovatelem přenosové soustavy a poskytovatelem podpůrné služby. Součástí automatické sekundární regulace napětí jsou také kompenzační tlumivky, které slouží k regulaci napětí, jestliže nejsou regulační rezervy alternátorů dostatečné, avšak užít by se jich mělo ještě před dosažením mezních technických možností synchronních generátorů. Též do automatické sekundární regulace napětí patří i hladinová regulace transformátorů. Jejím úkolem je udržet požadovanou hodnotu napětí na sekundární straně transformátoru, což se tedy netýká pouze pilotních uzlů, ale všech transformátorů vybavených přepínačem odboček pod zatížením zapojených do automatické sekundární regulace napětí. ^{15, 16}

2.4.2 Terciární regulace napětí (TRN)

Výše zmíněné požadované hodnoty napětí v pilotních uzlech určuje terciární regulátor, který je umístěn v dispečinku provozovatele přenosové soustavy. Terciární regulace napětí zajišťuje chod a koordinaci automatické sekundární regulace napětí ve všech pilotních uzlech tak, aby byl zajištěn bezpečný a ekonomický provoz soustavy jako celku a je tedy na vrcholu hierarchie regulace napětí. Jednotlivá kritéria jsou dána především dodržáním stanoveného napětí v pilotních uzlech a omezením technických ztrát. To zahrnuje respektování technických možností v jednotlivých pilotních uzlech, minimalizaci přepínání odboček transformátorů, spínání regulačních tlumivek aj. To vede ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti chodu soustavy a také k jejímu hospodárnému provozu. ^{17, 18}

14 KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. [online]. Praha: ČEPS, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

15 TLUSTÝ, Josef, Jan ŠVEC, Petr BANNERT, Zbyněk BRETTSCHEIDER, Zbyněk KOCUR, Petr MAREČEK, Zdeněk MÜLLER a Tomáš SÝKORA. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.

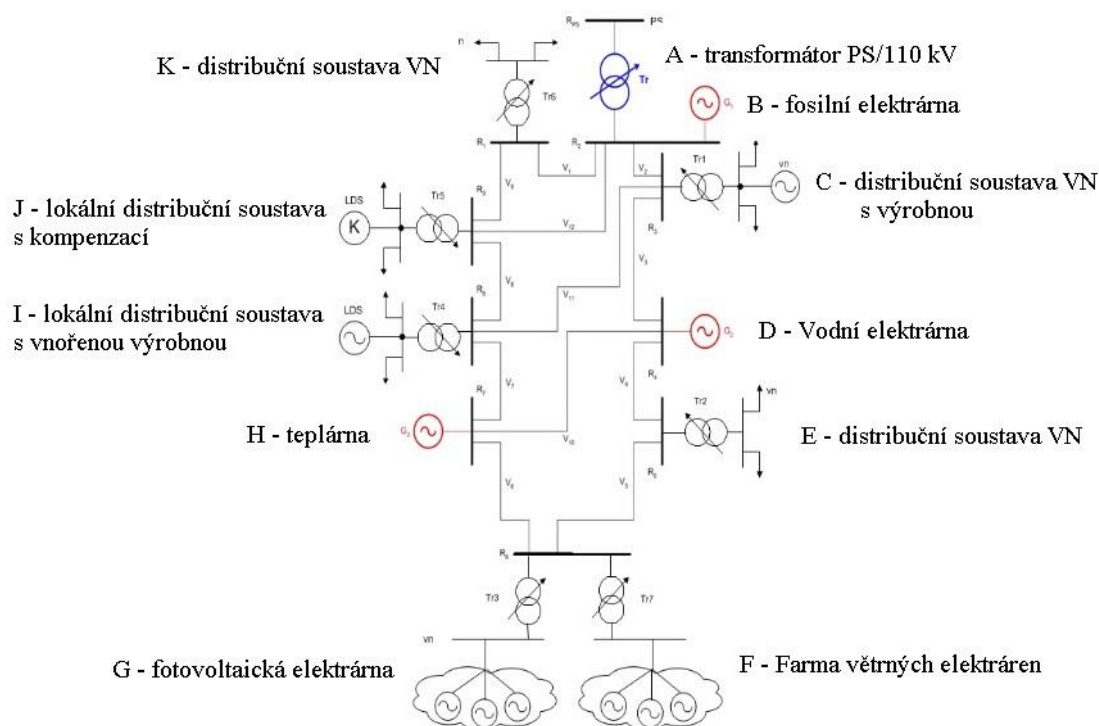
16 MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

17 Tamtéž.

18 KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. [online]. Praha: ČEPS, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

2.5 Regulace napětí v distribuční soustavě

Nejvyšší napěťová hladina 110 kV, jež se v distribučních sítích vyskytuje, představuje nejdůležitější část distribuční sítě, což se projevuje rozdílným provozem. Ten se ve většině distribučních soustav vyznačuje rozdělením na samostatně pracující oblasti (často nazývané uzlové oblasti), z nichž každá má vlastní vazbu na přenosovou soustavu jedním, málokdy dvěma a výjimečně třemi transformátory. Tyto sítě jsou obvykle okružní a jsou do nich připojeny výrobní s výkonem v řádu desítek MW. Stejně jako v přenosové soustavě je zde spolu se sítí VN také provozována automatická sekundární regulace napětí, jejíž princip je popsán v předchozí podkapitole. Příklad uzlové oblasti je zobrazen níže.^{19, 20}



Obrázek 5: Obecná uzlová oblast na napěťové hladině 110 kV²¹

Vzhledem k charakteru distribučních sítí VN a NN, které jsou provedeny v naprosté většině paprskovým rozvodem, je regulace napětí záležitostí lokální v porovnání s mnohonásobně větším počtem předávacích míst, než jak je tomu v přenosové soustavě. Hlavními parametry ovlivňující napětí jsou aktuální zatížení v daném paprsku a dodávaný výkon od výroben zapojených do DS. Tato výrobní zařízení se dělí na výrobní připojené do

19 TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.

20 HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. Energetika [online]. 2015, 2015(5), 264-271 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf

21 HABRYCH, Richard. Regulace napětí a jalových výkonů v distribuční soustavě 110kV [online]. In: . [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10980390-Regulace-napeti-a-jalovych-vykonu-v-distribucni-soustave-110kv.html>

sítě NN a do sítě VN a 110 kV. Rozsah napětí pro obě skupiny výroben v místě připojení do distribuční sítě popisuje příloha 4 pravidel provozování distribuční soustavy.

Výrobní připojená do sítě NN „musí být schopna trvalého provozu, pokud napětí v místě připojení zůstává v rozsahu $U_n - 15\%$ až $U_n + 10\%$. Pokud je napětí nižší než U_n , je dovoleno snížení výstupního výkonu odpovídající relativní změně napětí $(U_n - U)/U_n$ “

„Výrobní elektřiny připojená do sítě VN a 110 kV musí být schopna provozu, pokud napětí v místě připojení zůstává v rozsahu v udané v tabulce níže.²²

Rozsah napětí	Doba provozu
0,85 – 0,90 % U_n	60 minut
0,90 – 1,118 % U_n	neomezená
1,118 – 1,15 % U_n	60 minut

Tabulka 2: Rozsah napětí pro výrobní připojené do sítě vysokého napětí²³

Výrobní zařízení mají povinnost být schopné se při dodávce podílet na udržování napětí. Tuto povinnost lze pak rozdělit na statické řízení napětí a dynamickou podporu sítě.

2.5.1 Statické řízení napětí

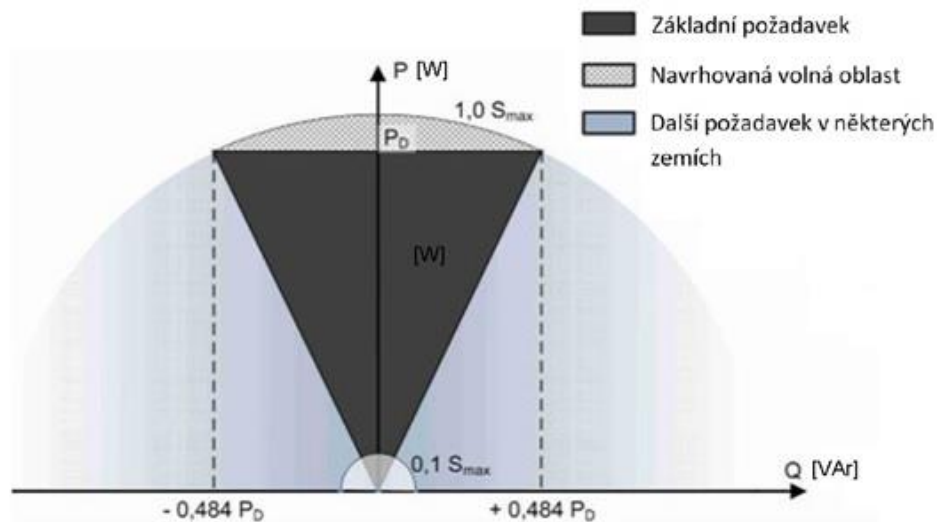
Statické řízení napětí je smluvně dané udržování napětí ve stanovených mezích za normálních provozních podmínek při pomalých změnách napětí. Obecně nemůže být statické řízení napětí chápáno jako podpůrná služba, avšak pokud je výrobní schopna regulovat nad rámec podpory sítě, může provozovatel tuto možnost jako podpůrnou službu využít. A to za podmínky, že ji v daném místě distribuční soustavy vyžaduje. Je-li potřeba, aby se výrobní podílela na udržování napětí v rámci statického řízení napětí, může provozovatel distribuční soustavy požadovat, aby se výrobní zařízení pohybovala pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku 0,90 kapacitní až 0,90 induktivní. Pravidla provozování distribuční soustavy pak ještě rozlišují výrobní zapojené do sítě NN a výrobní moduly nad 11 kW.^{24, 25}

22 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

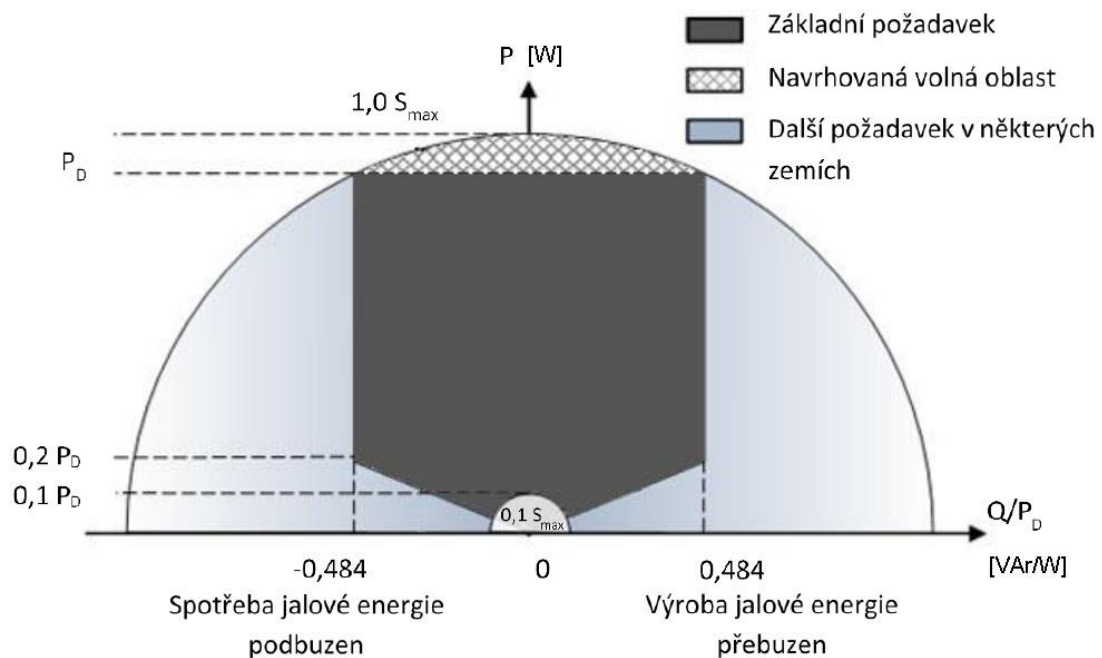
23 Tamtéž.

24 Tamtéž.

25 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 7 [online]. 2011, , 37 stran [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-7.pdf



Obrázek 6: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí v síti NN²⁶



Obrázek 7: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí pro výrobní moduly nad 11 kW²⁷

26 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

27 Tamtéž.

2.5.2 Dynamická podpora sítě

Dynamická podpora sítě je udržování napětí při poklesech sítích VVN a ZVN, které zamezuje odpojení výkonů napájejících sítě NN a VN a celkovému rozpadu sítě. Z tohoto důvodu musí být všechny výrobní pracující do distribuční soustavy zapojeny do dynamické podpory sítě. Je tedy nutné, aby byly vybaveny prostředky, které zabrání odpojení výrobní při poruchách v síti, které doprovází pokles napětí. To platí pro všechny druhy zkratů, tedy jednofázové, dvoufázové i třífázové.²⁸

2.5.3 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Výrobní elektrárny a akumulární zařízení s výkonem do 1 MW, musí být schopné provozu při sníženém činném výkonu. Provozovatel distribuční soustavy tím nezasahuje do řízení výrobní, ale zadává ji požadovanou hodnotu. Ačkoliv tato povinnost souvisí převážně s nepříznivými frekvenčními poměry v síti, i napěťové poměry mohou být důvodem k přistoupení na toto opatření. Provozovatel distribuční soustavy má oprávnění požadovat změnu činného výkonu při následujících stavech v síti:

- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému (např. při předcházení stavu nouze a při stavech nouze)
- nutné provozní práce, popř. nebezpečí přetížení v síti PDS
- nebezpečí vzniku ostrovního provozu
- ohrožení statické nebo dynamické stability
- vzrůst frekvence ohrožující systém
- údržba nebo provádění stavebních prací na zařízení DS nebo v jeho blízkosti

Požadavek přitom musí splnit výrobní do určité doby, kterou pro různé primární zdroje popisuje tabulka níže. Též musí být schopna snížit výkon na 0 %, aniž by se automaticky odpojila celá výrobní od sítě. Změna rychlosti snižování nebo zvyšování činného výkonu musí pak probíhat rychleji jak 2 % jmenovitého výkonu výrobní za minutu, ale ne však rychleji než 40 % jmenovitého výkonu výrobní za minutu.²⁹

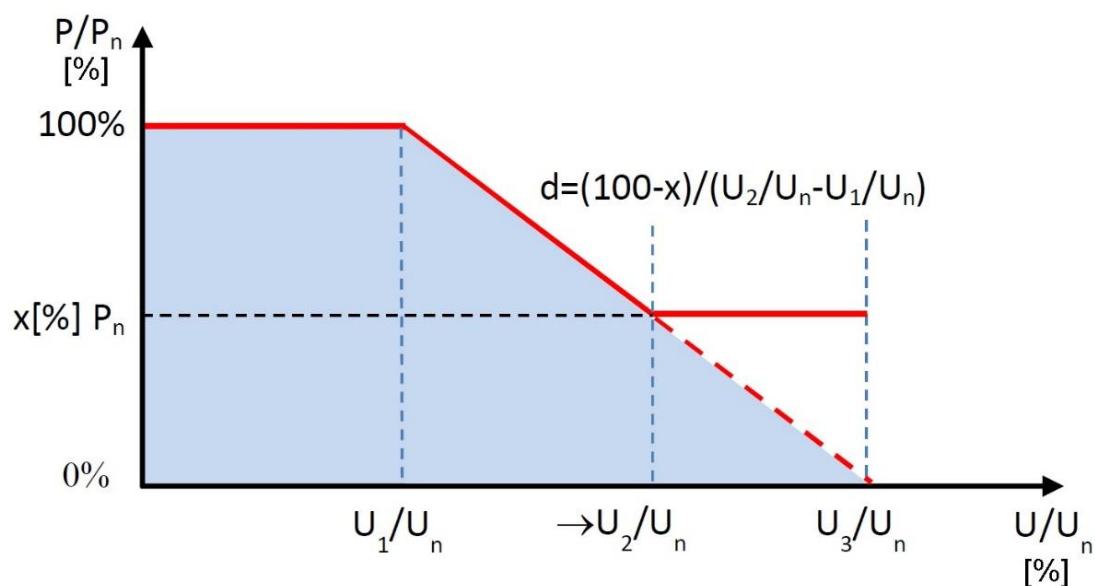
28 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/eede/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

29 Tamtéž.

Primární zdroj	Doba pro dosažení žádané hodnoty činného výkonu
Synchronní výrobní modul	5 minut
Nesynchronní výrobní modul (připojený přes měnič)	1 minuta

Tabulka 3: Doba odezvy na požadavek pro změnu výkonu podle dostupnosti primárního zdroje energie³⁰

Výrobní zapojené do sítě NN pak musí být vybaveny generátory s funkcí pro řízení napětí činným výkonem. Konkrétní hodnoty charakteristické funkce $P(U)$, znázorňující obrázek níže, stanoví provozovatel distribuční soustavy dle síťových podmínek nebo studie připojitelnosti.³¹



Obrázek 8: Charakteristika funkce $P(U)$ ³²

30 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf.

31 Tamtéž.

32 Tamtéž.

2.5.4 Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Výrobní s instalovaným výkonem větším než 100 kVA musí mít jalový výkon říditelný. Standardní rozsah účinníku těchto výroben je v rozmezí 0,90 kapacitní až 0,90 induktivní. Tento rozsah může být s výrobcem smluvně dohodnut i mimo uvedené hodnoty jako zprostředkování podpůrné služby provozovateli distribuční soustavy. Nastavení jalového výkonu je zadáváno dohodou na pevnou hodnotu, podle harmonogramu nebo dálkově online. Žádanou hodnotu určuje provozovatel distribuční sítě podle toho, jak to vyžaduje provoz sítě. Možné žádané hodnoty jsou:³³

- Pevná hodnota jalového výkonu Q fix
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí $Q(U)$
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu $Q(P)$
- Pevná hodnota účinníku $\cos \varphi$ fix
- Hodnota účinníku závislá na napětí $\cos \varphi(U)$
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu $\cos \varphi(P)$
- Zadaná hodnota napětí

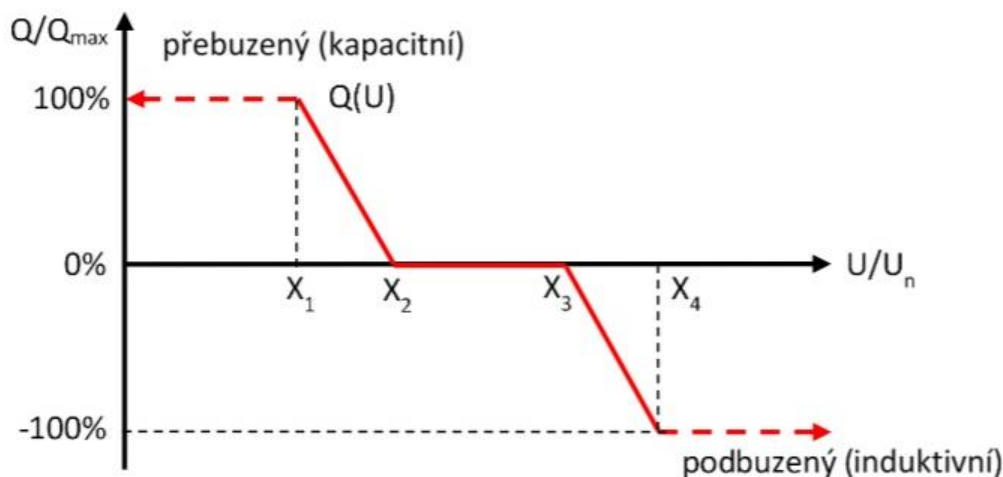
Po zadání charakteristiky $Q(U)$ provozovatelem distribuční soustavy musí být nastavena odpovídající hodnota jalového výkonu pro charakteristiku $\cos \varphi = f(P)$ do 10 sekund a pro charakteristiku $Q(U)$ v rozmezí 10 sekund a jedné minuty. Přesnou hodnotu udá provozovatel distribuční soustavy.³⁴

V sítích nízkého napětí, kde výrobní nedosahují výkonu 100 kVA, se jalový výkon řídí podle charakteristické křivky $Q = f(U)$. Tento způsob řízení jalového výkonu předpokládá velkou penetraci podobných zdrojů, a proto je nutná koordinace jejich parametrů pro bezpečný provoz. Charakteristická křivka $Q = f(U)$ musí být proto nastavitelná a určuje ji vždy provozovatel distribuční soustavy dle místních síťových podmínek nebo studie připojitelnosti. Příklad charakteristické křivky $Q = f(U)$ je zobrazen na následujícím obrázku.³⁵

33 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

34 Tamtéž.

35 Tamtéž.



Obrázek 9: Charakteristika funkce $Q(U)$ ³⁶

Tato charakteristika je definována čtyřmi body, které určují tvar regulační charakteristiky. Osa X odpovídá poměru napětí v místě připojení výrobní ku jejímu jmenovitému napětí. Na ose Y je pak vynesena poměr jalového výkonu dodávaného nebo odebíraného a maximálního možného, který je výrobní schopna dodat či odebrat.

„Bod X_1 : Hodnota poměru U/U_n menší než 1, které odpovídá maximální dodávaný jalový výkon výrobní, pro zvýšení hodnoty napětí v místě připojení.

Bod X_2 : Hodnota poměru U/U_n menší než 1, která je počáteční hodnotou pro dodávku jalového výkonu pro zvýšení napětí v místě připojení.

Bod X_3 : Hodnota poměru U/U_n větší než 1, která je počáteční hodnotou odběru jalového výkonu pro snížení napětí v místě připojení.

Bod X_4 : Hodnota poměru U/U_n větší než 1, které odpovídá maximální odebíraný jalový výkon výrobní, pro snížení hodnoty napětí v místě připojení. “³⁷

36 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

37 Tamtéž.

3 Prvky pro regulaci napětí

Jednotlivé možnosti provedení regulace napětí jsou uvedeny níže i s jejich principy funkce a možnostmi regulace. Konkrétně jde o tyto prvky:

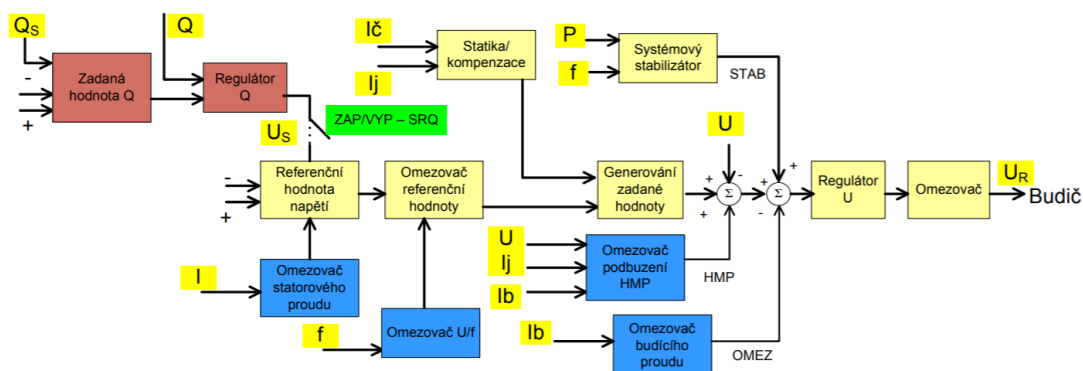
- buzení synchronního generátoru,
- statický kompenzátor VARu (SVC),
- transformátory s možností přepínání odboček pod zatížením,
- střídač,
- linkový kondicionér,
- synchronní kompenzátor.

3.1 Buzení synchronního generátoru

Synchronní generátory, které jsou nejčastěji v uhelných, jaderných, ale i vodních elektrárnách, jsou vybaveny regulátorem buzení. Ten má za úkol udržet na svorkách generátoru požadované napětí v optimálním a bezpečném provozu. Proud v budicím vinutí, které je součástí synchronního generátoru s hladkým rotorem i vyniklými póly, je schopný ovlivnit výstupní hodnotu napětí a charakter dodávané energie.

Součástí regulátoru buzení bývá standardně omezovač statorového a rotorového proudu, který hlídá maximální přípustný proud ve statorovém a rotorovém vinutí. Dále je regulátor vybaven hlídačem meze podbuzení, jehož úlohou je chránit stroj před překročením meze stability, oteplením čelních spojek vinutí a poklesu napětí vlastní spotřeby pod přípustnou mez. Systémový stabilizátor pak tlumí přechodové děje, zejména elektromechanické kyvy. Sekundární regulátor jalového výkonu je také součástí regulátoru buzení, avšak pracuje pouze pokud se reguluje na zadanou hodnotu jalového výkonu. Tím se potlačí činnost primárního regulátoru, což je běžné při práci elektrárenského bloku do pilotního uzlu. Druhý režim, tedy s odpojeným regulátorem jalového výkonu, pak reguluje přímo na danou hodnotu napětí. Zjednodušené schéma regulátoru buzení je uvedeno na další straně.³⁸

38 MÁSLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.



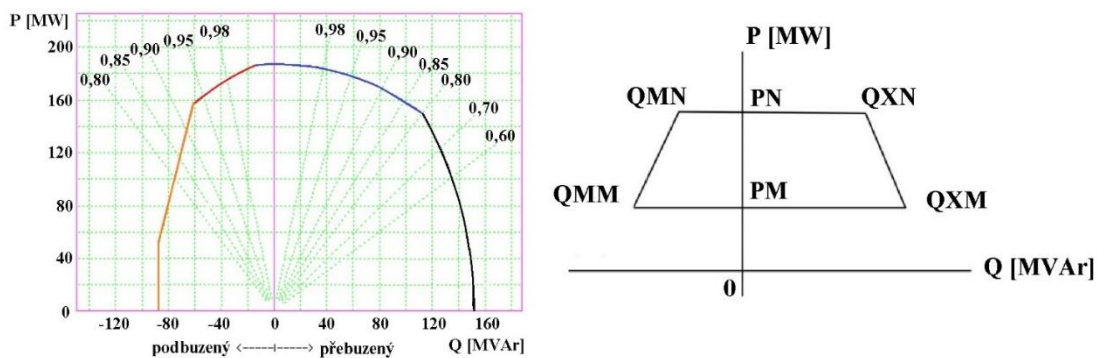
Obrázek 10: Zjednodušené schéma možného zapojení regulátoru buzení³⁹

Buzení synchronních generátorů má však i své hranice, ve kterých mohou pracovat a poskytovat jalový výkon k regulaci napětí. Tato omezení jsou stanovena provozními P-Q diagramy. Na obrázku na další straně je příklad projektovaného a certifikovaného P-Q diagramu. První, uvedený zleva, je součástí projektu daného výrobního bloku a udává celou bezpečnou pracovní oblast generátoru. Certifikovaný diagram je pak součástí smlouvy mezi provozovatelem PS nebo DS v rámci poskytování podpůrné služby.⁴⁰

Oranžová křivka na obrázku P-Q diagramu vymezuje pracovní oblast generátoru z důvodu možného opuštění statické stability s následkem vypadnutí ze synchronismu. Ohraničení červenou křivkou pak představuje omezení z důvodu oteplení čelního prostoru stroje. Ten se ohřívá vířivými proudy důsledkem deformace magnetického toku. Modrá část kružnice je určena maximálním statorovým proudem a černá část naopak proudem rotorovým. V certifikovaném diagramu si lze také všimnout vodorovných hranic při minimálním a maximálním činném výkonu, které jsou dány omezením poháněcího stroje, nejčastěji hnací turbínou. Tyto vodorovné úseky diagramu jsou pak jednoznačně stanoveny maximálními a minimálními jalovými výkony.

39 MÁSLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

40 ŠKACH, Martin a Richard HABRYCH. Podpůrná služba regulace jalového výkonu. Energetika [online]. 2015, 2015(6), 383-388 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_7_2015_habrych.pdf



Obrázek 11: P-Q: diagram synchronního stroje a certifikovaný provozní diagram^{41,42}

3.2 Statický VAr kompenzátor (SVC)

Statické VAr kompenzátory jsou zařízení pracující paralelně k síti a jsou tvořené výkonovými tlumivkami a kondenzátory. Jejich úlohou je odběr nebo dodání jalového výkonu do sítě. Jde o zařízení, které jsou zapojené obvykle přes zvyšovací transformátor, což jim umožňuje pracovat na nižší napěťové hladině, než která je v síti, do které jsou zapojeny. Statický kompenzátor jalového výkonu může být tvořen kombinací následujících prvků:

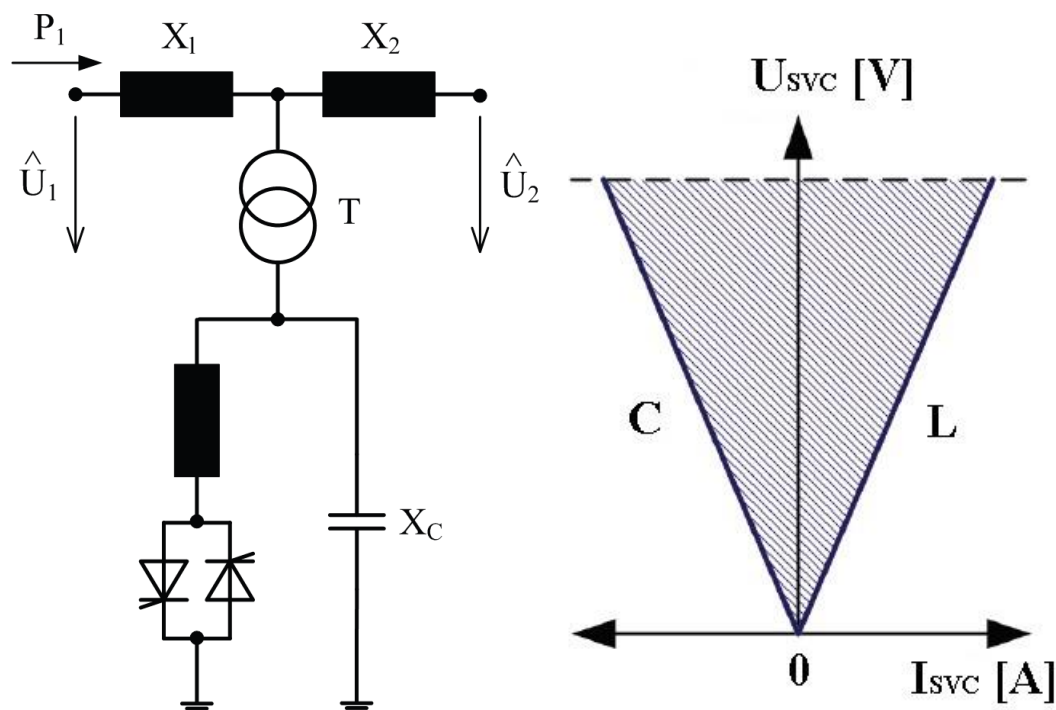
- spínaný kondenzátor (**BSC** – breaker switched capacitor),
- spínaná tlumivka (**BSR** – breaker switched reactor),
- tyristorově řízená tlumivka (**TCR** – thyristor-controlled reactor),
- tyristorově spínaný kondenzátor (**TSC** – thyristor-switched capacitor),
- tyristorově spínaná tlumivka (**TSR** – thyristor-switched reactor).

Spínaný kondenzátor (BSC) a spínaná tlumivka (BSR) jsou prvky, které se pouze připínají nebo odepínají bez možnosti řízení, přičemž je snaha, aby se tyto prvky spínaly v co nejmenší možné míře. Tyristorově řízená tlumivka (TCR) má obvykle vzduchové jádro a je zapojena sériově se dvěma antiparalelními ventily, jenž umožňují obousměrný průchod proudu. Tyto ventily jsou pak fázově řízeny, čímž se reguluje proud procházející tlumivkou. Tyristorově spínaná tlumivka (TSR) je konstrukčně podobná, avšak jak název napovídá, reaktance je připínána nebo odpínána po celých násobcích půlperiod napětí, čímž se možnost řízení omezí na připnutí celé jmenovité hodnoty tohoto prvku. Stejně je tomu u tyristorově spínaného kondenzátoru (TSC). Toto řízení není plynulé, nicméně tyristorové měniče tak

41 MÁSLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

42 HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. Energetika [online]. 2015, 2015(3), 146-152 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_3_2015_habrych.pdf

nevytváří vyšší harmonické, a to je hlavní výhodou těchto prvků. Další výhodou potom může být u tyristorově spínaného kondenzátoru (TSC) sériové zapojení tlumivky, což způsobí omezení proudu v mimořádných podmínkách, a navíc může tato kombinace sloužit jako filtr na danou frekvenci. Příklad zapojení SVC a jeho pracovní V-A oblast je zobrazena níže.⁴³



Obrázek 12: Příklad zapojení SVC a pracovní oblast SVC⁴⁴

Pracovní oblast je dána kapacitní a induktivní reaktancí, což představují ramena vyšrafovaného trojúhelníku. Zbývající strana je dána napětím na zapojených prvcích. Toto omezení souvisí tedy s konstrukcí prvku nebo se zmíněným zvyšovacím transformátorem. Dále je z pracovní oblasti vidět, že maximální kompenzační proud závisí na napětí sítě přímo úměrně a jalový výkon (dodávaný nebo odebraný) kvadraticky.

3.3 Transformátory s možností přepínání odboček pod zatížením

Tato metoda regulace napětí je založena na schopnosti transformátorů měnit svůj převod pomocí zabudovaných odboček. Tyto transformátory pak můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny. S možností přepínat odbočky pouze bez zatížení nebo i pod zatížením. Prvně jmenovaný typ je konstrukčně jednodušší a klasickým příkladem je distribuční transformátor 22/0,4 kV. U toho se musí přepínat odbočky ručně. Odbočky umístěné na straně vyššího

⁴³ Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.

⁴⁴ Tamtéž.

napětí mají většinou pět stupňů po 2,5 %, dohromady rozsah ± 5 %. Odbočka se volí při instalaci tak, aby kompenzovala úbytky způsobené vedením. Další přepnutí odbočky pak většinou souvisí s výraznou změnou zátěže v dané lokalitě. To může být připojení nových spotřebitelů do DS nebo výjimečně změna režimu léto/zima. Jelikož transformátor musí být při přepnutí bez napětí, nelze jej radit mezi akční regulační prvky.⁴⁵

Transformační vazba PS/110 kV je realizována pomocí autotransformátorů, z důvodu lepší účinnosti, ceny i dopravy. Ty mají přepínání odboček na straně sekundárního vinutí. Transformátory 110 kV/VN jsou posledním přechodem mezi napěťovými hladinami, u kterých se nachází dálkově řízený přepínač odboček. Ten je standardně umístěn na straně vyššího napětí s rozsahem $110 \text{ kV} \pm 8 \times 2 \% / \text{VN}$. U hladinové regulace transformátorů, zmíněné v kapitole 2.4.1, do které jsou tyto transformátory zapojeny, jde potom o správné nastavení regulačních konstant. To jsou časové konstanty T_{MAX} a pásma necitlivosti ΔU_{NEC} . Ty jsou odlišné pro napěťové hladiny a transformátory s různou změnou převodu o jednu odbočku. Časové konstanty se volí odstupňovaně tak, aby se při odchylkách napětí způsobené kolísáním (například změnou zátěže) v síti vyššího napětí zabránilo plošné regulaci transformátorů v nižší napěťové hladině. Pásmo necitlivosti je pak i s časovými konstanty důležité pro koordinaci s jinými akčními prvky automatické sekundární regulace napětí. Tyto správně nastavené regulační konstanty zamezují vzájemnému ovlivňování těchto automatik.^{46, 47}

3.4 Střídače

Střídač je polovodičový měnič, jehož činnost je založena na přeměně stejnosměrné energie na střídavou. Jelikož se podíl vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR pohybuje v posledních letech v jednotkách procent a fotovoltaické elektrárny tvoří zhruba třetinu této hodnoty, je dále vysvětlen princip řízení střídače u fotovoltaické elektrárny, jímž je připojena do distribuční soustavy každá fotovoltaická elektrárna.⁴⁸ Moderní střídače jsou schopné dodávat jalový výkon pomocí řízení výstupního úhlu mezi napětím a proudem, čehož dosahují pomocí rychle spínacích polovodičových součástek, zejména pak pomocí bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem (IGBT) řízených pulzně

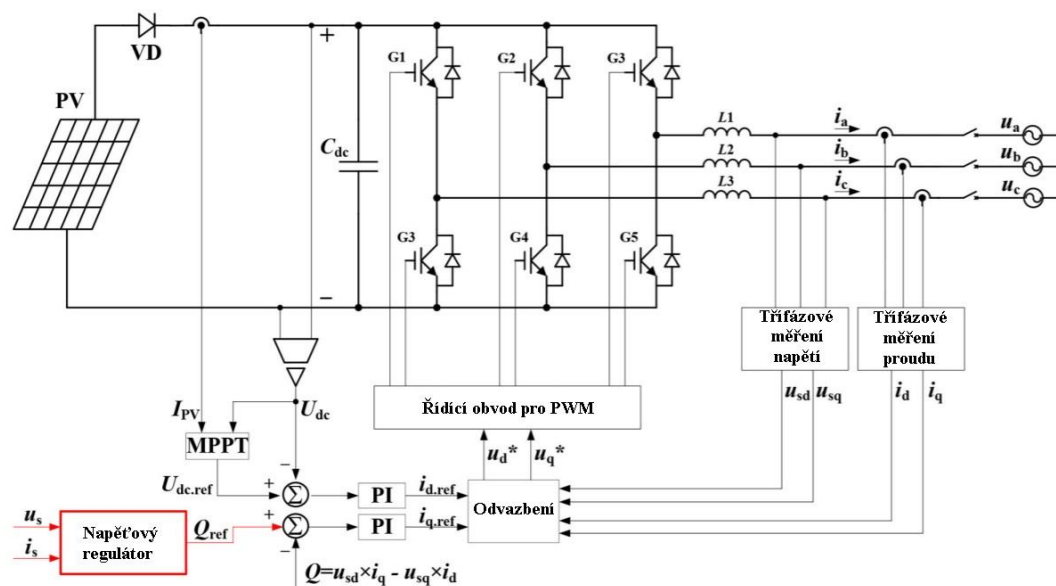
45 TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8

46 Tamtéž.

47 DOLEŽAL, Jaroslav a Karel WINTER. Regulace napětí a jalového výkonu – současnost a trendy. Elektro. 2002, 2002(11), 8-10.

48 Statistika – Národní energetický mix. OTE [online]. [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>

šířkovou modulací. Principiální schéma střídače připojeného k fotovoltaickému panelu je zobrazeno níže.



Obrázek 13: Princip řízení střídače⁴⁹

Cílem regulace fotovoltaické elektrárny je generování maximálního činného výkonu. K tomu slouží sledovač bodu maximálního výkonu (MPPT). Ten vyhodnocuje velikost stejnosměrného proudu generovaného fotovoltaickým panelem, čemuž přizpůsobuje hodnotu stejnosměrného napětí. Podle požadavků provozovatele distribuční soustavy (uvedeny v podkapitole 2.5) se řídí napěťový regulátor, který vyhodnotí referenční jalový výkon. Pokud je požadovaná hodnota rozdílná od aktuálně vyráběného jalového výkonu, měřeného na výstupu střídače, regulátor určí žádanou hodnotu činné a jalové složky, podle čehož se řídí šířkově pulzní modulace pro spínání IGBT.⁵⁰

⁴⁹ XIANGQIAN, Tong, Zhong MINGHANG, Zhang XIAOQING, Deng JUN a Zhang ZHIHUA. *Voltage regulation strategy of AC distribution network based on distributed PV gridconnected inverter* [online]. 2018, , 4 strany [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/joe.2018.8680>

⁵⁰ Tamtéž.

3.5 Linkový kondicionér

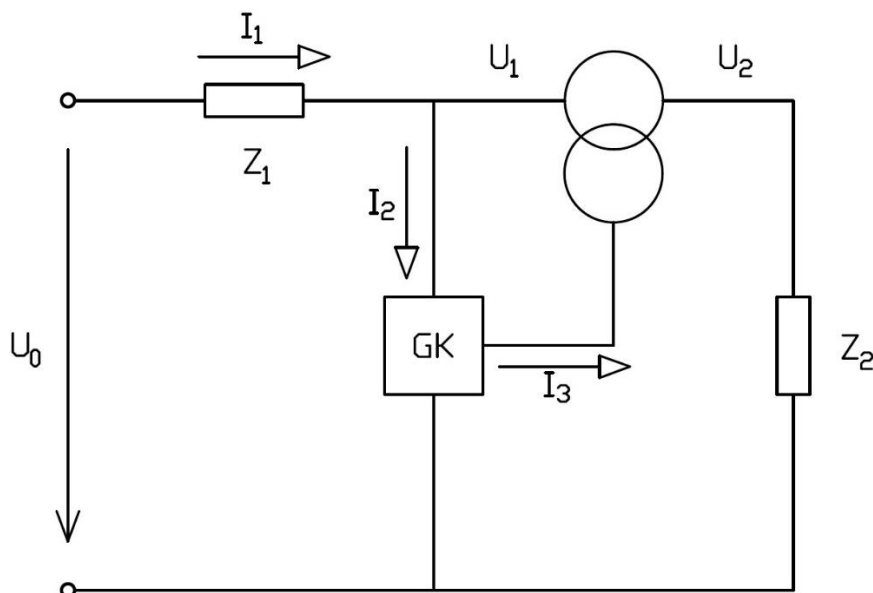
Linkový kondicionér je zařízení, jehož činnost je založena na principu sériové kompenzace změn síťového napětí. K tomu dochází díky sériovým transformátorům napájených měničem řízeným pulsně šířkovou modulací. Je schopný vylepšit kvalitu elektrické energie, zejména se pak používá k eliminaci kolísání napětí, flikru a vyrovnávání poklesu napětí. Linkové kondicionéry obecně mohou i odstraňovat nesymetrie napětí, kompenzovat účiník nebo snižovat efektivní hodnotu napětí, avšak závisí to na provedení vstupních a výstupních měničů. Tato provedení bývají nákladnější a mohou být použita např. pro zabezpečení kvality napájení v průmyslových sítích, velkých budov aj.⁵¹

Tento prvek se využívá zejména v dlouhých výběžcích distribučních sítí nízkého napětí před odběrným místem tak, aby na tomto místě byly splněny potřebné parametry, jak je popsáno v kapitole 2.2. Aby to mohl linkový kondicionér splnit při odběru i výrobě spotřebitele, je nutné, aby jeho měničová část byla schopná pracovat i v rekuperačním režimu.⁵²

Vstupní napětí U_0 , představující přípojný bod vysokého napětí nebo začátek vedení nízkého napětí, se vždy považuje za uspokojující a řešené úbytky či jiné nežádoucí jevy jsou zapříčiněny impedancí vedení nebo zpětnými vlivy spotřebičů připojenými do sítě.

⁵¹ KORENC, Vladimír, Zdeněk MATOUŠEK a Ctibor PETRŮ. *Linkové kondicionéry a jejich užití* [online]. [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20160741-Linkove-kondicionery-a-jejich-uziti.html>

⁵² Linkový kondicionér. *ELCOM* [online]. [cit. 2019-08-29]. Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/vykonove-specialni-menice/vylepseni-kvality-elektriny/linkovy-kondicioner>



Obrázek 14: Schéma připojení linkového kondicionéru k síti⁵³

G_K – linkový kondicionér (měničová část)

I_1 – proud do zátěže [A]

I_2 – proud do měniče kondicionéru [A]

I_3 – proud do primáru TS ($I_3 = I_1 / p$) [A]

U_0 – napětí síťového zdroje [V]

U_1 – napětí na vstupu kondicionéru [V]

U_2 – napětí na výstupu kondicionéru ($U_2 = U_0$) [V]

T_s – sériový transformátor kondicionéru

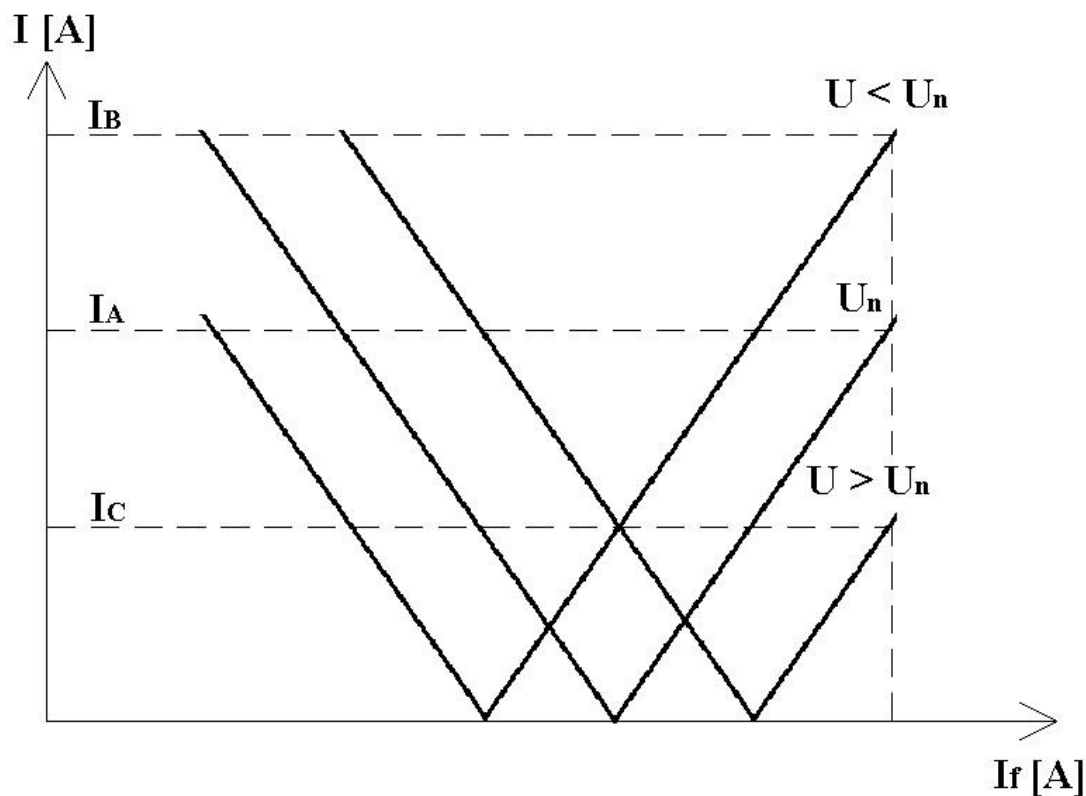
Z_1 – impedance vedení (linky) [Ω]

Z_2 – impedance zátěže [Ω]

3.6 Synchronní kompenzátor

Synchronní kompenzátor se v dnešní době takřka již nevyužívá, nicméně patří mezi prostředky k regulaci napětí. Jedná se o synchronní stroj s odlehčenou konstrukcí, který není mechanicky zatížen. Stejně jako u synchronních generátorů se ovlivňuje dodávání či odebrání jalového výkonu budícím proudem. Přebuzený synchronní kompenzátor dodává jalový výkon, čímž zvyšuje napětí v místě připojení, a naopak se chová podbuzený. Přitom dodává do sítě žádný nebo minimální činný výkon. Synchronní kompenzátory jsou vybaveny regulátory napětí, které regulují budící proud tak, aby v daném místě udržoval konstantní napětí. Charakteristické vlastnosti synchronního kompenzátoru ukazují jeho V- křivky. Ty jsou při různých napětích znázorněny níže.

⁵³ Linkový kondicionér. *ELCOM* [online]. [cit. 2019-08-29]. Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/vykonove-specialni-menice/vylepseni-kvality-elektriny/linkovy-kondicioner>



Obrázek 15: V-křivky synchronního kompenzátoru při různých napětích sítě⁵⁴

Z těchto křivek je vidět, že při poklesu napětí v síti se zvýší dodávaný jalový proud z hodnoty I_A na I_B , čímž synchronní kompenzátor působí proti poklesu napětí v síti. Analogicky s opačným účinkem se pak chová při zvýšení napětí v síti.⁵⁵

⁵⁴ MĚŘIČKA, Jiří a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vydání druhé. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01020-1.

⁵⁵ Tamtéž.

4 Analýza vlivu činného a jalového výkonu na napětí v distribuční síti

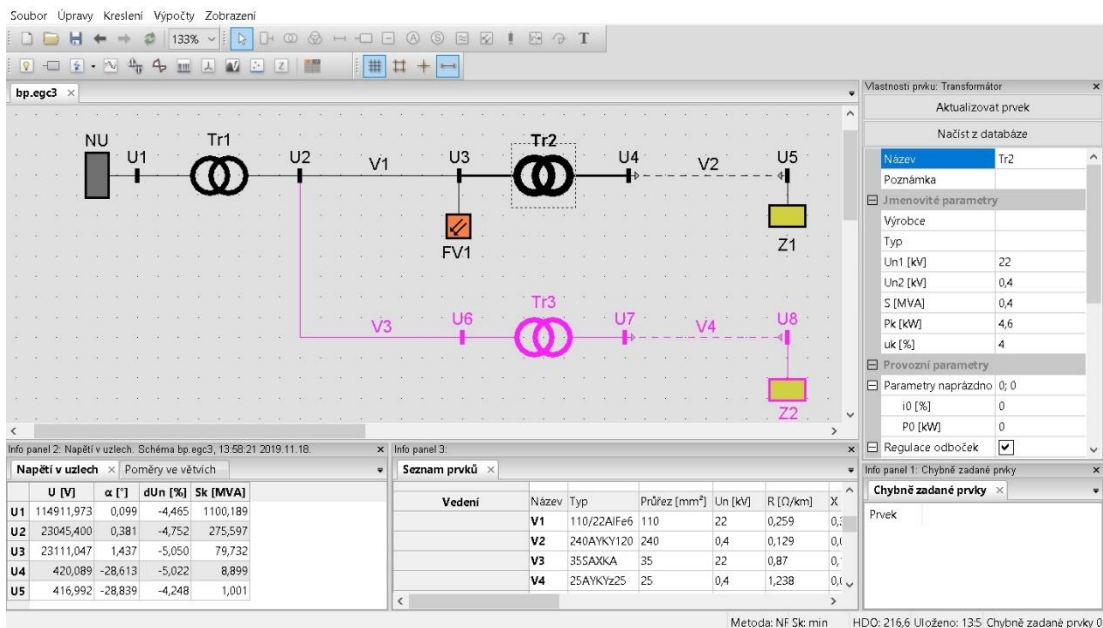
4.1 Úvod

Druhá polovina této práce, a tedy část praktická, je zpracována za pomoci programu E-Vlivy 3 od společnosti EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o. Jde o software sloužící k modelování a analýze sítí NN, VN, VVN i ZVN. Přestože je ovládání i zobrazení programu dost názorné a přehledné, hodí se prostředí programu alespoň krátce popsat, a to i vzhledem k výskytu dalších snímků s konkrétními modely použitými dále v analýzách.

4.2 Popis softwaru E-Vlivy 3

Základní částí je pracovní plocha, kde uživatel vytváří topologii sítě se všemi prvky, které k ní patří. Obrázek uvedený níže je pouze názorný, avšak obsahuje jen takové prvky, které se objevují dále v práci. Mezi ně patří napájecí uzel (NU), transformátor (Tr), vedení (V), fotovoltaická elektrárna (FV) a zátěž (Z). Zmíněné vedení se pak dělí ještě na venkovní zobrazené plnou čarou a kabelové, které je vyjádřené čarou přerušovanou. Poslední zobrazený jev na ilustračním obrázku je funkce pasivování prvku. To znamená, že program pasivovaný prvek nezahrnuje do výpočtů. Uživatel tak nemusí daný prvek či prvky odstraňovat a následně opět vkládat. Takový prvek je pak úplně nebo částečně vybarven růžovou barvou.

Po kliknutí na jakýkoliv prvek, se napravo od pracovní plochy ukáže infopanel s parametry daného prvku. Hodnoty může uživatel vložit ručně nebo načíst z databáze, přičemž s ohledem na maximální věrohodnost výsledku analýz je dále v práci využita druhá zmíněná možnost. Po navolení všech potřebných parametrů může uživatel spustit chod sítě, tedy simulaci ustáleného stavu. V levém dolním rohu se pak ukáže další infopanel popisující tento chod s údaji zvolenými uživatelem. Pro lepší přehled lze mít zapnuté další okno se seznamem, který obsahuje všechny prvky nacházející se ve schématu. Přesně tak to je i na ilustračním obrázku na další straně.



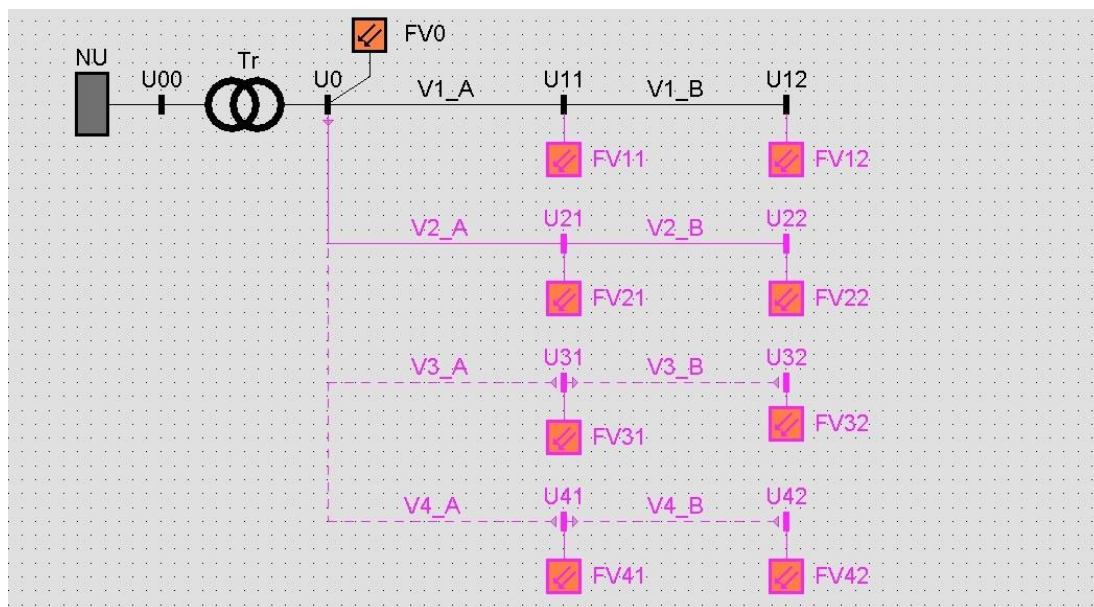
Obrázek 16: Prostředí programu E-Vlivy 3

4.3 Vliv činného a jalového výkonu na napětí v distribuční síti

Jak je uvedeno v kapitole 2.3, úbytky napětí jsou spojeny s činným i jalovým výkonem. Tyto poznatky jsou zásadní pro regulaci napětí, avšak ve skutečnosti záleží na mnoha dalších souvislostech – přesných parametrech, provedení a konfigurace sítě. Jelikož má však distribuční síť rozvod především paprskový, budou se tato i další kapitoly věnovat výhradně paprskovému vývodu.

4.3.1 Parametry vedení ovlivňující regulaci napětí

Zmíněné a dále probírané parametry jsou: napěťová hladina, typ vedení a jeho průřez, vliv vzdálenosti od transformátoru a zatížení sítě. Pro posouzení těchto parametrů lze použít jednoduché schéma, které je znázorněno níže.



Obrázek 17: Schéma paprsků pro posouzení vlivu činného a jalového výkonu na napětí

Nejdůležitější z parametrů je jmenovité napětí v síti, jelikož na základě toho je volen vodič, transformátor aj., což zásadně ovlivňuje parametry důležité pro regulaci napětí. Proto je tato kapitola dále rozdělena na napěťové hladiny VN (22 kV) a NN (0,4 kV), avšak topologie znázorněného schématu je stejná.

V případě VN představuje napájecí uzel a transformátor propojení s distribuční soustavou 110 kV. U NN se jedná o klasický distribuční transformátor (22/0,4 kV) a napájecí uzel znázorňuje opět vyšší napěťovou hladinu, tentokrát 22 kV. Samotné vodiče pocházejí ze zmíněné databáze, přičemž byly vybrány dva venkovní a dva kabelové. Obě tyto varianty mají různé velikosti průřezu pro posouzení i tohoto vlivu. Všechny použité typy vodičů a jejich parametry jsou uvedeny v příslušných podkapitolách. Jednotlivé paprsky jsou rozděleny na poloviny, u VN má každá tato polovina 5 km, u NN 500 m. Tímto způsobem lze pozorovat vliv vzdálenosti od transformátoru v každém paprsku.

Pro všechny uzly u obou napěťových hladin je vypočítána impedance z parametrů udaných u jednotlivých prvků sítě. Pro určení impedance daného uzlu je nutné započítat pouze prvky, které do tohoto uzlu přispívají svojí impedancí, což jsou ty, které jsou před uzlem v celé napájecí trase. Výpočty impedance použitých prvků jsou popsány rovnicemi:

$$Z_{NU} = 1,1 \frac{U_n^2}{S_k} e^{j \cdot \arccot g \left(\frac{R}{X} \right)} \quad (\Omega; V, VA, \Omega, \Omega) \quad (7)$$

$$Z_{Tr} = \frac{P_k}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} + j \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\Omega; W, VA, V, VA; -, V, VA) \quad (8)$$

$$Z_V = R_V + jX_V \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (9)$$

Všechny tyto hodnoty impedancí v ohmech jsou přepočteny na napětí 400 V, kvůli čemuž se hodnoty z vyšších napěťových hladin musely vynásobit čtvercem převodu transformátoru. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v analýze.

4.3.2 Vyhodnocování výsledků získaných ze softwaru E-Vlivy 3

U VN i NN jsou rozebrány vlivy činného i jalového výkonu dodávaného do konkrétního uzlu (U₁₁-U₄₂). Tedy podstatné je pouze to, jaký dopad má připojení fotovoltaické elektrárny v daném bodě. Pro získání všech potřebných hodnot tedy bylo nutné zjistit napěťové poměry v každém paprsku po připojení zdroje s účínkem $\cos \varphi = 1$ a $\cos \varphi = 0,9$ v každém ze tří bodů daného paprsku, a navíc i stav naprázdno, tedy bez připojeného jakéhokoliv zdroje. Tyto hodnoty účínků byly zvoleny záměrně, jelikož u prvně zmíněného lze pozorovat dopad činného výkonu na napětí v paprsku a v druhém případě naopak efekt jalového výkonu. Hodnota $\cos \varphi = 0,9$ pak koresponduje se způsobem řízení jalového výkonu, jak udávají pravidla provozování distribučních soustav popisující kapitola 2.5. Druhá mezní hodnota udávaná v PPDS, tedy $\cos \varphi = -0,9$ má efekt obdobný, avšak změna napětí by byla opačná, a proto stačí rozebrat pouze jeden z těchto případů, což je ještě zmíněno u konkrétních výsledků.

Prvek fotovoltaická elektrárna použitý v softwaru E-Vlivy 3 byl zvolen kvůli jednoduchosti zadávání činného i jalového výkonu. Ve skutečnosti to může být jakýkoliv jiný zdroj, který je schopný regulovat charakter dodávaného výkonu.

Vyhodnocení je pojato jako změna napětí v závislosti na dodávaném výkonu. To nejlépe ukazuje vliv charakteru výkonu připojeného zdroje, což umožnilo pracovat pouze s jednou hodnotou dodávaného výkonu. V simulaci byla použita hodnota 2 MW pro VN a pro NN 10 kW. Výsledky jsou proto popsány za pomoci poměrných jednotek:

$$\frac{\frac{U_{SZ} - U_{BZ}}{U_n}}{P} = \frac{\Delta U_n}{P} \quad (V; V, V, W; \%, W) \quad (10)$$

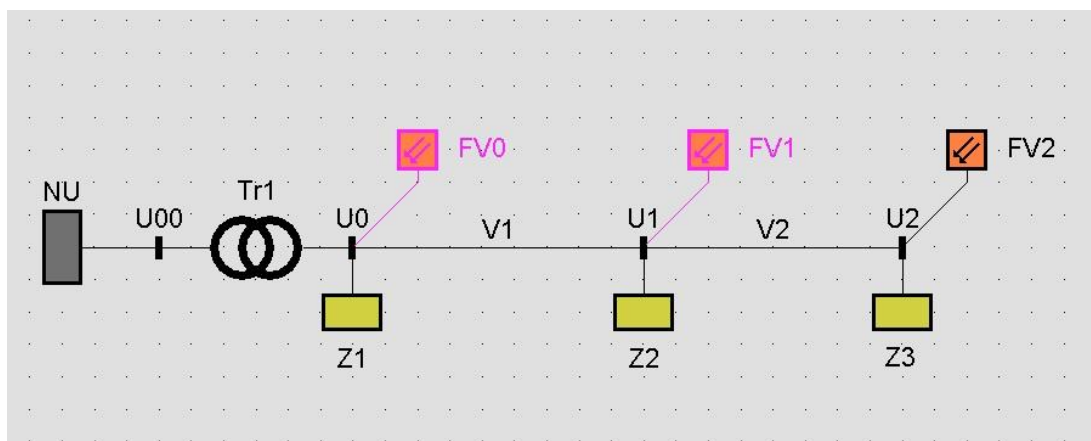
Kde U_{SZ} je hodnota napětí v místě dodávání činného výkonu, U_{BZ} je hodnota napětí v tom samém místě bez připojeného zdroje, U_n je jmenovité síťové napětí, P je dodávaný činný výkon. Způsob vyhodnocení účinků jalového výkonu je analogický:

$$\frac{U_{0,9} - U_1}{U_n} = \frac{\Delta U_n}{Q} \quad [V, V, V, VAR; \%, VAR] \quad (11)$$

Kde $U_{0,9}$ je hodnota napětí v místě dodávání výkonu účinnkem $\cos \varphi = 0,9$, U_1 je hodnota napětí v tom samém místě s připojeným zdrojem dodávající stejný činný výkon s účinnkem $\cos \varphi = 1$, U_n je jmenovité síťové napětí, Q je dodávaný jalový výkon.

4.3.3 Vliv zatížení sítě na regulaci napětí

Posledním vybraným parametrem ovlivňující regulaci napětí je zatížení sítě. Tento jev je dále v práci opět rozdělen na NN a VN, přičemž topologie znázorněná na obrázku níže je také pro obě hladiny identická.



Obrázek 18: Schéma paprskového vývodu pro posouzení vlivu zátěže na regulaci napětí

Princip posuzování regulace napětí popsany v kapitole 4.3.2 je totožný, avšak v tomto případě se v paprskovém vývodu vyskytuje zátěž. Ta představuje v jednom případě 10 % a v dalším 40 % jmenovitého výkonu transformátoru, ke kterému je vývod připojen. Rozložení zátěže bylo zvoleno tak, aby reprezentovalo 5 stejných vývodů. Zátěž Z_1 tak tvoří 80 % celkové zátěže, Z_2 a Z_3 pak 10 %. Účinník byl zvolen $\cos \varphi = 0,95$. Konkrétní hodnoty jsou opět uvedeny u výsledků.

4.4 Analýza citlivosti vlivu regulace napětí na vybrané parametry vedení

V následujících podkapitolách jsou uvedeny tabulky se všemi použitými prvky a jejich parametry, vypočítané impedance jednotlivých uzlů, a nakonec poměrné změny jmenovitých napětí, které jsou vyneseny do grafů pro jasnou interpretaci závěru. Kvůli práci se zmíněným softwarem E-vlivy a následným zpracování velkého množství dat v tabulkovém procesoru, jsou ve vynesení grafů uvedeny znaky procent na osách závislých proměnných i v jednotkách daných veličin. Procentuální změna jmenovitého napětí je vztažena na hladině nízkého napětí na jeden kilowatt a v případě vysokého napětí na jeden megawatt. Hlavním cílem byla srozumitelnost grafů, avšak tato volba řádově koresponduje s reálnými zdroji zapojenými do těchto napěťových hladin.

4.4.1 Vedení nízkého napětí (0,4 kV)

Následující tabulky charakterizují vedení nízkého napětí a uvádí nejdůležitější parametry, které ovlivňují napěťovou citlivost daných uzlů a tím pádem i regulaci napětí.

	Typ vedení	Průřez	Jmenovité napětí	Podélný odpor	Podélná reaktance	Příčná susceptance	Délka
		S [mm ²]	U _n [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	l [km]
V1	70/11-1AlFe6	70	0,4	0,43	0,28	1	0,5
V2	35AlFe6_35	35	0,4	0,97	0,302	1	0,5
V3	240AYKY120	240	0,4	0,129	0,068	1	0,5
V4	70AYKY50	70	0,4	0,442	0,073	1	0,5

Tabulka 4: Parametry vedení použitých v analýze vedení nízkého napětí

	Jmenovité napětí	Provozované napětí	Zkratový proud	Zkratový výkon	Poměr činné a jalové složky vnitřní impedance
Napájecí uzel	U _n [kV]	U _{prov} [kV]	I _{zkr} [kA]	S _{zkr} [MVA]	R/X [-]
NU	22	23	1,0497	40	0,59
	Jmenovité primární napětí	Jmenovité sekundární napětí	Zkratový proud	Ztráty nakrátko	Napětí nakrátko
Transformátor	U _{n1} [kV]	U _{n2} [kV]	S _t [MVA]	P _k [kW]	u _k [%]
Tr	22	0,4	0,4	4,6	4

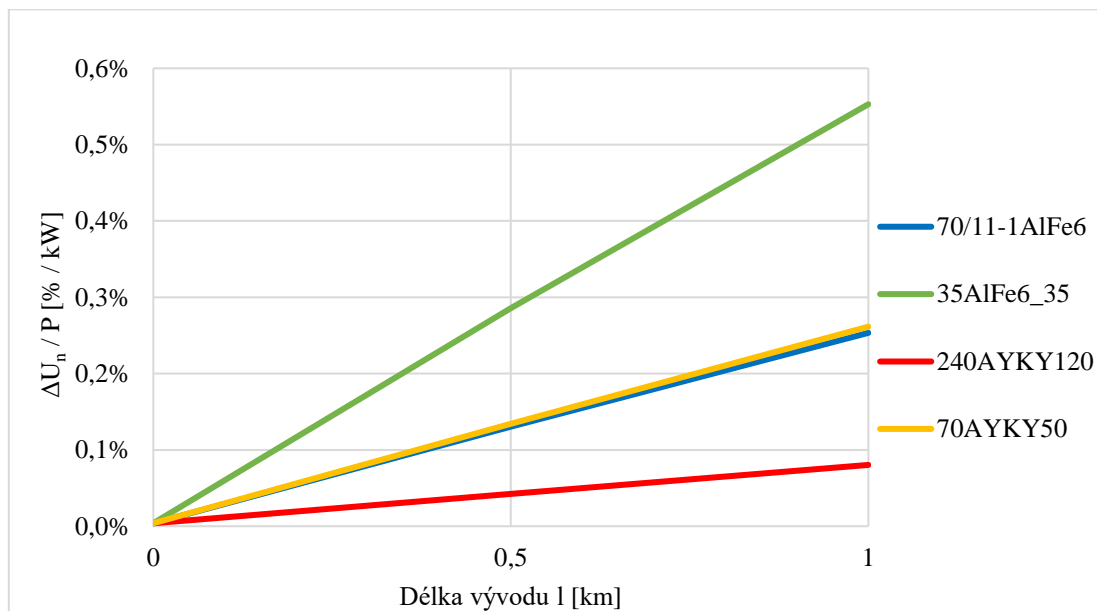
Tabulka 5: Parametry ostatních využitých prvků v analýze vedení nízkého napětí

Uzel	U00	U0	U11	U12	U21
Z [Ω]	0,002+0,004j	0,007+0,02j	0,222+0,16j	0,437+0,3j	0,492+0,171j
R/X [-]	0,500	0,350	1,388	1,457	2,877
Uzel	U22	U31	U32	U41	U42
Z [Ω]	0,977+0,322j	0,072+0,054j	0,136+0,088j	0,228+0,057j	0,449+0,093j
R/X [-]	3,034	1,333	1,545	4,000	4,828

Tabulka 6: Impedance v uzlech paprsků na hladině nízkého napětí

Poměrná změna jmenovitého napětí $\Delta U_n/P$ [%/kW]			
Typ vedení	Délka vedení l [km]		
	0	0,5	1
70/11-1AlFe6	0,0039 %	0,1304 %	0,2534 %
35AlFe6_35	0,0039 %	0,2856 %	0,5530 %
240AYKY120	0,0039 %	0,0423 %	0,0803 %
70AYKY50	0,0039 %	0,1343 %	0,2615 %

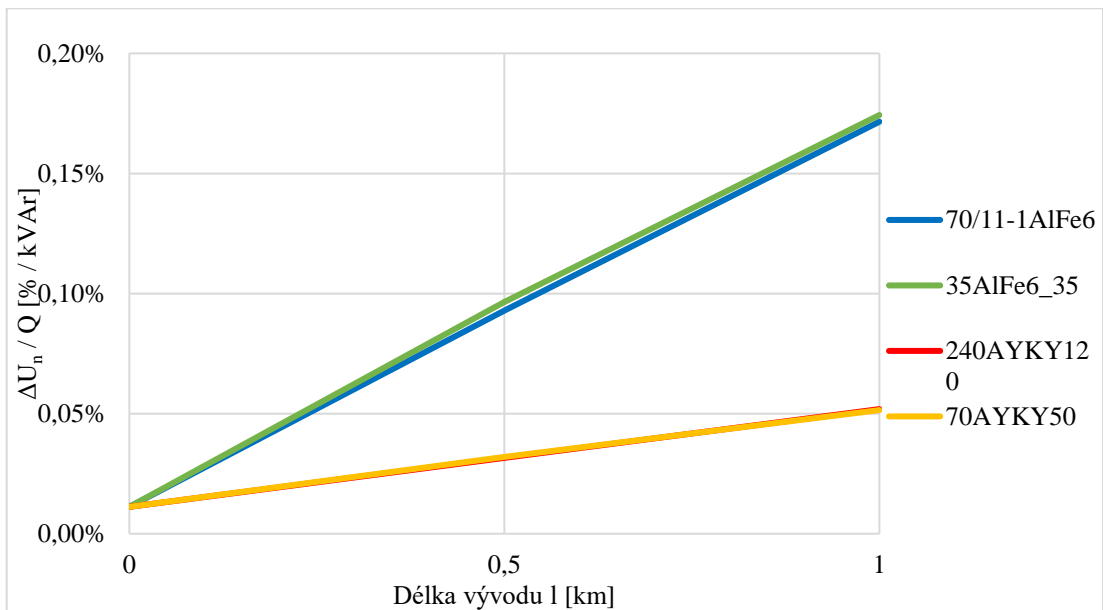
Tabulka 7: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu o velikosti 1 kW



Graf 1: Vliv činného výkonu na napětí v síti nízkého napětí

Poměrná změna jmenovitého napětí $\Delta U_n/Q$ [%/kVAr]			
Typ vedení	Délka vedení l [km]		
	0	0,5	1
70/11-1AlFe6	0,011 %	0,093 %	0,172 %
35AlFe6_35	0,011 %	0,096 %	0,174 %
240AYKY120	0,011 %	0,032 %	0,052 %
70AYKY50	0,011 %	0,032 %	0,051 %

Tabulka 8: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání jalového výkonu o velikosti 1 kVAr



Graf 2: Vliv jalového výkonu na napětí v síti nízkého napětí

Je patrné, že vliv vzdálenosti od transformátoru je lineární a rostoucí v případě dodávaného činného i jalového kapacitního výkonu. Průřez vodiče nepřímo úměrně ovlivňuje směrnice vynesené závislosti v případě vlivu činného výkonu, bez ohledu na typ vodiče. Rozdíl v typu vodiče je však evidentní v grafu 2. Reaktance venkovních vedení NN jsou násobně větší než u vedení kabelových, což se projevuje na napěťové odezvě vyvolané jalovým výkonem. Ta tedy s reaktancí závisí přímo úměrně. Vybrané vodiče venkovní i kabelové mají pak natolik podobné reaktance, že se téměř překrývají. Při dodávání stejného množství jalového výkonu, avšak opačného charakteru, tedy induktivního, by směrnice vynesných závislostí byly stejně velké, ale záporné. Z poměru R/X plyne, že napěťová regulace v sítích NN je citlivá spíše na činný než na jalový výkon.

4.4.2 Vedení vysokého napětí (22 kV)

Tabulky níže uvádějí parametry vedení vysokého napětí. Formát tabulek je totožný jako u vedení nízkého napětí pro snadné porovnání daných parametrů.

	Typ vedení	Průřez	Jmenovité napětí	Podélný odpor	Podélná reaktance	Příčná susceptance	Délka
		S [mm ²]	U _n [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	l [km]
V1	110/22AlFe6	110	22	0,259	0,368	1,46	5
V2	42/7AlFe6	42	22	0,667	0,421	1,837	5
V3	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	5
V4	70AXEKCY	70	22	0,443	0,182	63	5

Tabulka 9: Parametry vedení použitých v analýze vedení vysokého napětí

	Jmenovité napětí	Provozované napětí	Zkratový proud	Zkratový výkon	Poměr činné a jalové složky vnitřní impedance
Napájecí uzel	U _n [kV]	U _{prov} [kV]	I _{zkr} [kA]	S _{zkr} [MVA]	R/X [-]
NU	110	115	5,7735	1100	0,15
	Jmenovité primární napětí	Jmenovité sekundární napětí	Zkratový proud	Ztráty nakrátko	Napětí nakrátko
Transformátor	U _{n1} [kV]	U _{n2} [kV]	S _t [MVA]	P _k [kW]	u _k [%]
Tr	110	23	40	208,2	10,8

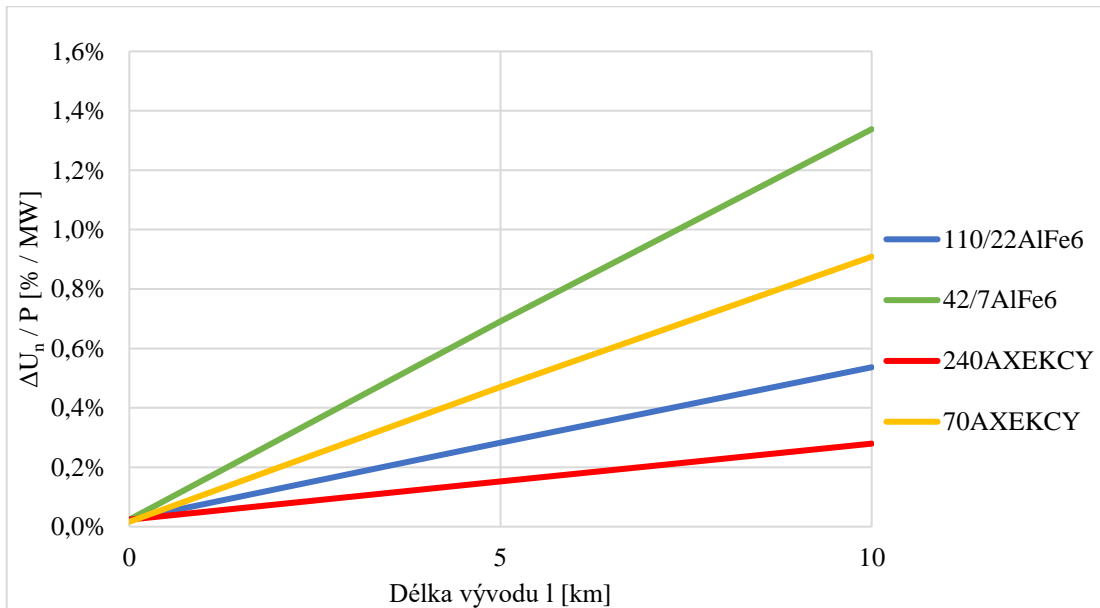
Tabulka 10: Parametry ostatních využitých prvků v analýze vedení vysokého napětí

Uzel	U00	U0	U11	U12	U21
Z [Ω]	(0,03+0,19j)·10 ⁻³	(0,05+0,66j)·10 ⁻³	(0,48+1,27j)·10 ⁻³	(0,91+1,88j)·10 ⁻³	(1,15+1,36j)·10 ⁻³
R/X [-]	0,158	0,076	0,378	0,484	0,846
Uzel	U22	U31	U32	U41	U42
Z [Ω]	(2,26+2,05j)·10 ⁻³	(0,26+0,99j)·10 ⁻³	(0,47+1,32j)·10 ⁻³	(0,78+0,96j)·10 ⁻³	(1,52+1,26j)·10 ⁻³
R/X [-]	1,102	0,263	0,356	0,813	1,206

Tabulka 11: Impedance v uzlech paprsků na hladině vysokého napětí

Poměrná změna jmenovitého napětí $\Delta U_n/P$ [%/MW]			
Typ vedení	Délka vedení l [km]		
	0	5	10
110/22AlFe6	0,024 %	0,283 %	0,537 %
42/7AlFe6	0,024 %	0,691 %	1,338 %
240AXEKCY	0,024 %	0,153 %	0,280 %
70AXEKCY	0,017 %	0,471 %	0,909 %

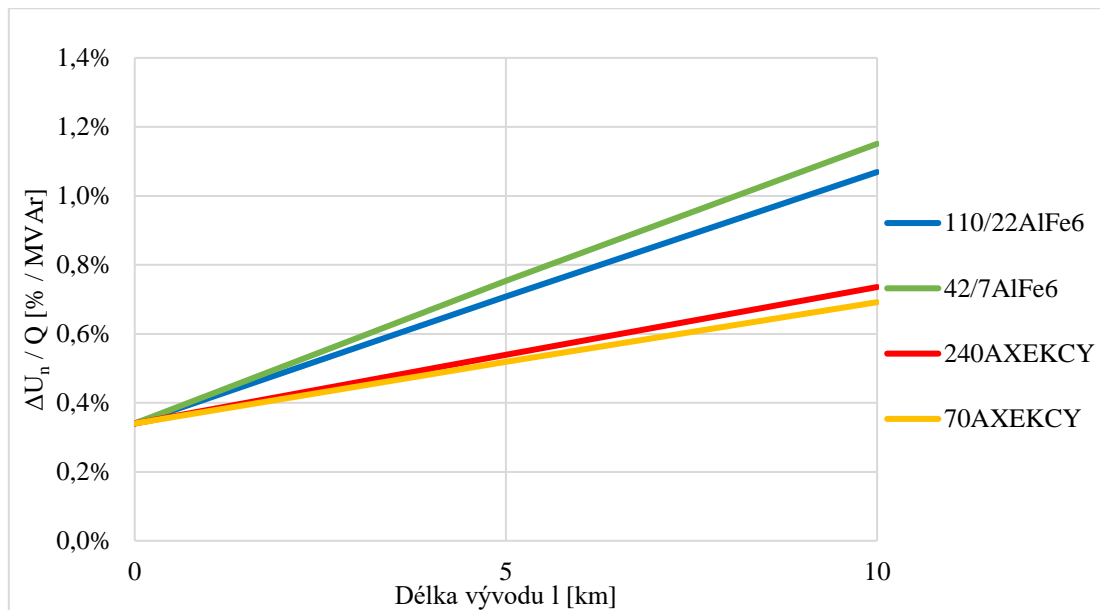
Tabulka 12: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu o velikosti 1 MW



Graf 3: Vliv činného výkonu na napětí v síti vysokého napětí

Poměrná změna jmenovitého napětí $\Delta U_n/Q$ [%/MVAr]			
Typ vedení	Délka vedení l [km]		
	0	0,5	1
110/22AlFe6	0,340 %	0,708 %	1,069 %
42/7AlFe6	0,340 %	0,754 %	1,151 %
240AXEKCY	0,340 %	0,539 %	0,736 %
70AXEKCY	0,340 %	0,519 %	0,692 %

Tabulka 13: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání jalového výkonu o velikosti 1 MVAr



Graf 4: Vliv jalového výkonu na napětí v síti vysokého napětí

Závěry z předešlé podkapitoly jsou platné i v případě vedení vysokého napětí. Opět je pozorovatelné, že průřez vodiče je nepřímo úměrně závislý na vyvolané změně napětí způsobené činným výkonem. Rozdíl reaktancí u venkovních a kabelových vedení není zde natolik výrazný, ale stále dostatečný na to, aby byl na první pohled rozeznatelný typ vodiče díky odlišným směrnicím v grafu 4.

4.4.3 Shrnutí citlivosti vlivu regulace napětí na vybrané parametry vedení

Parametry vedení, které byly rozebrány v předešlých kapitolách, mají velký vliv na napětíovou citlivost v případě činného i jalového výkonu. Je nutné je znát pro posouzení možnosti regulace napětí v daném místě a zohlednit je při výstavbě nebo rekonstrukci jednotlivých prvků pro zachování správných napětíových poměrů v síti.

4.5 Vliv zatížení sítě na regulaci napětí

Paprsek vedení nízkého i vysokého napětí je tvořen téměř všemi prvky, které jsou uvedeny v předchozí kapitole, avšak pro zachování úplnosti jsou uvedeny i v této podkapitole všechny tabulky s podstatnými parametry.

4.5.1 Vedení nízkého napětí (0,4 kV)

Tato podkapitola se zabývá zatížením na hladině nízkého napětí, a proto je zde kromě jednotlivých prvků tvořící paprskový vývod i zátěž, která je zvolena tak, jak je popsáno v podkapitole 4.3.3.

	Jmenovité napětí	Provozované napětí	Zkratový proud	Zkratový výkon	Poměr činné a jalové složky vnitřní impedance
Napájecí uzel	U_n [kV]	U_{prov} [kV]	I_{zkr} [kA]	S_{zkr} [MVA]	R/X [-]
NU	22	23	1,0497	40	0,59
	Jmenovité primární napětí	Jmenovité sekundární napětí	Zkratový proud	Ztráty nakrátko	Napětí nakrátko
Transformátor	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	S_t [MVA]	P_k [kW]	u_k [%]
Tr2	22	0,4	0,4	4,6	4

Tabulka 14: Parametry napájecího uzlu a transformátoru v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí

		Průřez	Jmenovité napětí	Podélný odpor	Podélná reaktance	Příčná susceptance	Délka
Vedení	Typ	S [mm ²]	U_n [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	l [km]
V1, V2	70/11-1AlFe6	70	0,4	0,43	0,28	1	0,5
	Jmenovité napětí	Proud	Účinník	Činný výkon	Jalový výkon	Zdánlivý výkon	Kompenzační výkon
Zátěž	U_n [kV]	I [A]	cos φ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q_k [kVAr]
Z1	0,4	194,48	0,95	128	42,0716	134,737	0
Z2	0,4	24,31	0,95	16	5,25895	16,8421	0
Z3	0,4	24,31	0,95	16	5,25895	16,8421	0

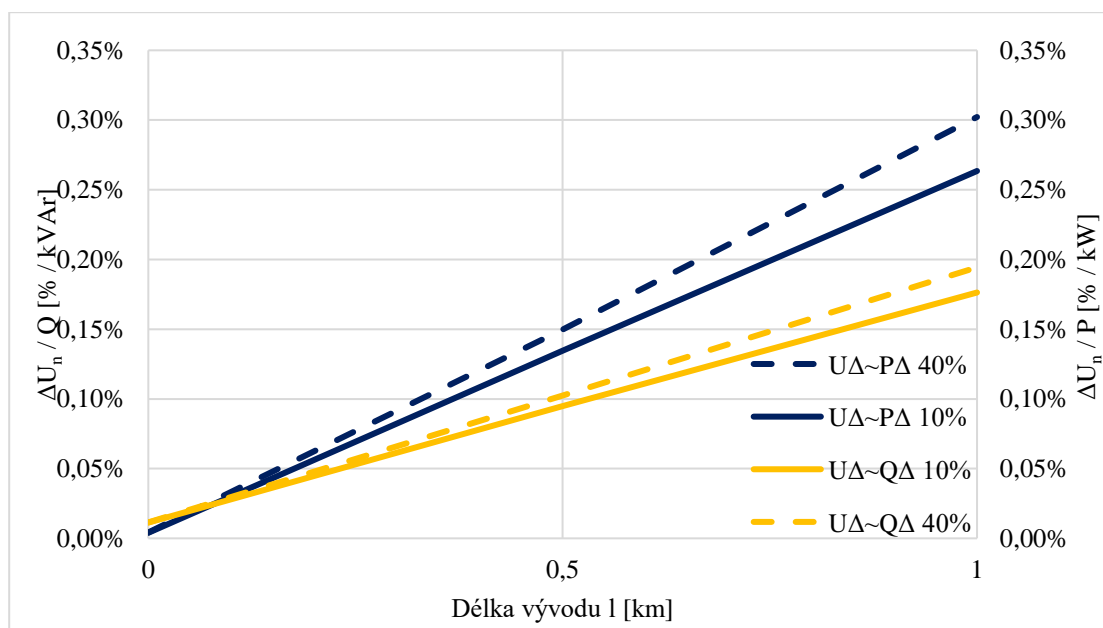
Tabulka 15: Parametry vedení a zátěže v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí

Uzel	U00	U0	U1	U2
Z [Ω]	0,002+0,004j	0,007+0,02j	0,222+0,16j	0,437+0,3j
R/X [-]	0,500	0,350	1,388	1,457

Tabulka 16: Impedance v uzlech v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí

Délka [km]	Celkové zatížení 10 % výkonu transformátoru		Celkové zatížení 40 % výkonu transformátoru	
	$\Delta U_n/P$ [%/kW]	$\Delta U_n/Q$ [%/kVAr]	$\Delta U_n/P$ [%/kW]	$\Delta U_n/Q$ [%/kVAr]
0	0,004 %	0,011 %	0,004 %	0,011 %
0,5	0,135 %	0,095 %	0,150 %	0,102 %
1	0,263 %	0,176 %	0,302 %	0,194 %

Tabulka 17: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu 1 kW a jalového výkonu 1 kVAr při různých zatíženích v síti nízkého napětí



Graf 5: Vliv zatížení na regulaci napětí v síti nízkého napětí

Z grafu 5 je patrné, že zátěž připojená na hladině nízkého napětí má vliv na napětřovou citlivost. Zatížení 10 % jmenovitého výkonu transformátoru se takřka neprojeví oproti nezatíženému vedení, avšak 40 % uvedeného výkonu má již pozorovatelný efekt na změnu jmenovitého napětí zapříčiněnou dodaným činným i jalovým výkonem.

4.5.2 Vedení vysokého napětí (22 kV)

Stejně jako u vedení nízkého napětí se níže nacházejí tabulky popisující zvolený paprsek spolu s tabulkou hodnot procentuálních změn jmenovitého napětí, které jsou vyneseny do grafu.

	Jmenovité napětí	Provozované napětí	Zkratový proud	Zkratový výkon	Poměr činné a jalové složky vnitřní impedance
Napájecí uzel	U_n [kV]	U_{prov} [kV]	I_{zkr} [kA]	S_{zkr} [MVA]	R/X [-]
NU	110	115	6,29837	1200	0,15
	Jmenovité primární napětí	Jmenovité sekundární napětí	Zkratový proud	Ztráty nakrátko	Napětí nakrátko
Transformátor	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	S_t [MVA]	P_k [kW]	u_k [%]
Tr2	110	23	40	208,2	10,8

Tabulka 18: Parametry napájecího uzlu a transformátoru v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí

		Průřez	Jmenovité napětí	Podélný odpor	Podélná reaktance	Příčná susceptance	Délka
Vedení	Typ	S [mm ²]	U_n [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	l [km]
V1, V2	110/22AlF e6	110	22	0,259	0,368	1,46	5
	Jmenovité napětí	Proud	Účinník	Činný výkon	Jalový výkon	Zdánlivý výkon	Kompenzační výkon
Zátěž	U_n [kV]	I [A]	$\cos \varphi$ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q_k [kVAr]
Z1	22	88,3981	0,95	3200	1051,79	3368,42	0
Z2	22	11,0498	0,95	400	131,474	421,053	0
Z3	22	11,0498	0,95	400	131,474	421,053	0

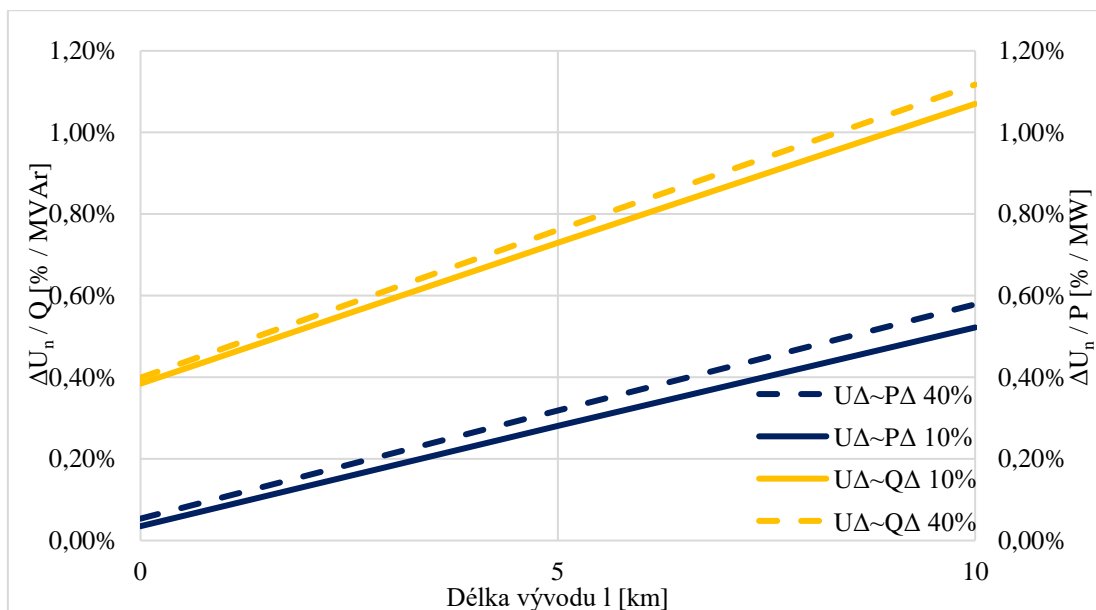
Tabulka 19: Parametry vedení a zátěže v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí

Uzel	U00	U0	U1	U2
Z [Ω]	$(0,03+0,19j) \cdot 10^{-3}$	$(0,05+0,66j) \cdot 10^{-3}$	$(0,48+1,27j) \cdot 10^{-3}$	$(0,91+1,88j) \cdot 10^{-3}$
R/X [-]	0,158	0,076	0,378	0,484

Tabulka 20: Impedance v uzlech v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí

Délka [km]	Celkové zatížení 10 % výkonu transformátoru		Celkové zatížení 40 % výkonu transformátoru	
	$\Delta U_n/P$ [%/MW]	$\Delta U_n/Q$ [%/MVA _r]	$\Delta U_n/P$ [%/MW]	$\Delta U_n/Q$ [%/MVA _r]
0	0,035 %	0,384 %	0,054 %	0,399 %
5	0,281 %	0,730 %	0,318 %	0,761 %
10	0,522 %	1,070 %	0,579 %	1,117 %

Tabulka 21: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu 1 MW a jalového výkonu 1 MVA_r při různých zatíženích v síti vysokého napětí



Graf 6: Vliv zatížení na regulaci napětí v síti vysokého napětí

Vliv zatížení sítě se projevuje při regulaci napětí činným i jalovým výkonem u vedení nízkého i vysokého napětí velmi podobně. Vynesené hodnoty při zatížení odpovídající 10 % jmenovitého výkonu transformátoru se takřka neliší od stavu naprázdno uvedeném v předešlé kapitole. Při zatížení 40 % jmenovitého výkonu transformátoru lze už pozorovat ve všech případech patrný vzrůst napěťové citlivosti na dodávaný výkon.

4.5.3 Shrnutí vlivu zatížení sítě na regulaci napětí

Zatížení sítě v řádu jednotek procent jmenovitého výkonu transformátoru, za kterým pokračuje paprskový vývod, se takřka neprojevuje v napěťové citlivosti v případě činného ani jalového výkonu. Z tohoto důvodu nebyly vyneseny závislosti získané ve stavu naprázdno, které by se takřka překrývaly se závislostmi při zvoleném 10% zatížení jmenovitého výkonu transformátoru. Výraznější zatížení však představuje na hladinách nízkého i vysokého napětí nezanedbatelný rozdíl, který je třeba brát v potaz při samotné regulaci napětí nebo například při posuzování připojení zdroje do soustavy.

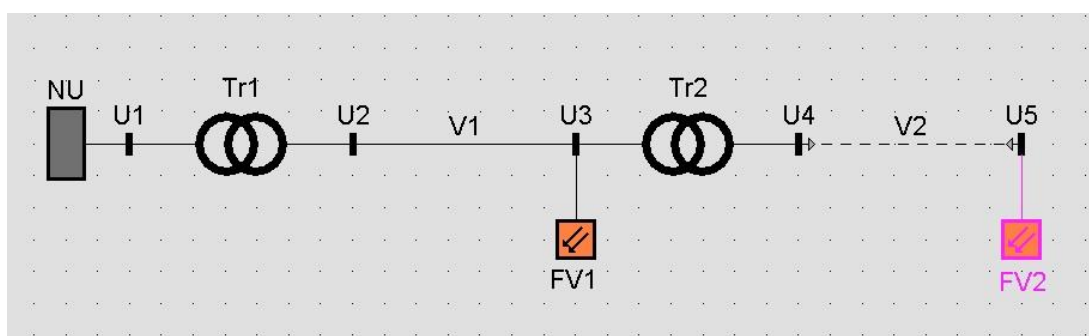
4.6 Závěrečné shrnutí

Vliv vybraných parametrů i zatížení se projevil jako zásadní v případě napět'ové hladiny nízkého i vysokého napětí. Je přitom třeba brát v úvahu, že vyvozené závěry jsou získány z jednoduchých a názorných příkladů, které lze snadno interpretovat. Distribuční sítě jsou ale mnohem rozsáhlejší a komplikovanější a zatížení se mění nepřetržitě. Proto je potřeba se zmíněnými parametry zaobírat jak v rámci provozu, tak i rozvoje sítě.

5 Analýza vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny v síti

5.1 Vliv regulace napětí na jiné napěťové hladiny

Předešlá kapitola ukazuje chování při regulaci v rámci jedné napěťové hladiny, avšak ve skutečnosti jsou ovlivněny i ostatní napěťové hladiny v síti. Nejde zde tedy o místo regulace, jako v předchozí kapitole, ale o dopad a účinnost na zbylé hladiny distribuční soustavy. Znovu je dále rozebrán jen paprskový vývod, jehož konkrétní provedení je na obrázku níže.



Obrázek 19: Schéma pro analýzu vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny

Jde o úplný paprsek vedení zahrnující velmi vysoké, vysoké i nízké napětí. Pro udržení přehlednosti je zvoleno vedení nízkého i vysokého napětí, které figuruje v kapitole 4. Stejně tomu je i u ostatních prvků. Všechny prvky a jejich parametry jsou opět uvedeny u vyhodnocení.

Ve schématu jsou naznačené dvě fotovoltaické elektrárny – jedna na hladině vysokého napětí a druhá na hladině nízkého napětí. Proto je znovu analýza rozdělena podle tohoto kritéria. Metoda vyhodnocování a interpretace výsledků je provedena obdobně, jako je popsáno v kapitole 4.3.2 s rozdílem u vynesených grafů, kde se na nezávislé ose nachází jednotlivé uzly namísto délky vedení. Tím lze sledovat napěťové změny v celém paprskovém vývodu.

5.2 Analýza vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny

Parametry použitých prvků jsou uvedeny níže, přičemž se jedná o jeden model, a proto na rozdíl od předchozí kapitoly, souvisí se zapojenými zdroji do obou napěťových hladin.

		Průřez	Jmenovité napětí	Podélný odpor	Podélná reaktance	Příčná susceptance	Délka
Vedení	Typ	S [mm ²]	U _n [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	l [km]
V1	110/22AlFe6	110	22	0,259	0,368	1,46	10
V2	240AYKY120	240	0,4	0,129	0,068	1	1

Tabulka 22: Parametry vedení využitých pro analýzu ovlivnění jiných napěťových hladin

	Jmenovité napětí	Provozované napětí	Zkratový proud	Zkratový výkon	Poměr činné a jalové složky vnitřní impedance
Napájecí uzel	U _n [kV]	U _{prov} [kV]	I _{zkr} [kA]	S _{zkr} [MVA]	R/X [-]
NU	110	115	5,7735	1100	0,15
	Jmenovité primární napětí	Jmenovité sekundární napětí	Zkratový proud	Ztráty nakrátko	Napětí nakrátko
Transformátor	U _{n1} [kV]	U _{n2} [kV]	S _t [MVA]	P _k [kW]	U _k [%]
Tr1	110	23	40	208,2	10,8
Tr2	22	0,4	0,4	4,6	4

Tabulka 23: Parametry napájecího uzlu a transformátoru využitých pro analýzu ovlivnění jiných napěťových hladin

Uzel	U1 (110 kV)	U2 (22 kV)	U3 (22 kV)	U4 (0,4 kV)	U5 (0,4 kV)
Z [Ω]	(0,03+0,19j)·10 ⁻³	(0,05+0,66j)·10 ⁻³	(0,91+1,88j)·10 ⁻³	0,006+0,018j	0,135+0,086j
R/X [-]	0,158	0,076	0,484	0,308	1,566

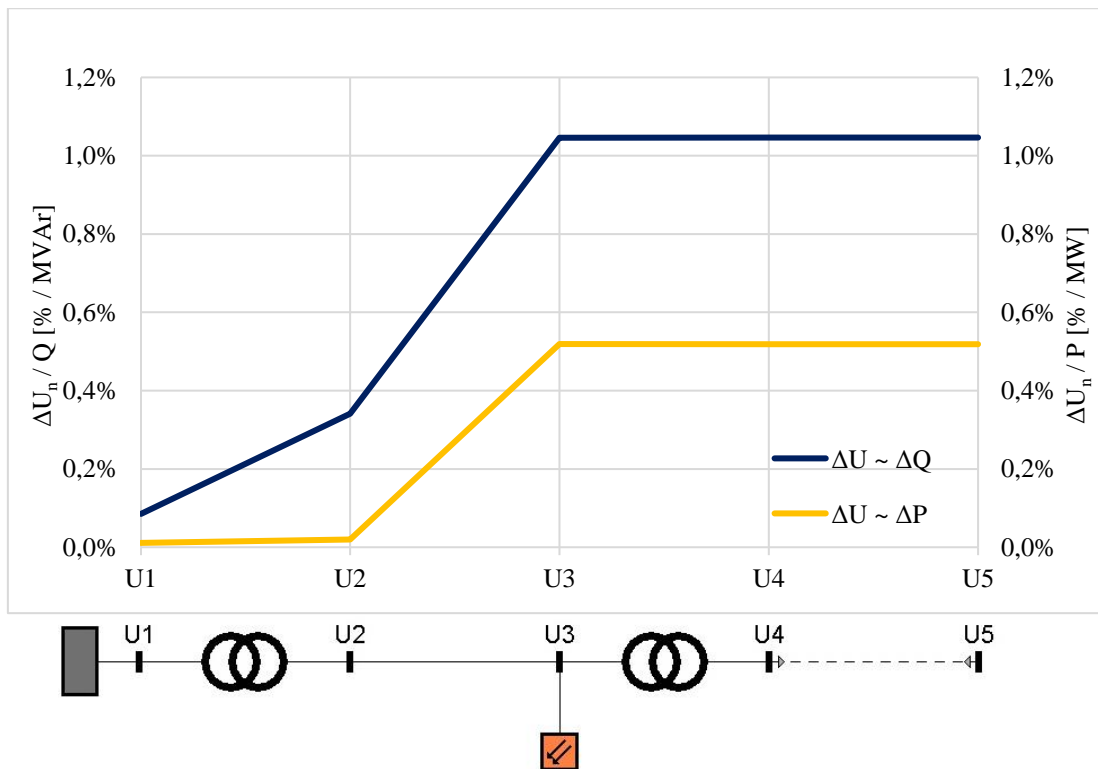
Tabulka 24: Impedance v daných uzlech v analýze ovlivnění jiných napěťových hladin

5.2.1 Zdroj připojený na hladině vysokého napětí

Tabulka s procentuálními změnami jmenovitého napětí vyvolanými jednotkou činného i jalového výkonu v jednotlivých uzlech na hladině vysokého napětí je uvedena i s grafem níže.

		U1	U2	U3	U4	U5
ΔU ~ ΔP	ΔU _n /P [%/MW]	0,011 %	0,019 %	0,519 %	0,519 %	0,519 %
ΔU ~ ΔQ	ΔU _n /Q [%/MVAr]	0,085 %	0,341 %	1,046 %	1,046 %	1,046 %

Tabulka 25: Procentuální změna jmenovitých napětí v paprsku po připojení zdroje do sítě vysokého napětí



Graf 7: Napěťové změny v paprsku po připojení zdroje do sítě vysokého napětí

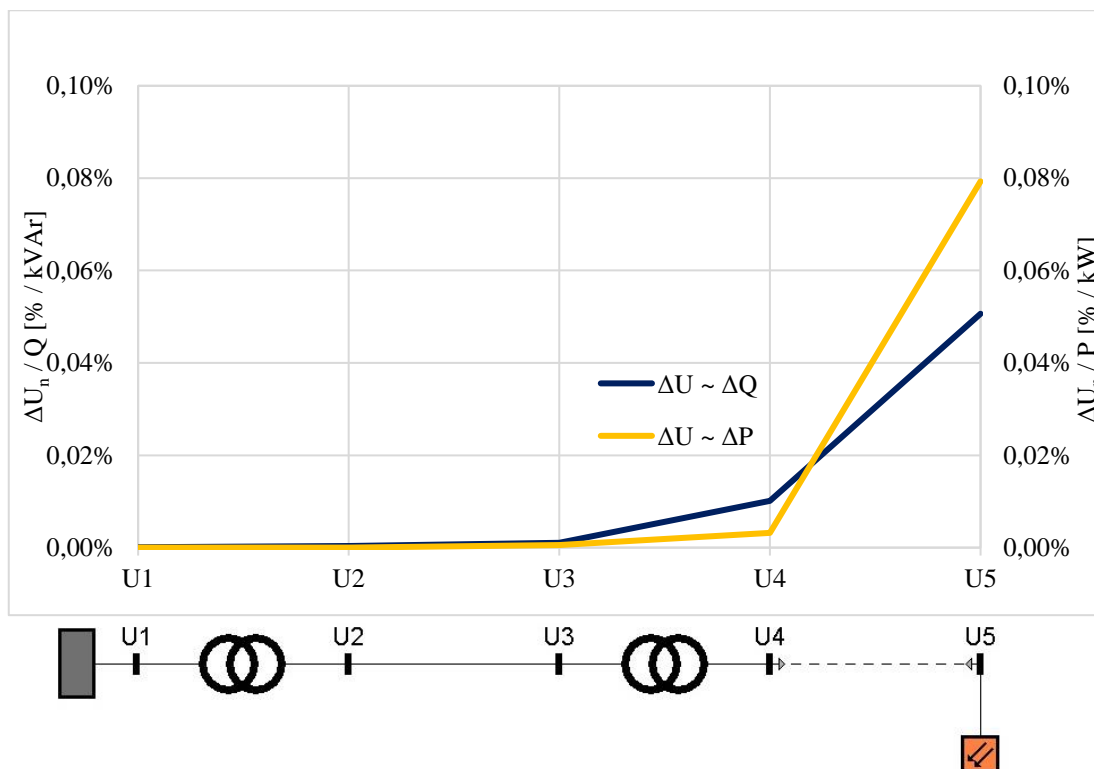
Zdroj připojený na stranu vysokého napětí způsobí napěťovou změnu, která ovlivní zbytek paprsku, a tedy celou nižší napěťovou hladinu. Na stranu velmi vysokého napětí to naopak má dopad zanedbatelný. Tento jev se může využít při regulaci během zvýšeného odběru v dané oblasti, což připomíná hladinovou regulaci transformátorů popsanou v kapitole 3.3. Jalový výkon má v tomto případě zásadnější vliv než výkon činný, což koresponduje s nízkým poměrem R/X v uzlu U3.

5.2.2 Zdroj připojený na hladině nízkého napětí

Procentuální změny jmenovitého napětí na jednotku činného i jalového výkonu v jednotlivých uzlech způsobené zdrojem připojeným na hladině nízkého napětí jsou uvedeny v tabulce i s grafem níže.

		U1	U2	U3	U4	U5
$\Delta U \sim \Delta P$	$\Delta U_n/P$ [%/kW]	$1,236 \cdot 10^{-5} \%$	$2,273 \cdot 10^{-5} \%$	$5,259 \cdot 10^{-4} \%$	$3,2 \cdot 10^{-3} \%$	$7,93 \cdot 10^{-2} \%$
$\Delta U \sim \Delta Q$	$\Delta U_n/Q$ [%/kVAr]	$8,635 \cdot 10^{-5} \%$	$3,435 \cdot 10^{-4} \%$	$1,063 \cdot 10^{-3} \%$	$1,012 \cdot 10^{-2} \%$	$5,064 \cdot 10^{-2} \%$

Tabulka 26: Procentuální změna jmenovitých napětí v paprsku po připojení zdroje do sítě nízkého napětí



Graf 8: Napěťové změny v paprsku po připojení zdroje do sítě nízkého napětí

Zdroj připojený na hladině nízkého napětí se chová podobně jako v předešlé podkapitole, nicméně nižší napěťová hladina se již dále nevyskytuje, a proto se změna projevuje téměř jen v místě připojení zdroje. Shodná je nepodstatná změna napětí u vyšších napěťových hladin, avšak při velkém počtu připojených zdrojů v síti nízkého napětí už nemusí být bezvýznamná. Opakem je zde vliv jalového výkonu, což opět koresponduje s poměrem R/X, který je oproti stavu v síti vysokého napětí citelně vyšší.

5.3 Závěrečné shrnutí

Regulace napětí dodávaným činným a jalovým výkonem má podstatný vliv na jmenovité napětí v případě působení z vyšších napěťových hladin na nižší. To může být v jistých případech výhodné, jelikož například není třeba takto regulovat napětí na mnoha místech v rozvětveném paprsku. Naopak tento dopad z nižší napěťové hladiny na vyšší je nepatrný a z tohoto pohledu se jeví jako výhodnější regulace v daném místě. S rostoucí decentralizací výrobních zdrojů vzrostl počet prvků schopných regulovat napětí, a tak je potřeba se touto problematikou zabývat v síti ve větším rozsahu. To zvedá nároky na řízení sítě, avšak přináší s sebou i vyšší regulační možnosti a tím pádem i zvýšení kvality dodávky elektrické energie.

6 Závěr

Regulace napětí je značně komplikovaná problematika zasahující do všech odvětví elektroenergetiky – výroby, přenosu a distribuce i spotřeby elektrické energie. Fyzikální podstatu regulace napětí a její principy používané v přenosových a distribučních soustavách popisuje první kapitola této práce. Jelikož hlavní inspirací byla pravidla provozování přenosové soustavy a pravidla provozování distribučních soustav, vystihuje tato část hlavně provoz těchto soustav na území České republiky, avšak uvedené základní principy fungují i v jiných státech. Dále jsou uvedeny prvky sloužící k regulaci napětí využívané v distribučních i přenosových soustavách s vysvětlením jejich principu činnosti a regulačními možnostmi .

Druhá polovina této práce je zaměřena na konkrétní parametry charakterizující vedení se zahrnutím dalších prvků v distribuční síti ovlivňující napětí, a tím pádem i jeho regulaci. Na hladině nízkého i vysokého napětí je rozebrán vliv činného a jalového výkonu a jeho souvislost s vybranými parametry. Grafy jsou vyneseny tak, aby ukázaly specifika obou napěťových hladin i projev dodávaného regulačního výkonu. Ve shrnutí podkapitol jsou pak analyzovány nejen dopady a chování jednotlivých vybraných parametrů, ale z širšího měřítka také popsány evidentní i eventuální následky, které plynou z výsledků jednotlivých simulací. Tyto závěry se shodují s popsáním teoretickým rozborem a ukazují širokou napěťovou regulační schopnost výrobních zdrojů na hladině nízkého i vysokého napětí. Se zjištěnými poznatky popisující paprskový rozvod, který se v distribučních soustavách vyskytuje nejčastěji, by bylo příhodné zaměřit se na model větší části sítě s nejen paprskovým rozvodem nebo detailněji analyzovat koordinaci více různých prvků regulující napětí.

Použité zdroje

- [1] ČSN EN 50160 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] DOLEŽAL, Jaroslav a Karel WINTER. Regulace napětí a jalového výkonu – současnost a trendy. *Elektro*. 2002, 2002(11), 8-10.
- [3] HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. *Energetika* [online]. 2015, 2015(5), 264-271 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf
- [4] HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. *Energetika* [online]. 2015, 2015(3), 146-152 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_3_2015_habrych.pdf
- [5] HABRYCH, Richard. Regulace napětí a jalových výkonů v distribuční soustavě 110kV [online]. In: . [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10980390-Regulace-napeti-a-jalovych-vykonu-v-distribucni-soustave-110kv.html>
- [6] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. [online]. Praha: ČEPS, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [7] KORENC, Vladimír, Zdeněk MATOUŠEK a Ctibor PETRŮ. Linkové kondicionéry a jejich užití [online]. [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20160741-Linkove-kondicionery-a-jejich-uziti.html>
- [8] Linkový kondicionér. ELCOM [online]. [cit. 2019-08-29]. Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/vykonove-specialni-menice/vylepseni-kvality-elektřiny/linkovy-kondicioner>
- [9] MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [10] MĚŘIČKA, Jiří a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. Vydání druhé. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01020-1.
- [11] Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [12] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav [online]. 2016, 80 stran [cit. 2019-12-23]. Dostupné z:

https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds_2016.pdf

- [13] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 3 [online]. 2011, , 43 stran [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf
- [14] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 [online]. 2018, , 85 stran [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf
- [15] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 7 [online]. 2011, , 37 stran [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-7.pdf
- [16] Statistika – Národní energetický mix. OTE [online]. [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [17] ŠKACH, Martin a Richard HABRYCH. Podpůrná služba regulace jalového výkonu. Energetika [online]. 2015, 2015(6), 383-388 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_7_2015_habrych.pdf
- [18] TLUSTÝ, Josef, Jan ŠVEC, Petr BANNERT, Zbyněk BRETTSCHEIDER, Zbyněk KOCUR, Petr MAREČEK, Zdeněk MÜLLER a Tomáš SÝKORA. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [19] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [20] XIANGQIAN, Tong, Zhong MINGHANG, Zhang XIAOQING, Deng JUN a Zhang ZHIHUA. Voltage regulation strategy of AC distribution network based on distributed PV gridconnected inverter [online]. 2018, , 4 strany [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/joe.2018.8680>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zjednodušené znázornění elektrizační soustavy.....	3
Obrázek 2: Napěťová citlivost na jalový výkon při různém poměru R/X	6
Obrázek 3: Hierarchie regulace napětí a jalových výkonů v elektrizační soustavě	7
Obrázek 4: Principiální schéma regulační struktury koncepce pilotních uzlů	8
Obrázek 5: Obecná uzlová oblast na napěťové hladině 110 kV	10
Obrázek 6: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí v síti NN	12
Obrázek 7: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí pro výrobní moduly nad 11 kW.....	12
Obrázek 8: Charakteristika funkce P(U)	14
Obrázek 9: Charakteristika funkce Q(U)	16
Obrázek 10: Zjednodušené schéma možného zapojení regulátoru buzení	18
Obrázek 11: P-Q: diagram synchronního stroje a certifikovaný provozní diagram'	19
Obrázek 12: Příklad zapojení SVC a pracovní oblast SVC	20
Obrázek 13: Princip řízení střídače	22
Obrázek 14: Schéma připojení linkového kondicionéru k síti	24
Obrázek 15: V-křivky synchronního kompenzátoru při různých napětích sítě	25
Obrázek 16: Prostředí programu E-Vlivy 3	27
Obrázek 17: Schéma paprsků pro posouzení vlivu činného a jalového výkonu na napětí .	28
Obrázek 18: Schéma paprskového vývodu pro posouzení vlivu zátěže na regulaci napětí	30
Obrázek 19: Schéma pro analýzu vlivu regulace napětí na jiné napěťové hladiny	42

Seznam tabulek

Tabulka 1: Dovolené odchylky napětí dané normou ČSN 50160 a pravidly provozování distribučních soustav	4
Tabulka 2: Rozsah napětí pro výrobní připojené do sítě vysokého napětí.....	11
Tabulka 3: Doba odezvy na požadavek pro změnu výkonu podle dostupnosti primárního zdroje energie	14
Tabulka 4: Parametry vedení použitých v analýze vedení nízkého napětí	31
Tabulka 5: Parametry ostatních využitých prvků v analýze vedení nízkého napětí	31
Tabulka 6: Impedance v uzlech paprsků na hladině nízkého napětí	32

Tabulka 7: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu o velikosti 1 kW	32
Tabulka 8: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání jalového výkonu o velikosti 1 kVAr	32
Tabulka 9: Parametry vedení použitých v analýze vedení vysokého napětí	34
Tabulka 10: Parametry ostatních využitých prvků v analýze vedení vysokého napětí	34
Tabulka 11: Impedance v uzlech paprsků na hladině vysokého napětí	34
Tabulka 12: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu o velikosti 1 MW	35
Tabulka 13: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání jalového výkonu o velikosti 1 MVar	35
Tabulka 14: Parametry napájecího uzlu a transformátoru v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí	37
Tabulka 15: Parametry vedení a zátěže v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí	37
Tabulka 16: Impedance v uzlech v analýze vlivu zatížení na hladině nízkého napětí	37
Tabulka 17: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu 1 kW a jalového výkonu 1 kVAr při různých zatíženích v síti nízkého napětí	38
Tabulka 18: Parametry napájecího uzlu a transformátoru v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí	39
Tabulka 19: Parametry vedení a zátěže v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí	39
Tabulka 20: Impedance v uzlech v analýze vlivu zatížení na hladině vysokého napětí	39
Tabulka 21: Procentuální změna jmenovitého napětí při dodání činného výkonu 1 MW a jalového výkonu 1 MVar při různých zatíženích v síti vysokého napětí	40
Tabulka 22: Parametry vedení využitých pro analýzu ovlivnění jiných napěťových hladin	43
Tabulka 23: Parametry napájecího uzlu a transformátoru využitých pro analýzu ovlivnění jiných napěťových hladin	43
Tabulka 24: Impedance v daných uzlech v analýze ovlivnění jiných napěťových hladin ..	43
Tabulka 25: Procentuální změna jmenovitých napětí v paprsku po připojení zdroje do sítě vysokého napětí	43
Tabulka 26: Procentuální změna jmenovitých napětí v paprsku po připojení zdroje do sítě nízkého napětí	45

Seznam grafů

Graf 1: Vliv činného výkonu na napětí v síti nízkého napětí.....	32
Graf 2: Vliv jalového výkonu na napětí v síti nízkého napětí.....	33
Graf 3: Vliv činného výkonu na napětí v síti vysokého napětí	35
Graf 4: Vliv jalového výkonu na napětí v síti vysokého napětí	36
Graf 5: Vliv zatížení na regulaci napětí v síti nízkého napětí	38
Graf 6: Vliv zatížení na regulaci napětí v síti vysokého napětí	40
Graf 7: Napěťové změny v paprsku po připojení zdroje do sítě vysokého napětí	44
Graf 8: Napěťové změny v paprsku po připojení zdroje do sítě nízkého napětí.....	45