



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOMPENZACE PŘETOKŮ JALOVÉHO VÝKONU DO VN SOUSTAVY

COMPENSATION OF REACTIVE POWER TO AVOID ITS OVERFLOW INTO THE MV SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Viktor Jurák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Viktor Jurák

ID: 174322

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace přetoků jalového výkonu do VN soustavy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do problematiky a základní definice
2. Analýza přetoků jalového výkonu do soustavy VN
3. Obecné posouzení možného dopadu kompenzace na Q/U regulaci zdrojů na úrovni NN
4. Vytvoření modelu vybrané části distribuční soustavy a kompenzačního zařízení
5. Zhodnocení výsledků provedených simulací a stanovení doporučení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

JURÁK, V. Kompenzace přetoků jalového výkonu do VN soustavy. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2019, 59 stran.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Kompenzace přetoků jalového výkonu do VN soustavy* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.5.2019

.....

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou toků jalových výkonů v sítích VN a NN. V první části je provedena definice jalového výkonu a jsou popsány jednotlivé prvky sítí, které přispívají svým jalovým výkonem do distribuční sítě. Druhá část práce se věnuje výpočtu ustálených chodů v programu PSS[®] Sincal, kde jsou na numerických modelech sítě testovány různé provozní stavy a je vyhodnocován jejich vliv na toky jalových výkonů. Podrobněji je pak práce věnována kompenzaci jalového výkonu na DTS, respektive vlivům této kompenzace na toky jalových výkonů v síti a vlivu na $Q(U)$ regulaci zdrojů. V práci jsou rovněž uvedena obecná doporučení, plynoucí z provedených simulací sítě, týkající se osazování DTS kompenzačními zařízeními.

KLÍČOVÁ SLOVA: Jalový výkon; Kompenzace jalového výkonu; Přetoky jalového výkonu; $Q(U)$ regulace zdrojů; Výpočet ustálených chodů

ABSTRACT

This master thesis is focused on analysis of reactive power flow in LV and MV networks. In the first part there is a definition of reactive power and description of individual parts of electrical networks that contribute with their reactive power to distribution network. The second part is dedicated to calculation of power flow in simulation software PSS[®] Sincal where on numerical models of network different types of network configuration are tested and consequently its influence on reactive power flow is evaluated. A more detailed analysis is dedicated to reactive power compensation in networks with distributed generation equipped with Volt-Var regulation and its possible negative mutual influence. This thesis also includes general recommendation on the basis of network simulation analysis concerning installation of compensating systems in distribution transformer station.

KEY WORDS: **Reactive power; Compensation of reactive power; Reactive power overflow; Volt-var regulation; Load flow analysis**

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD	11
2 DEFINICE JALOVÉHO VÝKONU	11
2.1 VÝKONY V OBVODU S LINEÁRNÍ ZÁTĚŽÍ.....	11
2.2 VÝKONY V OBVODU S NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽÍ	14
2.3 ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE	16
3 ZDROJE JALOVÉHO VÝKONU.....	16
3.1 PASIVNÍ PRVKY SÍŤE JAKO ZDROJE JALOVÉHO VÝKONU	16
3.1.1 KABELOVÉ VEDENÍ VN.....	18
3.1.2 VENKOVNÍ VEDENÍ VN	21
3.1.3 VENKOVNÍ A KABELOVÁ VEDENÍ NN	22
3.1.4 TRANSFORMÁTORY 22kV/0,4kV	23
3.2 CHOVÁNÍ DECENTRÁLNÍCH ZDROJŮ Z HLEDISKA JALOVÉHO VÝKONU	25
3.2.1 DECENTRÁLNÍ ZDROJE S MOŽNOSTÍ ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU	25
3.2.2 DECENTRÁLNÍ ZDROJE BEZ MOŽNOSTI ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU	27
3.3 CHOVÁNÍ NABÍJEČEK ELEKTROMOBILŮ Z HLEDISKA JALOVÉHO VÝKONU.....	27
3.4 CHOVÁNÍ ODBĚRNÝCH MÍST Z HLEDISKA JALOVÉHO VÝKONU.....	29
4 ZÁKLADNÍ SIMULACE VN SÍŤE	31
4.1 POPIS SIMULACE	31
4.2 ZHODNOCENÍ SIMULACE	35
5 ZÁKLADNÍ SIMULACE NN SÍŤE.....	37
5.1 POPIS SIMULACE	37
5.1.1 $Q(U)$ REGULACE ZDROJE.....	39
5.1.2 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU NA DTS.....	42
5.2 ZHODNOCENÍ SIMULACE	44
6 KOMPLEXNÍ SIMULACE	46
6.1 POPIS SIMULACE	46
6.1.1 NASTAVENÍ KOMPENZACE U KOMPLEXNÍ SIMULACE	50
6.2 VÝSTUPY SIMULACE.....	50
7 ZÁVĚR.....	53
POUŽITÁ LITERATURA	54
PŘÍLOHA P1.....	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Činný výkon a) odběr, b) dodávka.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2-2 Odběr jalového výkonu a) kapacitní, b) induktivní</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-3 Odběr činného a jalového výkonu a) kapacitního, b) induktivního.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3-1 Obecný dvojbran.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-2 Závislost jalového výkonu na zatížení kabelu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3 Závislost jalového výkonu na zatížení pro různé délky kabelu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-4 Závislost jalového výkonu venkovních vedení 22kV na zatížení.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-5 Závislost jalového výkonu na zatížení pro různá NN vedení.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-6 Závislost jalového výkonu na zatížení transformátoru pro různé transformátory</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-7 Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (převzato z [6]).....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-8 Charakteristika funkce $Q(U)$ (převzato z [6])</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-9 Toky energií přepočteny na průměrnou DTS (převzato z [9])</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-1 Schéma základní simulace VN sítě</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-2 Závislost jalového výkonu vybraného vývodu z rozvodny 22kV na různém zatížení DTS činným a jalovým výkonem pro různé typy sítě</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-1 Schéma sítě s $Q(U)$ regulací FVE a kompenzačními prostředky na NN úrovni.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-2 Nastavení $Q(U)$ regulace zdroje.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-3 Profily napětí a jalových výkonů v závislosti na velikosti činného výkonu přenášeného NN kabelovým vedením</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-1 Schéma sítě komplexní simulace.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-2 Stavby výkonů FVE a zátěží.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. P1-1 Jalový výkon $Q(U)$ regulace a kompenzace</i>	<i>55</i>
<i>Obr. P1-2 Jalový výkon na NN straně DTS.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. P1-3 Jalový výkon na výstupu z kabelového kruhu VN.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. P1-4 Jalový výkon na vývodu z rozvodny 22 kV</i>	<i>57</i>
<i>Obr. P1-5 Napětí v místě připojení FVE.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. P1-6 Napětí v místě zátěže</i>	<i>58</i>
<i>Obr. P1-7 Napětí v DTS</i>	<i>58</i>
<i>Obr. P1-8 Ztráty v síti (vztaženo na sledovaný vývod z rozvodny)</i>	<i>59</i>
<i>Obr. P1-9 Účinnost sítě (vztaženo na sledovaný vývod z rozvodny).....</i>	<i>59</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Znaménková konvence výkonů – spotřebičová orientace</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4-1 Parametrizace transformátoru VVN/VN.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4-2 Parametrizace VN vedení</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4-3 Parametrizace transformátoru VN/NN.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4-4 Nastavení činného výkonu zátěží v základní simulaci VN sítě.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4-5 Nastavení jalového výkonu zátěží v základní simulaci VN sítě.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 5-1 Nastavení profilu výroby v základní simulaci NN sítě.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5-2 Nastavení $Q(U)$ regulace zdroje v základní simulaci NN sítě</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5-3 Nastavení kompenzačního kondenzátoru.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5-4 Nastavení kompenzačního reaktoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-5 Nastavení controlleru u kompenzátorů.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6-1 Nastavení zátěží v komplexní simulaci.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6-2 Nastavení výroby v komplexní simulaci.....</i>	<i>48</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

VVN	Velmi vysoké napětí
VN	Vysoké napětí
NN	Nízké napětí
DS	Distribuční síť
DTS	Distribuční transformátorová stanice
TCR	Tyristorem řízená tlumivka (<i>Thyristor Controlled Reactor</i>)
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
MOO	Maloodběratelé - obyvatelstvo
MOP	Maloodběratelé – podnikatelé
FVE	Fotovoltaická elektrárna

Symboly:

$u(t)$	Okamžitá hodnota napětí
$i(t)$	Okamžitá hodnota proudu
$s(t)$	Okamžitá hodnota výkonu
$p(t)$	Okamžitá hodnota činného výkonu
$q(t)$	Okamžitá hodnota jalového výkonu
U	Efektivní hodnota napětí
I	Efektivní hodnota proudu
ω	Úhlová rychlost
φ	Fázový posuv mezi napětím a proudem
t	Čas
S	Zdánlivý výkon
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
D	Deformační výkon
λ	Celkový účinnost odběru
$THD_{I,ČSN}$	Celkové harmonické zkreslení dle ČSN
$THD_{I,IEC}$	Celkové harmonické zkreslení dle IEC

U_f	Efektivní hodnota fázového napětí
B	Susceptance
X	Reaktance
\bar{A}	Přenosová konstanta A
\bar{B}	Přenosová konstanta B
\bar{C}	Přenosová konstanta C
\bar{D}	Přenosová konstanta D
\bar{Z}_k	Podélná impedance na kilometr délky vedení
R_k	Podélný odpor na kilometr délky vedení
L_k	Podélná indukčnost na kilometr délky vedení
\bar{Y}_k	Příčná admitance na kilometr délky vedení
G_k	Příčná konduktance na kilometr délky vedení
C_k	Provozní kapacita na kilometr délky vedení
$\bar{\gamma}$	Konstanta šíření
\bar{Z}_v	Vlnová impedance
l	Délka vedení.
\bar{Z}_t	Podélná impedance transformátoru
r_t	Poměrná hodnota odporu vinutí transformátoru
x_t	Poměrná hodnota rozptylové reaktance transformátoru
\bar{Y}_t	Příčná admitance transformátoru
g_t	Poměrná hodnota konduktance transformátoru reprezentující ztráty v železe
b_t	Poměrná hodnota magnetizační susceptance transformátoru
S_n	Jmenovitý výkon transformátoru
U_n	Jmenovité napětí
u_k	Napětí nakrátko
i_0	Proud naprázdno
ΔP_k	Činné ztráty nakrátko
ΔP_0	Činné ztráty naprázdno
P_D	Navrhovaný výkon výroby

1 ÚVOD

Elektrizační soustava v současné době prodělává spoustou změn. Přibývají distribuované zdroje elektrické energie, mění se charakter spotřebičů a přibývá kabelových vedení. Právě těmto změnám se musí přizpůsobit i způsob provozu elektrizační soustavy. Jedním z problémů na který je potřeba reagovat, jsou toky jalových výkonů. Distribuované zdroje elektrické energie využívají pro stabilizaci napětí v místě připojení jalový výkon, který pak směřuje do sítí vyšších napěťových hladin. Jako další zdroje jalového výkonu jsou sami spotřebitelé elektrické energie, kde díky přibývajícimu zastoupení spotřebičů s měniči lze očekávat růst zejména odběru kapacitního charakteru. Podstatným zdrojem jalového výkonu jsou pak také samotné prvky sítí a to zejména VN kabely, které spotřebovávají jalový výkon kapacitního charakteru

Jalový výkon doprovází přenos činného výkonu a přitom nekoná užitečnou činnou práci. Přenos jalového výkonu však na prvcích sítě způsobuje činné ztráty a úbytky napětí. Jalový výkon rovněž blokuje přenosovou kapacitu prvků sítě, která by mohla být využita pro přenos činného výkonu. Na druhou stranu je vznik jalového výkonu přirozený jev, kterému nelze zabránit. Síťové prvky však mohou mít různé charaktery jalového odběru a mohou se tak vzájemně kompenzovat.

Vzhledem k výše uvedeným faktům je třeba hledat místa pro kompenzaci jalového výkonu uvážlivě. Cílem této práce pak bude analyzovat vliv kompenzace na toky jalových výkonů v distribuční síti.

2 DEFINICE JALOVÉHO VÝKONU

2.1 Výkony v obvodu s lineární zátěží

Jalový výkon vzniká vždy, když je mezi fázorem proudu vůči fázoru napětí úhel jiný, než 0° , nebo 180° . Jalový výkon je pak výkon odpovídající energii, dodané do zátěže a navracené zpět do zdroje v rámci jedné půlperiody. Střední hodnota tohoto výkonu je tedy rovna nule. Podstata jalového výkonu pak lze podle [1] vysvětlit pomocí následujícího rozkladu okamžité hodnoty výkonu na část činnou a jalovou. Uvažujeme zdroj sinusového napětí pouze o základní harmonické napájející obecnou lineární RLC zátěž.

Okamžité hodnoty napětí a proudu:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{V}) \quad (2.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{A}) \quad (2.2)$$

Kde U a I jsou efektivní hodnoty napětí a proudu, ω je úhlová rychlost, t je čas a φ je úhel mezi napětím a proudem.

Okamžitá hodnota výkonu je pak:

$$s(t) = u(t) \cdot i(t) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \quad (\text{VA}) \quad (2.3)$$

Tento výraz pak lze rozložit na dvě složky:

$$s(t) = (U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t) \cdot \cos(\varphi)) + (U \cdot I \cdot \sin(2\omega t) \cdot \sin(\varphi)) = p(t) + q(t) \quad (\text{VA}) \quad (2.4)$$

První část vztahu 2.4 lze označit jako okamžitá hodnota činného výkonu:

$$p(t) = (U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t) \cdot \cos(\varphi)) \quad (\text{W}) \quad (2.5)$$

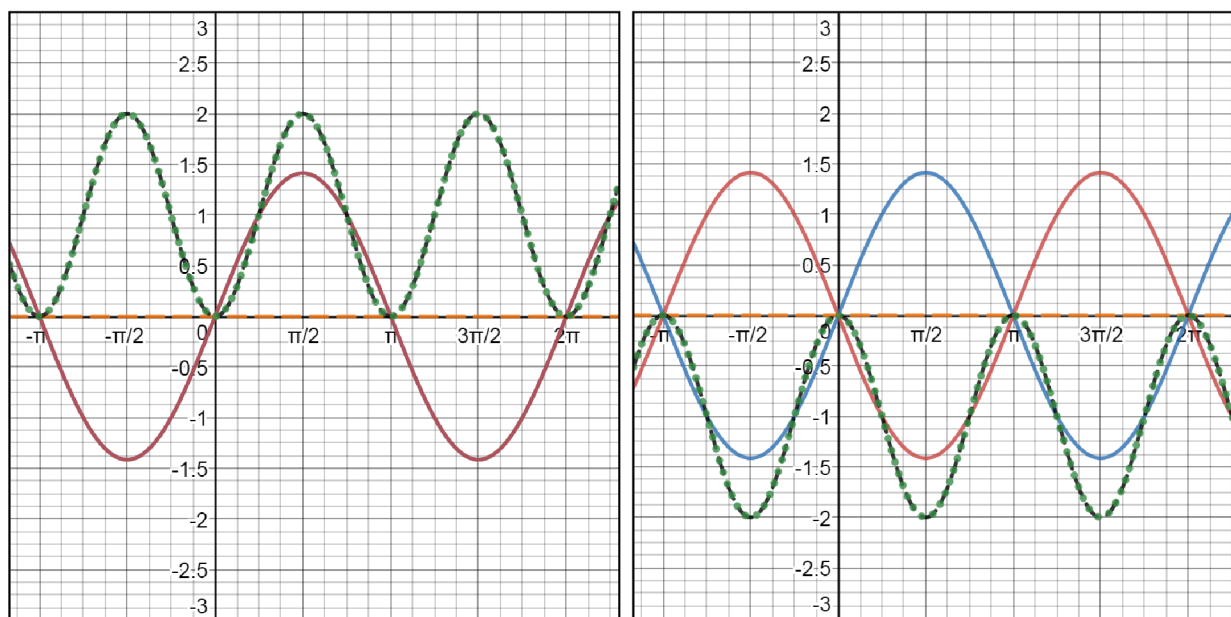
Druhá část vztahu 2.4 lze označit jako okamžitá hodnota jalového výkonu:

$$q(t) = (U \cdot I \cdot \sin(2\omega t) \cdot \sin(\varphi)) \quad (\text{VAr}) \quad (2.6)$$

Průběh činné složky výkonu $p(t)$ kmitá kolem své střední hodnoty, která odpovídá činnému výkonu a která je obecně nenulová (střední hodnota tohoto průběhu je rovna nule pouze v případě, že je i činný výkon roven nule), zatímco průběh jalové složky výkonu $q(t)$ kmitá kolem nuly a jeho střední hodnota je rovna nule. Maximální hodnota tohoto průběhu pak odpovídá jalovému výkonu.

Situace je znázorněna na Obr. 2-1, Obr. 2-2 a Obr. 2-3. Efektivní hodnoty napětí i proudu jsou vyneseny v poměrných jednotkách pro nominální stav, jsou tedy rovny 1. Výraz ωt byl nahrazen úhlovou proměnnou δ , osa x je tedy v radiánech.

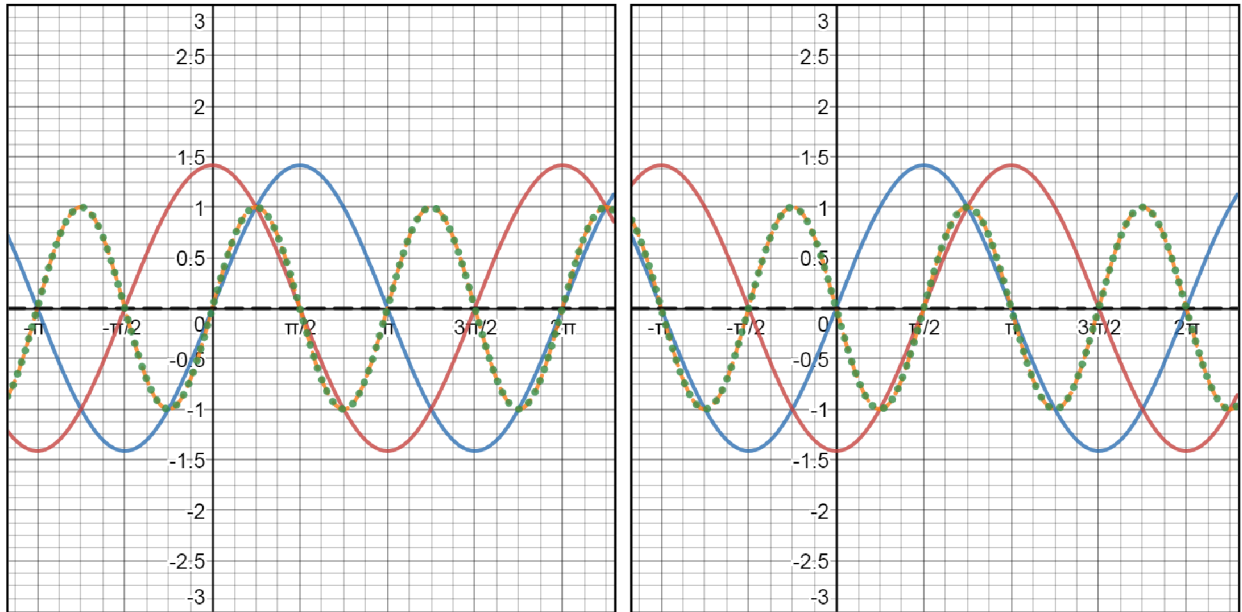
Legenda: — $u(\delta)$ — $i(\delta)$ $s(\delta)$ - - - $p(\delta)$ - - - $q(\delta)$



a)

b)

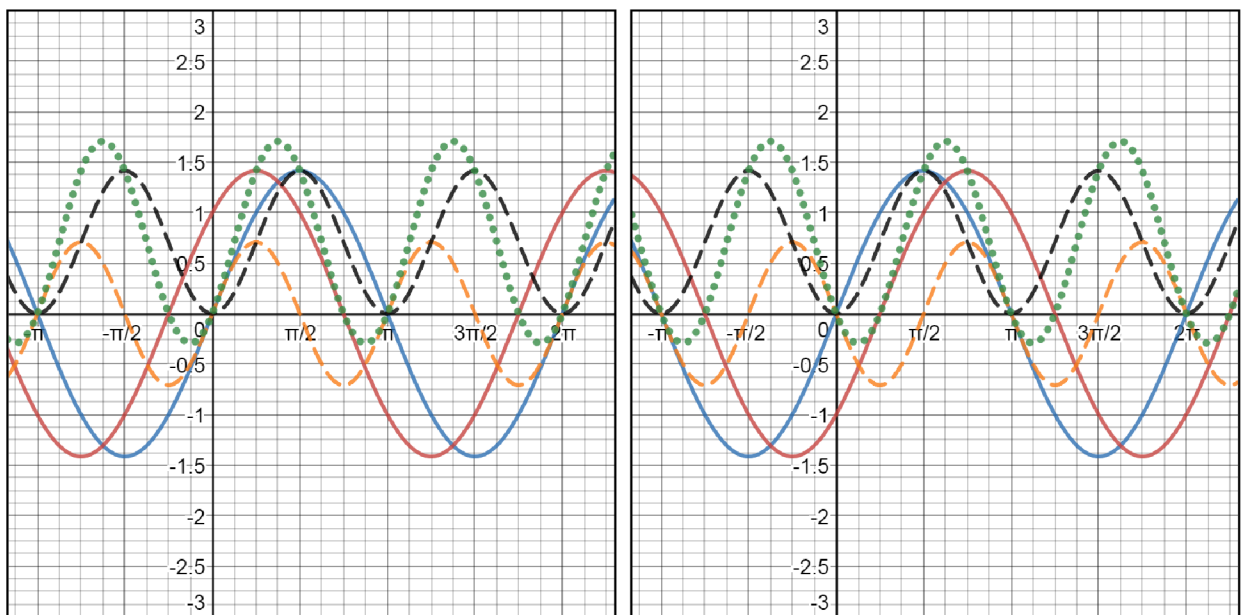
Obr. 2-1 Činný výkon a) odběr, b) dodávka



a)

b)

Obr. 2-2 Odběr jalového výkonu a) kapacitní, b) induktivní



a)

b)

Obr. 2-3 Odběr činného a jalového výkonu a) kapacitního, b) induktivního

Velikost zdánlivého výkonu S vyjadřuje hodnotu, které by nevyšší mohl dosáhnout činný výkon P při stejné efektivní hodnotě napětí U a efektivní hodnotě proudu I . Jalový výkon Q byl zaveden jako doplněk těchto dvou hodnot, aby bylo možné kvantifikovat jejich disproporci. Vztahy mezi výkony jsou následující:

$$S = U \cdot I \quad (\text{VA}) \quad (2.7)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{W}) \quad (2.8)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{VAr}) \quad (2.9)$$

Vztah mezi těmito výkony je pak následující:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA}) \quad (2.10)$$

Účinnost odběru je pak definován jako poměr mezi činným a zdánlivým výkonem:

$$\frac{P}{S} = \frac{U \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{U \cdot I} = \cos(\varphi) \quad (-) \quad (2.11)$$

2.2 Výkony v obvodu s nelineární zátěží

V dnešní době má velká část spotřebičů v NN síti charakter nelineární zátěže, proto je tedy nutno tento fakt respektovat. Jde například o zářivky s elektronickým předřadníkem, napájecí zdroje pro LED osvětlení, spínané zdroje v počítačích, televizorech, nabíječkách, atd. Pro zjednodušení budeme uvažovat nedeformovaný sinusový zdroj napětí napájející právě nelineární zátěž. Vztah pro výpočet okamžité hodnoty výkonu pak bude:

$$s(t) = u(t) \cdot i(t) = u_1(t) \cdot \sum_{h=0}^H i_h(t) = u_1(t) \cdot i_1(t) + u_1(t) \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H i_h(t) \quad (\text{VA}) \quad (2.12)$$

Dolní indexy zde uvádí pořadí harmonické složky. První část vztahu, tedy součin harmonických funkcí napětí a proudu stejné frekvence, je stejná jako u vztahu pro okamžitou hodnotu výkonu při lineární zátěži (vztah 2.3). Druhá část vztahu je součin napětí první harmonické s proudy všech ostatních harmonických. Střední hodnota výkonu charakterizovaného touto částí vztahu je rovna nule a to pro jakýkoliv úhel vzájemného posuvu. Tento výkon tedy stejně tak jako jalový výkon odvozený v předchozí kapitole nekoná žádnou činnou práci. Vztah pro zdánlivý výkon je pak:

$$S = U \cdot I = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} \quad (\text{VA}) \quad (2.13)$$

Po rozložení zdánlivého výkonu první harmonické na složku činného a jalového výkonu:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (\text{VA}) \quad (2.14)$$

Ve vztahu pro zdánlivý výkon, který odebírá nelineární zátěž je zde navíc oproti výkonu odebíraného lineární zátěží i deformační výkon D , jehož jednotka je voltampér deformační (VAd). Tento výkon stejně jako jalový výkon na první harmonické doprovází přenos činného výkonu a nekoná činnou práci. Vztah pro deformační výkon získáme úpravou vztahu 2.14:

$$D = \sqrt{U_1^2 \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} = \sqrt{S - P_1^2 - Q_1^2} \quad (\text{VAd}) \quad (2.15)$$

Účinník odběru je definovaný stejně jako v případě lineární zátěže, tedy jako poměr činného výkonu k zdánlivému výkonu, avšak nyní už nenabývá pouze hodnoty $\cos\varphi$. Celkový účinník odběru je označován písmenem λ , nebo zkratkou *PF* (*Power Factor*). Výraz $\cos\varphi_1$ je pak účinník na první harmonické, tedy účinník zahrnující pouze fázový posun mezi napětím a proudem první harmonické.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} \cdot \cos\varphi_1 \quad (-) \quad (2.16)$$

Pokud uvažujeme nezkreslené sinusové napětí, lze pak celkový účinník odběru definovat pomocí harmonického zkreslení proudu THD_1 a již výše zmíněného účinníku pro první harmonickou:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\cos^2\varphi_1}{1 + THD_{1,\text{ČSN}}^2}} = \sqrt{(1 - THD_{1,\text{IEC}}^2) \cdot \cos^2\varphi_1} \quad (-) \quad (2.17)$$

U harmonického zkreslení záleží na tom, zda je definováno podle české normy ČSN, nebo podle mezinárodní normy IEC. Vztah 2.17 je rozepsán pro obě varianty. Zatímco podle ČSN je THD_1 podíl proudu všech vyšších harmonických k proudu základní harmonické, podle IEC je to pak podíl proudu všech vyšších harmonických k celkovému proudu (který zahrnuje všechny harmonické, včetně té základní):

$$THD_{1,\text{ČSN}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_1} \quad (-) \quad (2.18)$$

$$THD_{1,\text{IEC}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^H I_h^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I} \quad (-) \quad (2.19)$$

Deformační výkon nelze snadným způsobem kompenzovat, na rozdíl od jalového výkonu na první harmonické. Paradoxně se některé kompenzační prostředky, které kompenzují jalový výkon na první harmonické, chovají jako nelineární zátěž a vytváří tak neúčinný deformační výkon. Například TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), tedy tyristorem řízený reaktor, vlivem úhlové regulace (regulace spínáním tlumivky v daném úhlu půlperiody) vytváří proudy vyšších harmonických a to především na třetí, páté a sedmé harmonické.

Jak již bylo výše naznačeno, jalový výkon nelze určit z měření činného a zdánlivého výkonu, jako jejich doplněk, jelikož zdánlivý výkon je u nelineární zátěže větší než zdánlivý výkon na první harmonické:

$$S \geq \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (\text{VA}) \quad (2.20)$$

Správný výpočet jalového výkonu tedy je:

$$Q = Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - D^2} \quad (\text{VAr}) \quad (2.21)$$

Vzhledem k výše uvedeným faktům se bude tato práce zabývat kompenzací jalového výkonu pouze na první harmonické.

2.3 Znaménková konvence

Pro sjednocení označování směru toku výkonů je nutné nejdříve zavést znaménkovou konvenci. Zavedeme tzv. spotřebičovou orientaci, tedy že odebraný činný výkon z uzlu označíme kladným znaménkem. U jalových výkonů je situace obtížnější, jelikož musíme kromě směru toku výkonu rozeznávat i charakter tohoto výkonu. Pokud se proud zpožďuje za napětím, jedná se o kladný odebraný induktivní jalový výkon (nebo rovněž o kladný dodaný jalový výkon kapacitního charakteru). Naopak pokud proud předbíhá napětí, jedná se o záporný odebraný kapacitní jalový výkon (nebo též kladný dodaný výkon induktivního charakteru).

Kondenzátor připojený k síti tedy dodává jalový výkon induktivního charakteru a naopak tlumivka dodává záporný jalový výkon induktivního charakteru (spotřebovává jalový výkon induktivního charakteru). Pokud bude v práci zmíněno pouze slovní spojení „jalový výkon“ bez označení charakteru, bude se jednat vždy o jalový výkon induktivního charakteru. V tomto případě pro postihnutí charakteru jalového výkonu postačuje pouze uvedení, zda jde o dodávku nebo odběr.

Tab. 2-1 Znaménková konvence výkonů – spotřebičová orientace

Výkon		Dodávka	Odběr
Činný		-	+
Jalový	Induktivní	-	+
	Kapacitní	+	-

3 ZDROJE JALOVÉHO VÝKONU

3.1 Pasivní prvky sítě jako zdroje jalového výkonu

Pasivní prvky sítě, jako jsou transformátory, venkovní vedení a zejména pak kabelová vedení jsou významnými zdroji jalového výkonu. Pokud bychom u daného prvku sítě uvažovali zvlášť příčnou susceptanci, pro jalový výkon generovaný tímto prvkem by platil vztah:

$$\Delta Q_{\text{pr.}} = 3 \cdot B \cdot U_f^2 \quad (\text{VAr}) \quad (3.1)$$

Pokud bychom naopak uvažovali pouze podélnou reaktanci X , vztah pro jalový výkon bude:

$$\Delta Q_{\text{pod.}} = 3 \cdot X \cdot I^2 \quad (\text{VAr}) \quad (3.2)$$

Jalový výkon generovaný pasivními prvky sítě má tedy dva zdroje. Jak plyne z vztahu 3.1, velikost generovaného jalového výkonu u příčných prvků závisí na napětí, které se v síti pohybuje okolo jmenovité hodnoty a pro zjednodušení lze říci, že je tato složka jalového výkonu konstantní. U vedení je příčná složka kapacitní povahy, dodává tedy kladný induktivní jalový výkon. U transformátorů je naopak příčná složka induktivní povahy, tedy induktivní jalový výkon odebírá.

Druhou složkou je jalový výkon generovaný podélnými prvky. Ze vztahu 3.2 plyne, že velikost jalového výkonu, který tato složka generuje, závisí na zatížení. To je však v síti proměnlivé. Podélné prvky jak u vedení, tak u transformátorů jsou induktivní povahy, tedy spotřebovávají induktivní jalový výkon. U venkovních a kabelových vedení, kde jsou charaktery podélných a příčných prvků rozdílné, může vzniknout stav, kdy se jalový výkon vyrobený příčným prvkem spotřebovuje podélným prvkem. Výkon, který odpovídá tomuto zatížení, se nazývá přirozený výkon.

Jelikož se výše uvedeným zjednodušením, tedy uvažováním příčných a podélných prvků odděleně, dopouštíme značné chyby, popíšeme si přesnější řešení pomocí dvojbranů. Obecný dvojbran je zobrazen na Obr. 3-1. Dvojbran představuje síťový prvek (vedení, transformátor, ...), který je charakterizován přenosovými konstantami \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} a \bar{D} , jejichž výpočet závisí na použitém typu článku (bude detailněji popsáno pro jednotlivé prvky v podkapitolách). V našem případě je na konci dvojbranu fázová hodnota jmenovitého napětí \bar{U}_{f2} a proud \bar{I}_2 se mění od nuly až do jmenovité hodnoty prvku. Úhel mezi tímto napětím a proudem je roven nule. Znamená to tedy, že konec síťového prvku je zatížen pouze činným výkonem. Pomocí kaskádních rovnic (vztah 3.3 a 3.5) lze vypočítat fázor napětí (\bar{U}_{f1}) a proudu (\bar{I}_1) na začátku prvku.

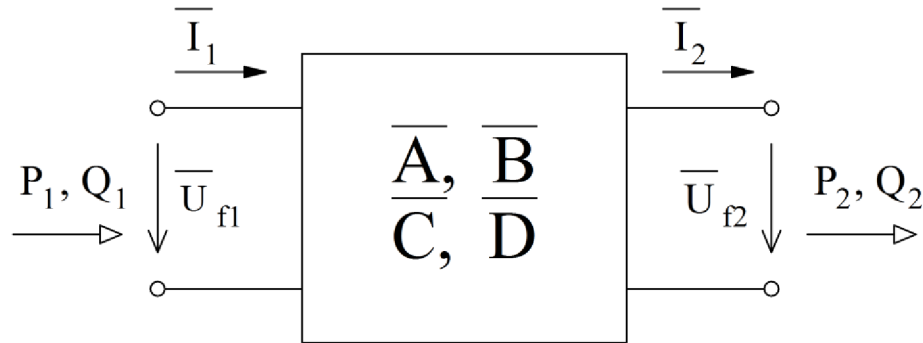
$$\bar{U}_{f1} = \bar{A} \cdot \bar{U}_{f2} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \quad (\text{V}) \quad (3.3)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_{f2} + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \quad (\text{A}) \quad (3.4)$$

Z těchto hodnot pak lze vypočítat komplexní hodnotu zdánlivého výkonu (vztah 3.5), jehož imaginární část je jalový výkon vstupující do síťového prvku.

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 = 3 \cdot \bar{U}_{f1} \cdot \bar{I}_1^* \quad (\text{VA}) \quad (3.5)$$

Jelikož je konec vedení zatížen pouze činným odběrem, můžeme hodnotu jalového výkonu na začátku síťového prvku označit za takovou hodnotu, kterou daný síťový prvek vygeneruje.



Obr. 3-1 Obecný dvojbran

Grafy jsou pak zpracovávány pro jednotlivé síťové prvky tak, že na vodorovné ose je poměrné zatížení na konci síťového prvku, tedy zatížení vztažené k jmenovitému proudu. Na svislé ose je pak jalový výkon na začátku síťového prvku. Znaménko jalového výkonu odpovídá znaménkové konvenci zavedené v Tab. 2-1.

Při řešení úlohy tímto způsobem se taktéž dopouštíme určité nepřesnosti. Jednak absolutní hodnota napětí není ve skutečnosti konstantní (pohybuje se v určitém tolerančním pásmu) a dále pak jako uzel, kde je konstantní hodnota napětí (jak absolutní hodnota, tak jeho úhel) by bylo vhodnější brát začátek síťového prvku. Tento způsob by však značně zkomplikoval řešení úlohy, jelikož bychom nedocílili úplné kompenzace na konci síťového prvku (kvůli fázovému posuvu napětí \bar{U}_{f2} vůči hodnotě proudu \bar{I}_2). Tyto chyby jsou však zanedbatelné a pro ilustraci vzniku jalového výkonu v prvcích sítě je výše uvedené řešení dostačující.

3.1.1 Kabelové vedení VN

Pro řešení kabelů byl použit typ článku s rovnoměrně rozloženými parametry. Tento typ článku vychází z toho předpokladu, že je vedení složeno z nekonečně velkého počtu nekonečně malých podélných impedancí a příčných admitancí. Přenosové konstanty pak mají tvar:

$$\bar{A} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (-) \quad (3.6)$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_v \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (\Omega) \quad (3.7)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{Z}_v} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (S) \quad (3.8)$$

$$\bar{D} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (-) \quad (3.9)$$

Kde $\bar{\gamma}$ je konstanta šíření popsána rovnicí 3.10, \bar{Z}_v je vlnová impedance popsána rovnicí 3.11 a l je délka vedení v km.

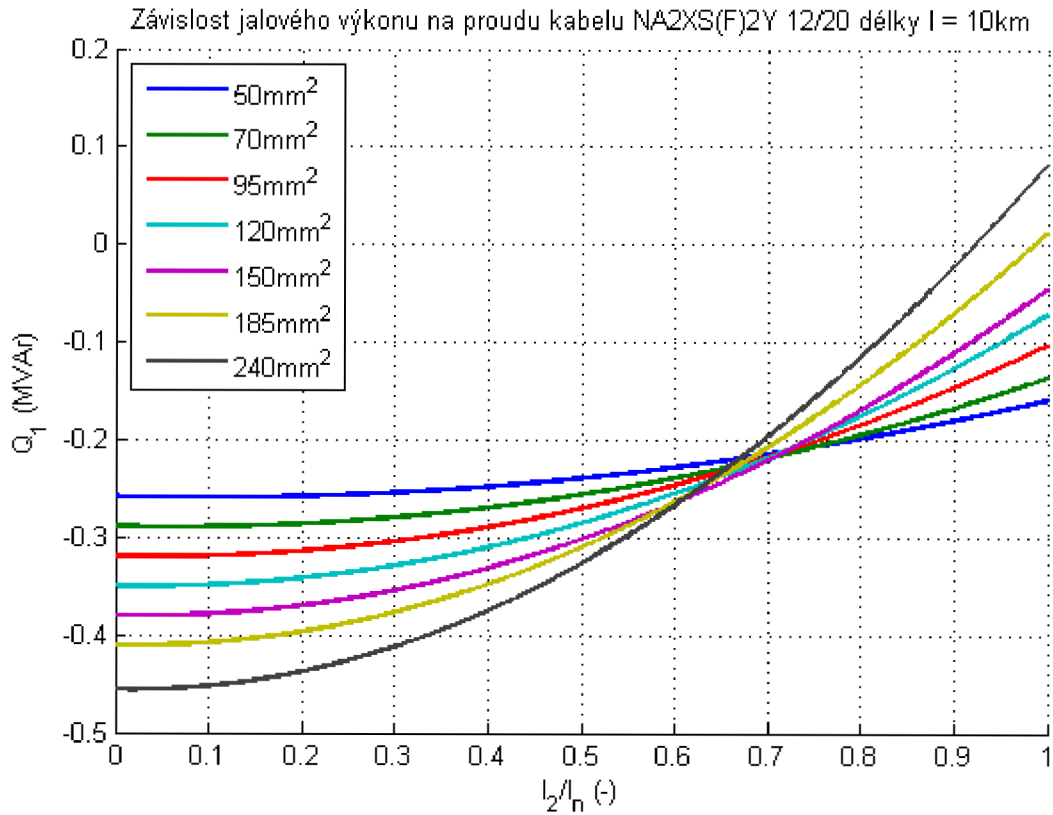
$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k} = \sqrt{(R_k + j\omega L_k) \cdot (G_k + j\omega C_k)} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (3.10)$$

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}_k}{\bar{Y}_k}} = \sqrt{\frac{(R_k + j\omega L_k)}{(G_k + j\omega C_k)}} \quad (\Omega) \quad (3.11)$$

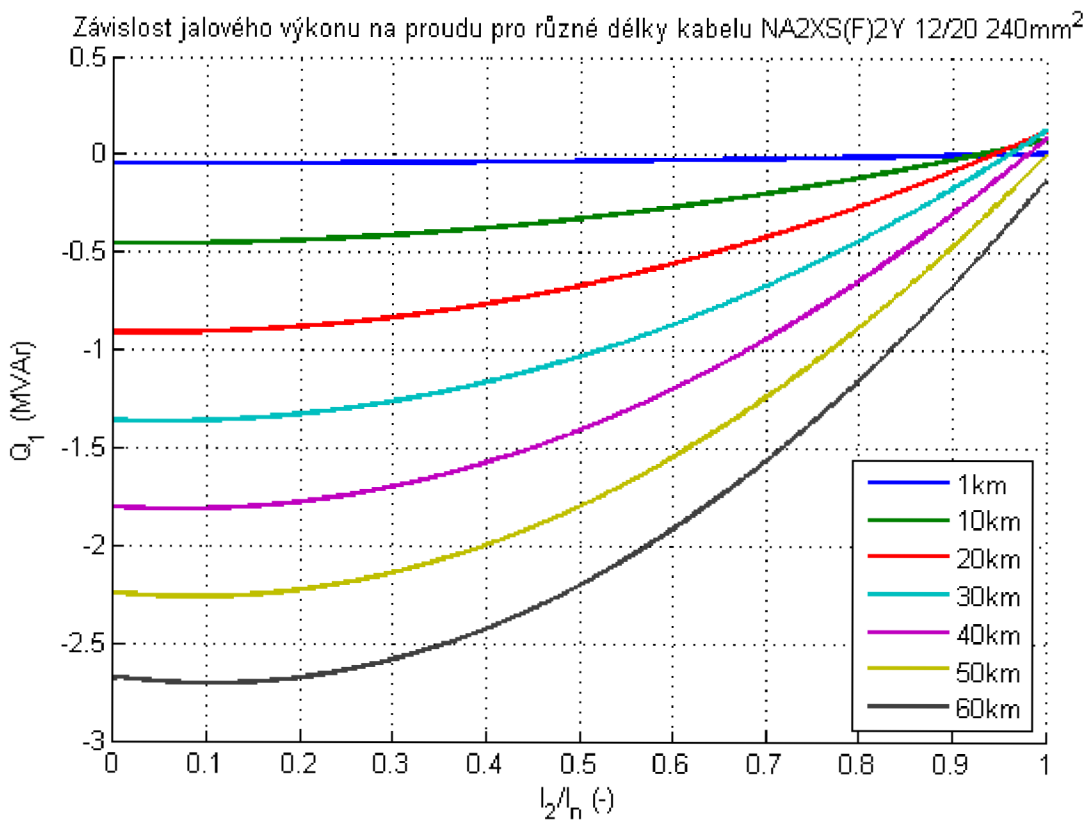
Kde \bar{Z}_k je hodnota podélné impedance na jeden kilometr délky, která zahrnuje hodnoty podélného odporu R_k a indukčnost L_k na kilometr délky. \bar{Y}_k je hodnota příčné admitance na kilometr délky, která zahrnuje konduktanci G_k a kapacitu C_k na kilometr délky vedení.

Pro ilustraci vzniku jalového výkonu v VN kabelech byl zvolen hojně používaný kabel NA2XS(F)2Y 12/20 v trojúhelníkovém uspořádání v zemi o různých průřezech. Kabelové vedení má značnou hodnotu příčné kapacity v porovnání s venkovním vedením (přibližně 30x větší, než u venkovního vedení), zatímco indukčnost je u kabelových vedení menší (přibližně 3x menší v porovnání s venkovním vedením). Závislost jalového výkonu generovaného výše uvedeným kabelem na zatížení je uvedena na Obr. 3-2. Z grafu lze vidět, že při nulovém zatížení se uplatňuje především příčná kapacita kabelu a se zvětšujícím se zatížením kompenzuje jalový výkon generovaný touto kapacitou jalový výkon spotřebovaný podélnou indukčností kabelu. Graf je vytvořený pro kabely o různých průřezech s jednotnou délkou 10 km. Z tohoto grafu si lze všimnout, že pro takto dlouhý úsek se pro hojně používaný průřez 240 mm² kabel chová z hlediska jalového výkonu neutrálně až při zatížení přesahující 90 %. Takto velkého zatížení kabelu se však v reálných podmínkách nedosahuje. Při zatížení kabelu, které se v praxi pohybuje okolo 20 – 30 % se u nejpoužívanějších průřezů, tedy 120 mm² a 240 mm² generuje na 10 km kabelu jalový výkon induktivního charakteru 0,33 MVar a 0,42 MVar.

Z grafu na Obr. 3-3 si lze všimnout, že závislost jalového výkonu kabelu na zatížení není lineárně úměrná jeho délce. Nelze tedy jednoznačně tvrdit, že každý kilometr kabelu generuje určitou velikost jalového výkonu. Jinak se z hlediska jalového výkonu bude chovat například deset kilometrových úseků, než jeden desetikilometrový. Z tohoto grafu si lze také všimnout, že zatímco 10km úsek je vykompenzován při zatížení mírně přesahující 90 %, 60 km úsek se nevykompenzuje ani při 100 % zatížení. Pro ilustraci tohoto jevu byl použit kabel NA2XS(F)2Y 12/20 o průřezu 240 mm² opět v trojúhelníkovém uspořádání v zemi. Jako zdroj parametrů kabelů byl využit katalog od výrobce [2].



Obr. 3-2 Závislost jalového výkonu na zatížení kabelu



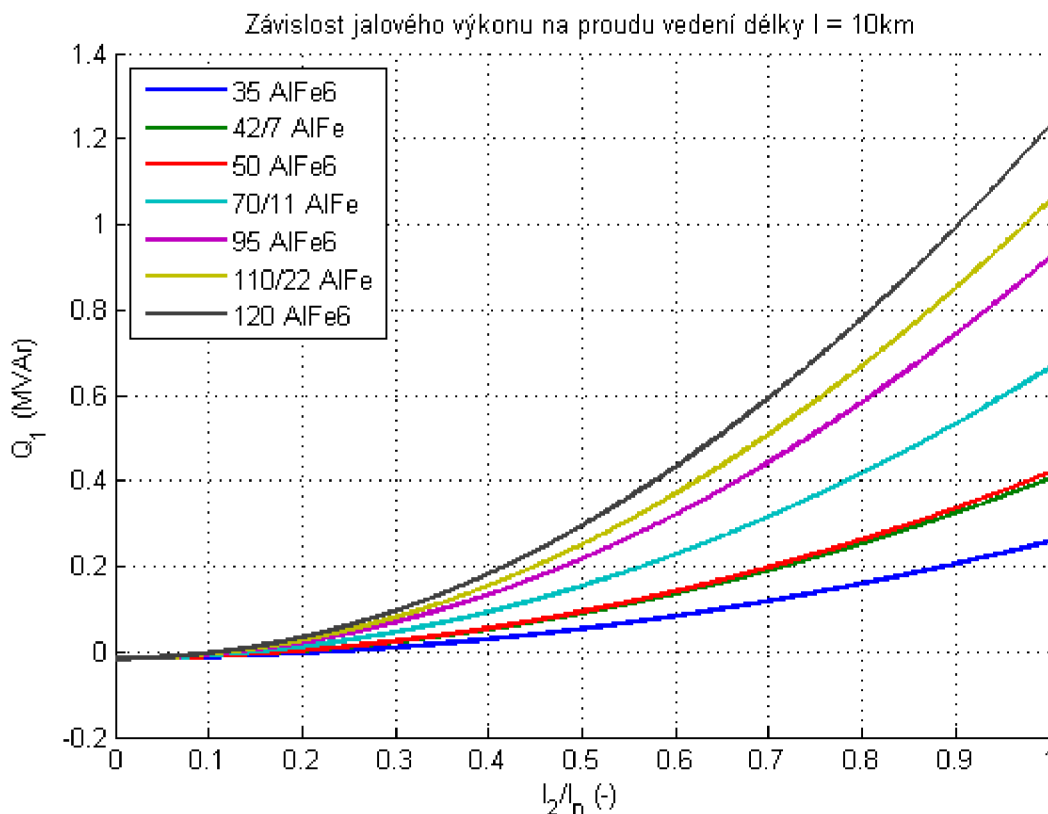
Obr. 3-3 Závislost jalového výkonu na zatížení pro různé délky kabelu

3.1.2 Venkovní vedení VN

Pro řešení venkovního vedení byl využit stejný typ článku jako u kabelového vedení, tedy článek s rovnoměrně rozloženými parametry. Jak již bylo řečeno výše, venkovní vedení má větší indukčnost než kabelové vedení a podstatně menší kapacitu. Jak jde vidět na Obr. 3-4, kapacitní složka převládá pouze u velmi malých zatížení. Úsek dlouhý 10 km je vykompenzován už při zatížení od 11 % do 23 %. Při vyšších zatíženích se již vedení chová jako zdroj kapacitního jalového výkonu, tedy jako spotřebič induktivního jalového výkonu.

Při zatížení v rozmezí 20 – 30 % se jalový výkon venkovního vedením pohybuje od 3 kVAr dodávky jalového výkonu do 100 kVAr spotřeby jalového výkonu (podle průřezu vedení). Nutno podotknout, že průřezy venkovních vedení a kabelů nelze přímo srovnávat, jelikož venkovní vedení stejného průřezu mají oproti kabelům větší zatížitelnost. To je způsobeno jednak lepším odvodem tepla a pak také faktem, že vodiče venkovního vedení mohou dosahovat vyšších teplot oproti kabelům. Vedení 95AlFe6, které je proudovou zatížitelností srovnatelné s kabelem NA2XS(F)2Y 12/20 o průřezu 120 mm², spotřebuje při výše uvedeném rozpětí zatížení okolo 20 kVAr až 70 kVAr, zatímco výše zmíněný kabel dodává 330 kVAr až 340 kVAr induktivního charakteru.

Parametry venkovních vedení byly převzaty z tabulek z podnikové normy energetiky PNE 33 3430-0 z přílohy 1, parametry venkovních vedení a kabelů [3]. Hodnoty jsou uvedeny pro rovinné uspořádání vodičů. Podle [3] se pro jiná uspořádání mohou lišit reaktance mezi krajními a střední fází až o cca 6 %, u vedení s izolovanými vodiči o více než 8 %. Uvažovaná napěťová hladina je 22 kV, pro napěťovou hladinu 35 kV jsou parametry mírně odlišné.



Obr. 3-4 Závislost jalového výkonu venkovních vedení 22kV na zatížení

3.1.3 Venkovní a kabelová vedení NN

U NN vedení nelze pro výpočet použít článek s rovnoměrně rozloženými parametry, jelikož u těchto vedení je zanedbatelná kapacita. U venkovních vedení by bylo možné kapacitu vypočítat, avšak v porovnání s kabely je jejich kapacita zanedbatelná. Výrobci NN kabelů však příčnou kapacitu do katalogových listů neuvádí, jelikož její velikost je zanedbatelná. Budeme tedy uvažovat, že jsou hodnoty konduktance a susceptance NN venkovních i kabelových vedení rovny nule.

Pro řešení použijeme článek se soustředěnými parametry a to článek typu Π . Za hodnoty příčné admittance dosadíme nulu. Význam tedy bude mít pouze přenosová konstanta \bar{B} . Přenosové konstanty pro tento typ článku jsou:

$$\bar{A} = 1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{2} \quad (-) \quad (3.12)$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_k \cdot l \quad (\Omega) \quad (3.13)$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{4} \right) \quad (S) \quad (3.14)$$

$$\bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{2} \quad (-) \quad (3.15)$$

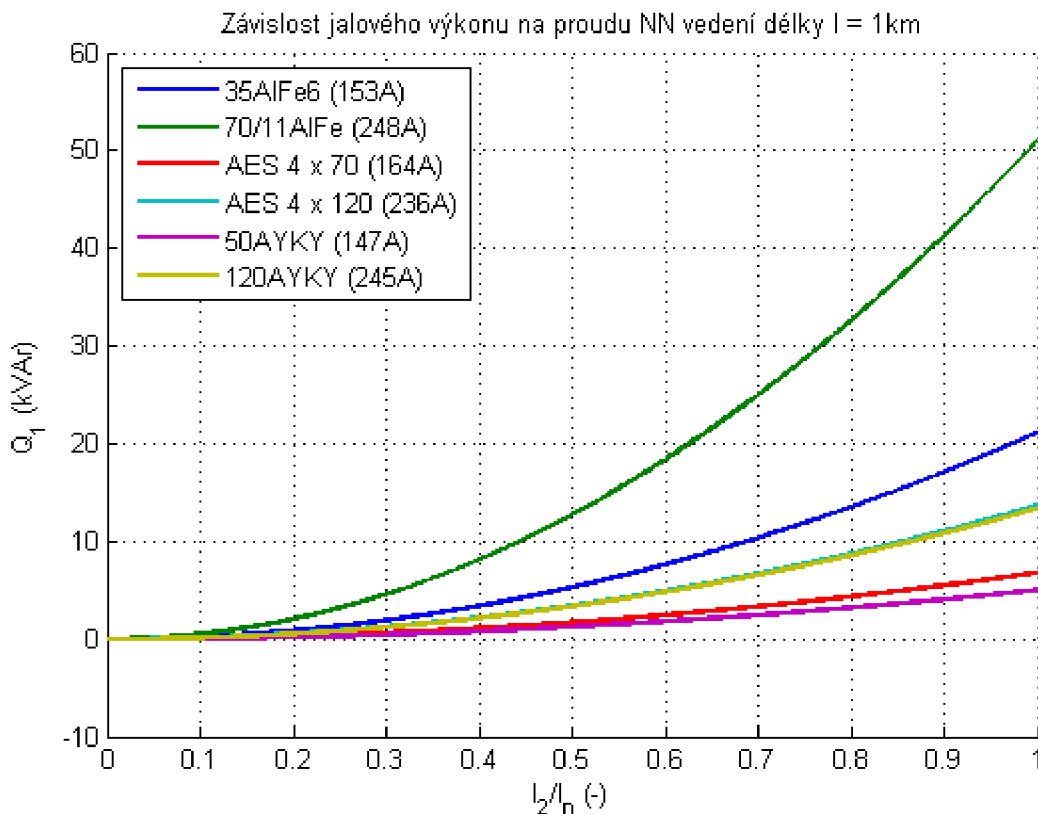
Kde \bar{Z}_k je podélná impedance na kilometr délky vedení a \bar{Y}_k je příčná admittance na kilometr délky vedení.

Pro ilustraci vzniku jalového výkonu byly použity tři typy vedení a to venkovní AlFe, slané závěsné kabely AES a kabely AYKY. Každý typ vedení je v grafu na Obr. 3-5 zastoupen dvakrát. Průřezy vedení jsou voleny tak, aby byla proudová zatížitelnost pro každý typ přibližně srovnatelná. Proudová zatížitelnost je uvedena v závorce v legendě grafu. Délka vedení byla pro ilustraci zvolena 1km.

Z grafu na Obr. 3-5 jde vidět značný rozdíl v jalovém výkonu mezi venkovním vedením a kabelovým vedením. To je způsobeno především tím, že u venkovního vedení je vzdálenost mezi fázovými vodiči značně větší, než u kabelů, což způsobuje větší podélnou indukčnost.

Kabelizace NN vedení je tedy z hlediska jalového výkonu pozitivní. Avšak menší indukčnost vedení má i nevýhodu. Pokud jsou v síti zdroje, které regulují napětí pomocí jalového výkonu, menší indukčnost vedení snižuje efektivitu této regulace, neboť je tato regulace založena právě na principu vzniku úbytku napětí na reaktanci průchodem jalového proudu. Pro dosažení žádaného napětí je tedy u kabelových vedení potřeba dodat větší jalový výkon, než by tomu bylo u venkovního vedení (při předpokladu stejného činného odporu vedení a kabelu).

Rozdíl mezi venkovním a kabelovým vedením je patrný, zatímco pro jmenovitý proud okolo 240 A kabel AYKY, nebo závěsný kabel AES v rozmezí zatížení od 20 do 40 % spotřebovává přibližně 500 VAr – 2 kVAr, venkovní vedení při tomto zatížení spotřebovává přibližně 2 – 8 kVAr jalového výkonu induktivního charakteru.



Obr. 3-5 Závislost jalového výkonu na zatížení pro různá NN vedení

3.1.4 Transformátory 22kV/0,4kV

Pro řešení byl použit článek typu T, jak je u transformátorů obvyklé. Nejdříve je potřeba vypočítat podélnou impedanci a příčnou admitanci transformátoru a to ze znalosti parametrů transformátoru, které byly převzaty z [4]. Byla vybrána řada trojfázových olejových hermetizovaných transformátorů z výkonové řady 50 – 2500 kVA s Al vinutím. Pro zpracování byly použity transformátory, které jsou nejvíce používány, tedy do 800 kVA.

Výpočet podélné impedance \bar{Z}_t pomocí poměrných hodnot odporu vinutí r_t a rozptylové reaktance x_t :

$$r_t = \frac{\Delta P_k}{S_n} \quad (-) \quad (3.5)$$

$$x_t = \sqrt{u_k^2 - r_t^2} \quad (-) \quad (3.5)$$

$$\bar{Z}_t = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot (r_t + jx_t) \quad (\Omega) \quad (3.5)$$

Výpočet příčné admitance \bar{Y}_t pomocí poměrných hodnot konduktance g_t , reprezentující ztráty v železe a magnetizační susceptance b_t :

$$g_t = \frac{\Delta P_0}{S_n} \quad (-) \quad (3.5)$$

$$b_t = \sqrt{i_0^2 - g_t^2} \quad (-) \quad (3.5)$$

$$\bar{Y}_t = \frac{S_n}{U_n^2} \cdot (g_t - jb_t) \quad (S) \quad (3.5)$$

Ve výše uvedených vztazích jsou hodnoty následujících parametrů převzaty z [4]:

S_n – jmenovitý výkon transformátoru, U_n – jmenovité napětí na straně vyššího napětí, u_k – napětí nakrátko, i_0 – proud naprázdno, ΔP_k – činné ztráty nakrátko, ΔP_0 – činné ztráty naprázdno.

Výše vypočítané hodnoty podélné impedance a příčné admitance jsou pak dosazeny do vztahů pro výpočet přenosových konstant T článku:

$$\bar{A} = 1 + \frac{\bar{Z}_t \cdot \bar{Y}_t}{2} \quad (-) \quad (3.12)$$

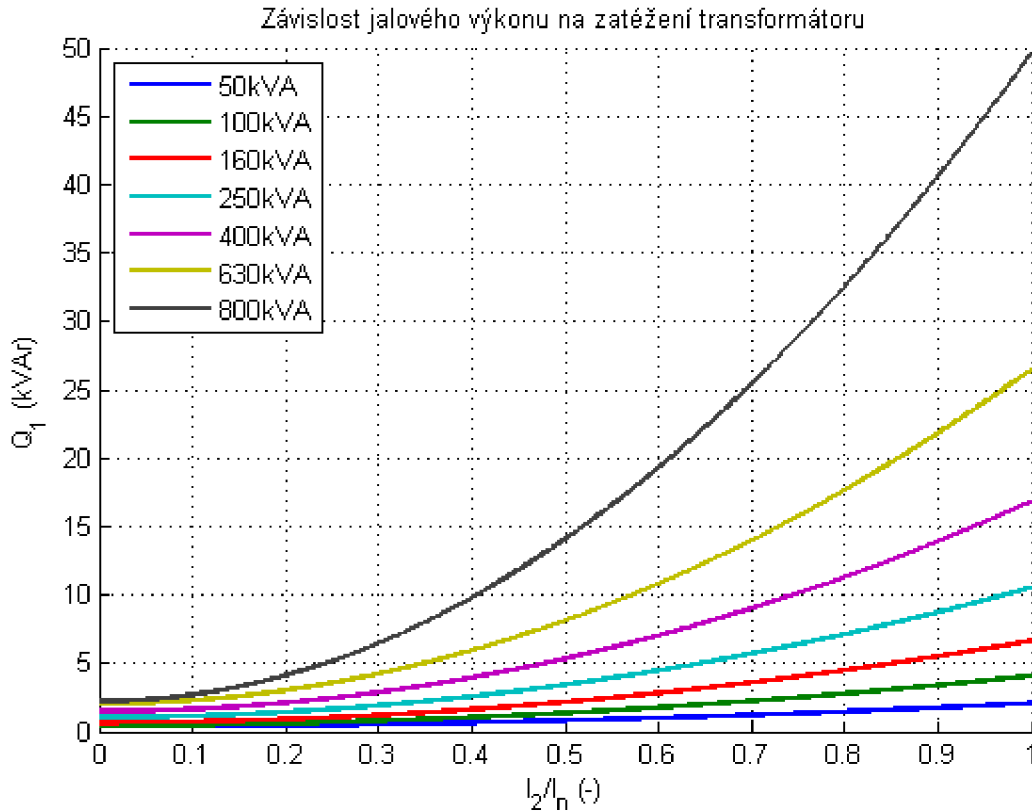
$$\bar{B} = \bar{Z}_t \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_t \cdot \bar{Y}_t}{4} \right) \quad (\Omega) \quad (3.13)$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_t \quad (S) \quad (3.14)$$

$$\bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_t \cdot \bar{Y}_t}{2} \quad (-) \quad (3.15)$$

Dále jsou vypočítané hodnoty přenosových konstant zpracovávány stejným způsobem jako u předešlých bodů.

Na rozdíl od vedení má příčná admitance transformátoru induktivní charakter. Z grafu na Obr. 3-6 lze vidět, že v celém pásmu zatížení má transformátor charakter induktivního odběru. V rozmezí typického zatížení transformátoru, tedy v pásmu mezi 20 – 40 % zatížení spotřebuje nejpoužívanější transformátor 630 kVA okolo 3 – 6 kVAr induktivního jalového výkonu. V tomto pásmu zatížení zároveň pracuje transformátor s nejvyšší účinností. Dále lze v grafu vidět velký odstup mezi transformátory 630 kVA a 800 kVA. To je způsobeno tím, že transformátory do 630 kVA mají napětí nakrátko 4 %, zatímco od 800 kVA mají napětí nakrátko 6 %.



Obr. 3-6 Závislost jalového výkonu na zatížení transformátoru pro různé transformátory

3.2 Chování decentrálních zdrojů z hlediska jalového výkonu

Zdroje vnořené výroby rozdělujeme z hlediska jalového výkonu na říditelné a neříditelné. Toto rozdělení je z hlediska fyzických možností generátorů nebo měničů.

3.2.1 Decentrální zdroje s možností řízení jalového výkonu

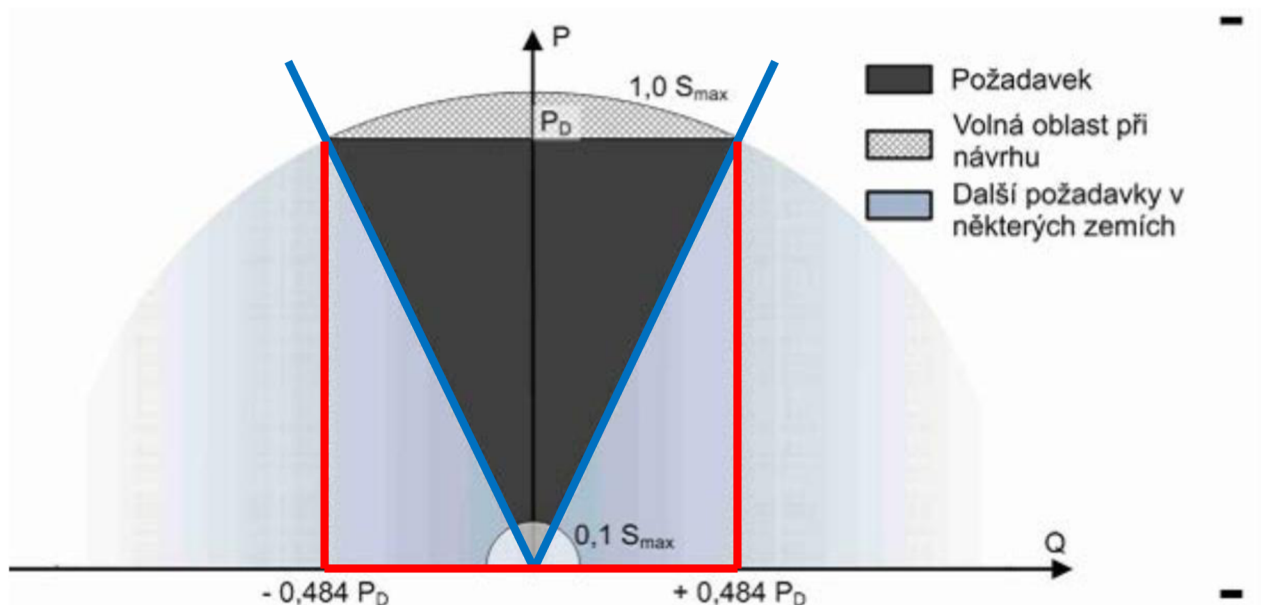
Jako typický zdroj, u kterého lze snadno měnit jalový výkon a to jak v induktivní, tak v kapacitní oblasti jsou synchronní generátory. Řízení spočívá v regulaci budícího proudu rotoru. Podbuzený generátor dodává do sítě kapacitní jalový výkon, přebuzený generátor dodává induktivní jalový výkon. Regulace je omezena především limity samotného stroje a to v přebuzeném stavu limitem teploty statorového vinutí (maximální statorový proud) a limitem teploty rotorového vinutí (maximální budící proud). V podbuzeném stavu je limitní hodnotou jalového výkonu taktéž maximální statorový proud, dále pak teplotní limity čel statoru a zejména pak mez statické stability stroje. Synchronní generátory jsou používány především u malých vodních elektráren, bioplynových elektráren, nebo ojedinelé u některých typů větrných elektráren s převodovkou.

Dalším typem generátoru, u kterého lze regulovat jalový výkon je kroužkový asynchronní generátor napájený do kotvy. Tento typ generátoru má vinutý rotor, který je napájen ze střídače. Frekvenci proudu injektovaného do rotoru řídí regulátor v závislosti na otáčkách stroje a frekvenci sítě. Výhodou tohoto typu generátoru je, že dokáže pracovat v širokém rozsahu otáček. Jiný název pro tento typ generátoru je dvojitě napájený asynchronní generátor, anglicky pak „*Double-Fed Induction Generator*“. Generátor má podle [5] stejný rozsah regulace jalového

výkonu jako synchronní generátor. Tento typ generátoru se používá nejčastěji u větrných elektráren, avšak začíná se uvažovat i o nasazení u malých vodních elektráren.

Posledním a to hojně užívaným zdrojem jsou střídače. Ty mění stejnosměrné napětí pomocí pulzní šířkové modulace na střídavé sinusové napětí. U střídačů je z hlediska dodávky jalového výkonu (a to jak v induktivní, tak v kapacitní oblasti) limitem především kapacita kondenzátoru v stejnosměrném meziobvodu. Střídače jsou používány zejména u fotovoltaických elektráren. Dále se střídače používají například i u větrných elektráren se synchronním generátorem. U této konfigurace je výstupní napětí z generátoru před vstupem do střídače usměrněno pomocí polovodičových diod. Toto řešení má výhodu především v širokém rozsahu provozních otáček.

Požadavky na výše uvedené zdroje z hlediska regulace jalového výkonu udává PPDS v příloze č. 4 nazvané „pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy“ [6]. Zde jsou uvedeny nároky, které musí být každý zdroj připojený do distribuční sítě splňovat.



Obr. 3-7 Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (převzato z [6])

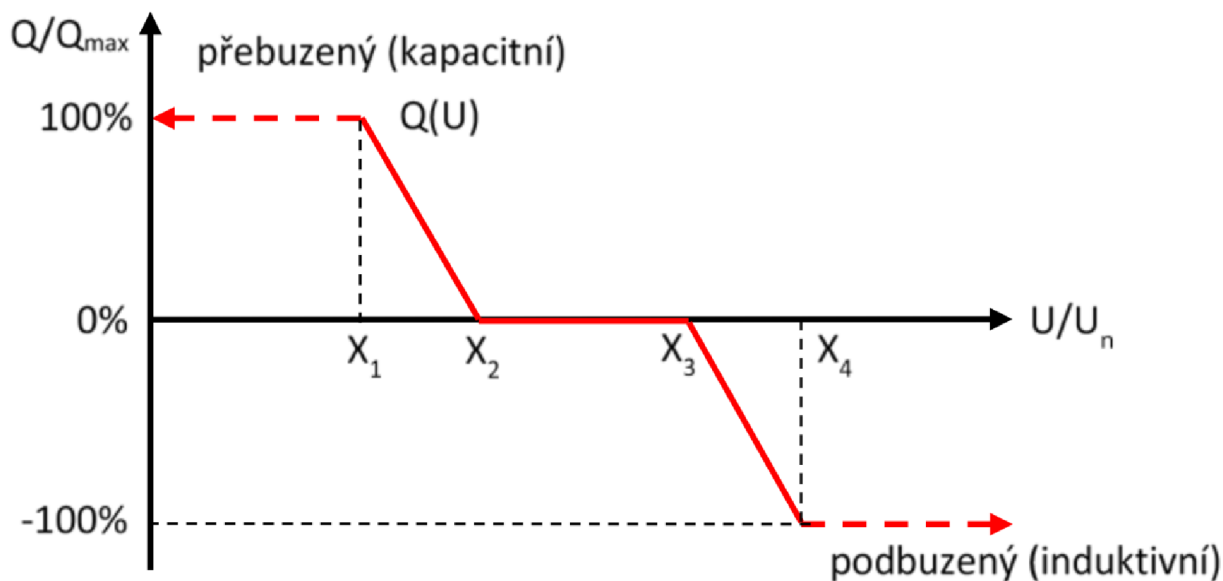
V [6] je uvedeno, že černě vybarvená oblast PQ diagramu na Obr. 3-7 je povinná a distributor má nárok ji využít. Limity na ose Q ($-0,484P_D : 0,484P_D$) ve své podstatě udávají meze $\tan\varphi$. Po přepočtu této hodnoty na účinník $\cos\varphi$ jsou tyto limity od 0,9 induktivního charakteru po 0,9 kapacitního charakteru (modré čáry). Hodnota P_D je pak hodnota navrhovaného výkonu výroby. Měníče obvykle nemají problém povinnou část charakteristiky splnit, většina z nich umožňuje navíc provoz v červeně vyznačené oblasti.

Podle [6] jsou pak (podle nastavené žádané hodnoty) možné způsoby regulace jalového výkonu následující:

- | | |
|--|-------------------|
| • 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

Podle [6] si způsob regulace jalového výkonu volí distributor v závislosti na místních síťových podmínkách. Nejčastější způsob regulace jalového výkonu je typu $Q(U)$. Ten je znázorněn na Obr. 3-8, přičemž napětí U je v tomto obrázku napětí v místě připojení. Body X_1 až X_4 si volí distributor opět podle místních podmínek v místě připojení. Nutno však připomenout, že tento způsob regulace je tím účinnější, čím větší má vedení reaktanci. NN vedení však mají podle [3] odpor daleko větší než reaktanci, pro vyrovnání úbytku napětí způsobeného činnou výrobou tedy bude potřeba větší množství jalového výkonu.



Obr. 3-8 Charakteristika funkce $Q(U)$ (převzato z [6])

Dále jsou pak v [6] uvedeny další požadavky. Pokud je činný výkon větší, než 10 % jmenovitého činného výkonu výroby, musí být účinník při normálních ustálených provozních podmínkách při dovoleném rozsahu tolerance napětí v mezích od 0,9 induktivní po 0,9 kapacitní (černě vyznačená oblast v Obr. 3-7). Pokud je však činný výkon menší než 10 % jmenovitého činného výkonu výroby, může jalový výkon dosahovat maximálně 10 % jeho jmenovitého výkonu.

3.2.2 Decentrální zdroje bez možnosti řízení jalového výkonu

Typickým zástupcem v této kategorii jsou asynchronní generátory s kotvou nakrátko. Tyto generátory se z hlediska jalového výkonu chovají stejně jako asynchronní motory, tedy odebírají induktivní jalový výkon. Tento jalový výkon proto musí být kompenzován kondenzátory. Podle [5] však kompenzační kondenzátory bývají často předimenzovány a výroba pak spotřebovává jalový výkon kapacitního charakteru (dodává jalový výkon induktivního charakteru). Tento typ generátoru se nejčastěji používá u malých vodních elektráren nebo u některých typů větrných elektráren.

3.3 Chování nabíječek elektromobilů z hlediska jalového výkonu

Způsoby nabíjení elektromobilů lze rozdělit podle několika kritérií. Jedním z nich je, zda je dobíjení stejnosměrné, nebo střídavé. Střídavé dobíjení je uskutečňováno prostřednictvím palubní nabíječky daného automobilu. Standardem je jednofázové nabíjení, některé automobily podporují

i dvojfázové nebo trojfázové nabíjení. Tento způsob nabíjení je podstatně pomalejší, než je tomu u stejnosměrného nabíjení. Limitním faktorem pro střídavé nabíjení je výkon nabíječky vestavěné v elektromobilu, který pak dále limituje velikost předřazeného jističe. U jednofázového nabíjení je limit 10 nebo 16 A (což odpovídá 2,3 respektive 3,7 kW), u trojfázového 16 nebo 32 A (11, respektive 22 kW).

Stejnosemné nabíjení je pak uskutečňováno pomocí externí nabíječky, která obsahuje měnič. Limitním faktorem je pak vlastní výkon měniče. Nabíječka integrovaná v elektromobilu při tomto způsobu nabíjení není v provozu. Velikosti příkonu těchto nabíječek mohou dosahovat až 150kW, dnes používané nabíječky však mají příkon typicky kolem 50 kW.

Z hlediska vlivů elektromobilů a dobíjecích stanic na síť zatím neexistuje žádný zvláštní předpis, jak by se měly chovat z hlediska jalového výkonu. Avšak u stejnosměrných dobíjecích stanic by teoreticky mohla být možnost nastavení $Q(U)$ charakteristiky pro podporu napětí pomocí jalového výkonu (stejně jako je tomu u výroben), nebo možnost využívat dobíjecí stanice jako kompenzační zařízení. U střídavého nabíjení nelze očekávat, že by výrobci elektromobilů nějak upravovali chování palubní nabíječky z hlediska jalového výkonu.

Pravidla provozování distribučních soustav (PPDS) v příloze č. 6 nazvané „*standardy připojení zařízení k distribuční soustavě*“ [7]. Dobíjecí stanice se zde již považují za zařízení „*pro které jsou vzhledem k jejich širokému rozšíření zapotřebí obecná pravidla*“. Pro elektromobily dobíjené jednofázově je limit pro „*potřebu posuzování zpětných vlivů elektrických zařízení na síť NN*“ 3,7 kVA, pro trojfázové dobíjení 11 kVA.

Jak již bylo výše zmíněno, neexistují žádné předpisy pro chování nabíjecích stanic elektromobilů z hlediska jalového výkonu. Co se tedy této problematiky týče, může se každá dobíjecí stanice, respektive každý elektromobil chovat úplně jinak. Existují však různé články, které se věnují měření dobíjecích stanic. Měření zpětného vlivu nabíjení elektromobilů na distribuční soustavu se věnuje například [8], kde je popsáno chování nabíjecího stojanu ABB TERA 53, který má tři možnosti nabíjení a to jednofázové, trojfázové a stejnosměrné.

Dle tohoto článku při jednofázovém nabíjení 3,6 kW je po většinu doby nabíjení dodáván jalový výkon induktivního charakteru o velikosti 0,12 kVAr, přičemž na konci nabíjení tento výkon vzroste na krátkou dobu na 0,27 kVAr. Celková dodaná jalová energie odpovídá 3 % celkové činné energie za jeden dobíjecí cyklus.

Při střídavém nabíjení 22 kW článek uvádí, že mělo nabíjení opět dodávku jalového výkonu induktivního charakteru o velikosti 3 kVAr, rovnoměrně rozloženého do všech fází. Celková dodaná jalová energie pak odpovídala 13 % celkové činné energie za jeden dobíjecí cyklus.

Při stejnosměrném nabíjení dle článku odebíraný činný výkon nebyl konstantní. V páté minutě dosáhnul maxima 51 kW a postupně klesal, na konci nabíjení pak byl odebíraný výkon pouze 6,8 kW. Průběh jalového výkonu osciloval mezi 3,4 až 6,3 kVAr. Z průběhu odebíraného činného a jalového výkonu v článku je však patrné, že jalový výkon není úměrný činnému výkonu. Celková dodaná jalová energie pak odpovídala 12 % celkové činné energie za jeden dobíjecí cyklus.

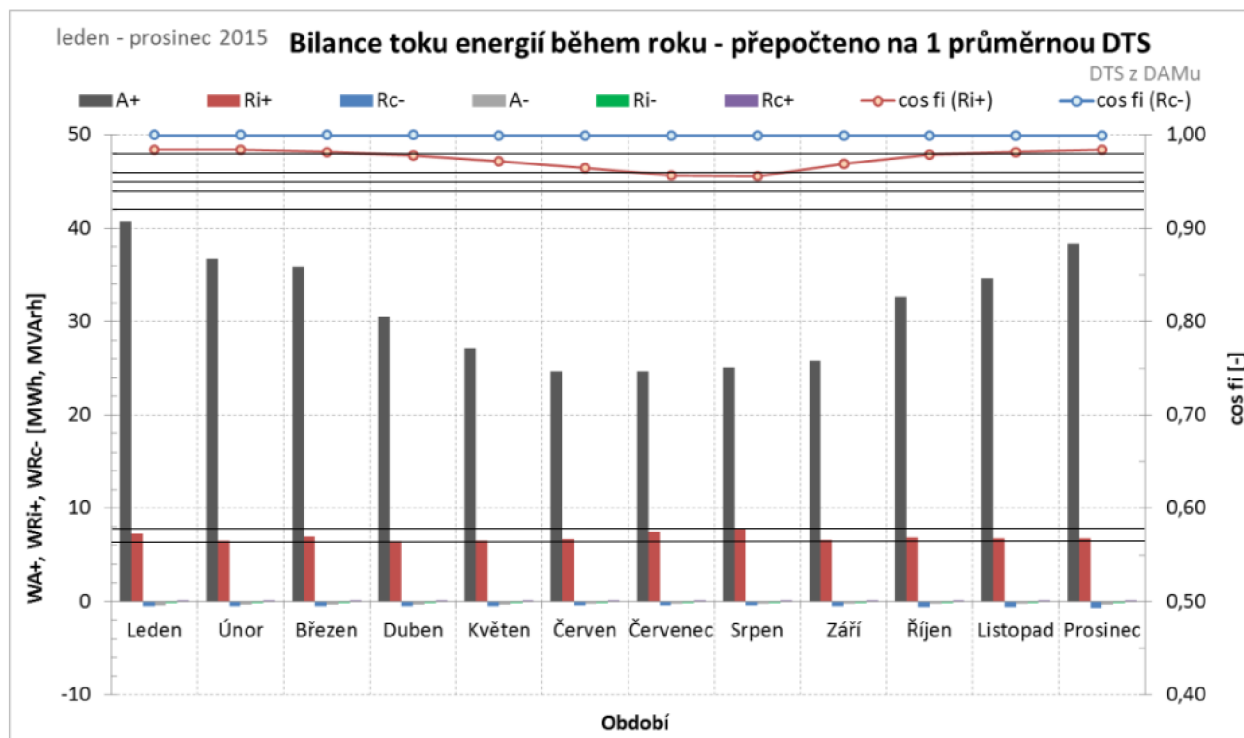
Závěrem nutno podotknout, že termín „jalová energie“ je z fyzikálního hlediska nesmyslný, neboť energie za každou půlperiodu je u jalového výkonu vždy rovna nule. Hodnota celkové dodané jalové energie vztážená k celkové činné energii za dobu jednoho dobíjecího cyklu udává

(po převedení z procentní hodnoty na poměrnou) průměrný $\text{tg}\varphi$, tedy poměr průměrného jalového výkonu k průměrnému činnému výkonu.

3.4 Chování odběrných míst z hlediska jalového výkonu

U odběrných míst je analýza jejich chování z hlediska jalového výkonu podstatně složitější. Tato problematika byla částečně řešena v [9]. Tento příspěvek vyhodnocuje odběr jalového výkonu na úrovni koncových odběratelů v síti NN. V článku jsou vyhodnoceny data zvláště pro maloodběratele – obyvatelstvo (MOO) a maloodběratele – podnikatele (MOP). Spotřeba jalového výkonu je pak pro celý kalendářní rok a tříděna podle velikosti jističe. Z článku vyplývá, že přibližně 65 % činné energie je spotřebovávána sektorem MOO, zbytek pak sektorem MOP. V sektoru MOO je pak 70 % činné energie spotřebováno zákazníky se jmenovitou hodnotou hlavního jističe 25 A. Tito zákazníci mají průměrný roční účinník mezi 0,98 a 0,99 induktivního charakteru. U odběratelů s jinou hodnotou hlavního jističe se účinník mění v rozmezí od 0,96 až 1 induktivního charakteru. U sektoru MOP je rovněž dominantní spotřeba u zákazníků se jmenovitou hodnotou jističe 25 A, avšak zde je spotřebována energie pouze přibližně 14 %. Oproti MOO jsou zde hojně zastoupeny větší hodnoty jističe. U MOP je podstatně horší roční průměrný účinník odběru, který se pohybuje v rozmezí od 0,84 do 0,98 induktivního. Většina odběratelů má však účinník v pásmu od 0,9 do 0,95 induktivního charakteru. Z výše uvedeného je možné konstatovat, že vliv MOO na toky jalových výkonů v sítích NN je minimální. Větší vliv na toky jalových výkonů v sítích NN má především sektor MOP.

Zdroj [9] rovněž uvádí i přehled toků jalových výkonů přes distribuční transformátory. Zde jsou uvedeny průměrné hodnoty jalového výkonu za jednotlivé měsíce v roce. Toky energií přes průměrnou DTS jsou patrné z Obr. 3-9. Z tohoto obrázku jde vidět, že hodnota jalového výkonu se v průběhu roku příliš neliší, zatímco činný výkon v letních měsících klesá přibližně o 40 % oproti měsíci s nejvyšší spotřebou. Tento pokles přenášeného činného výkonu při téměř konstantní hodnotě jalového výkonu způsobuje pokles účinníku. V zimních měsících se účinník pohybuje okolo hodnoty 0,98 induktivního charakteru, zatímco v letních měsících klesá k hodnotě 0,95 induktivního charakteru.



Obr. 3-9 Toky energií přepočteny na průměrnou DTS (převzato z [9])

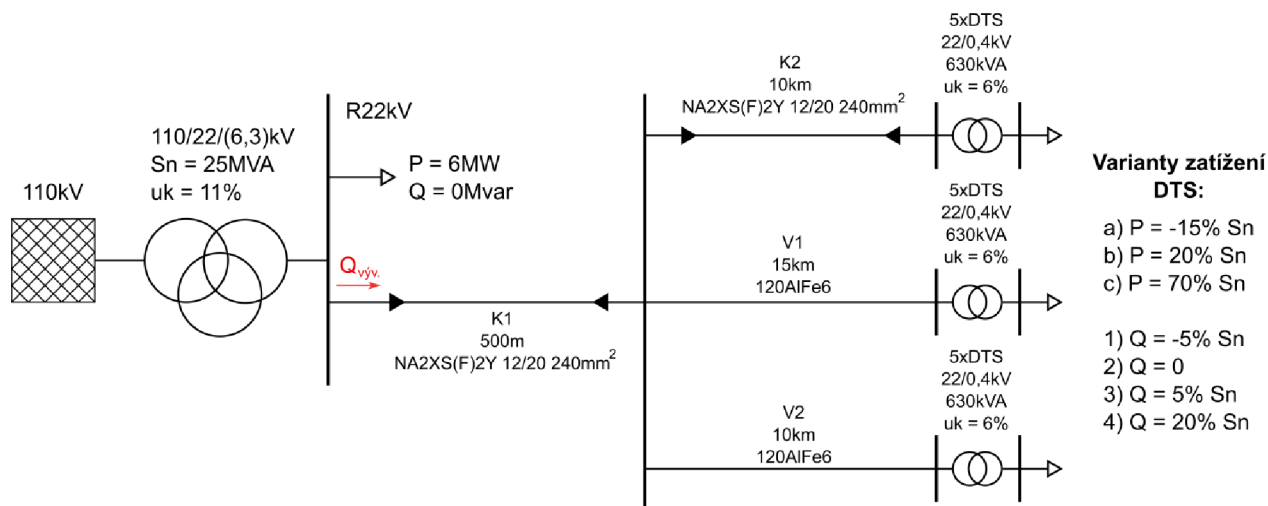
Co se týče toků jalových výkonů v oblastech s velkým zastoupením odběratelů, u kterých převládá výroba nad spotřebou, je v [9] uvedeno, že v zimních měsících se účinník induktivního odběru pohybuje okolo hodnoty 0,97, zatímco v letních měsících se pohybuje okolo 0,92. To je pravděpodobně způsobeno tím, že výroba přímo u odběratele snižuje jeho spotřebu činného výkonu, zatímco jalový výkon zůstává stejný. U těchto odběratelů je patrný i odběr jalového výkonu kapacitního charakteru, který je pravděpodobně způsoben regulací napětí pomocí jalového výkonu.

Přetoky jalového výkonu přes DTS se pak zabývá detailněji [10]. Analýza zde vychází ze zpracování dat z 94 měřených DTS, přičemž interval měření je zde 10 minut. Pozornost je zde věnována především kapacitnímu přetoku, tedy dodávce induktivního jalového výkonu do nadřazené napěťové hladiny 22kV. Tento typ přetoku je z hlediska velikosti přenesené jalové energie zanedbatelný (do 1 % celkové přenesené energie). Z hlediska četnosti se nejvíce vyskytovaly přetoky trvající do 10 % času z celkové doby měření. K tomuto typu přetoků nejčastěji dochází v nočních hodinách, kdy je nejmenší zatížení. Z hlediska rozložení přetoku po jednotlivých fázích je nejvíce zastoupen přetok jednofázový. Značná část jednofázových a dvoufázových přetoků způsobí ve výsledku i celkový přetok. Ten byl zaznamenán u přibližně třetiny sledovaných DTS.

4 ZÁKLADNÍ SIMULACE VN SÍTĚ

4.1 Popis simulace

Simulace byla vytvořena především za účelem zjištění vlivu konfigurace sítě a zatížení DTS na toky jalového výkonu na vývodu z napájecí rozvodny. Topologie sítě byla volena jako standardní paprsková síť. Schéma simulované sítě je na Obr. 4-1. Bilanční uzel je 110 kV napáječ, ze kterého je napájen transformátor 110/22 kV. Tento transformátor pak dále napájí jak 6 MW zátěž, která reprezentuje ostatní vývody z rozvodny, tak vývod, který je hlavním předmětem simulace. Tento vývod začíná 0,5 km dlouhým kabelem a následně se větví na tři vedení, přičemž dvě vedení jsou venkovní a to o délce 10 km a 15 km a jedno vedení je kabelové o délce 10 km. Na konci každého z vedení je transformátor a zátěž. Každá DTS v simulaci reprezentuje pět DTS (přizpůsobeny tomu byly jak parametry transformátoru, tak velikosti zátěží). Parametry síťových prvků vycházejí z katalogových hodnot.



Varianty konfigurace sítě:

- Směšovaná síť: odpovídá obrázku
- Venkovní síť: kabely K1 a K2 jsou nahrazeny venkovním vedením 120 AlFe6 o stejné délce
- Kabelová síť: venkovní vedení V1 a V2 je nahrazeno kabelem NA2XS(F)2Y 12/20 240 mm² o stejné délce

Obr. 4-1 Schéma základní simulace VN sítě

Simulace byla prováděna ve výpočetním programu PSS[®] Sincal 14.5. Program slouží především k výpočtu ustálených chodů a zkratových proudů. Rovněž jsou zde k dispozici i moduly pro analýzu stability sítě, návrh a testování nastavení ochran a další. Pro tuto simulaci byl použit modul *load flow*, tedy režim výpočtu ustálených chodů.

Nejdříve bylo potřeba v programu nastavit napěťové hladiny a oblasti. Napěťové hladiny jsou v simulaci tři, a to 110 kV, 22 kV a 0,4 kV. Terciární vinutí transformátoru VVN/VN bylo zanedbáno a tento transformátor byl parametrizován jako dvouvinutový. Nastavení napěťových hladin je důležité, jelikož výpočetní program pak pokládá zde nadefinované úrovně jako referenční.

Síťový napáječ na úrovni 110 kV je simulován jako zdroj téměř neomezeného zkratového výkonu. Zkratový výkon napáječe je nastaven na hodnotu 1000 MVA, lze tedy uvažovat, že je hodnota jeho impedance zanedbatelná. Uzel, do kterého je připojen síťový napáječ, je uzlem bilančním. Napáječ je tedy proto nastaven na jmenovitou hodnotu napětí a nulový (referenční) úhel tohoto napětí. Konkrétní parametry transformátoru VVN/VN nebyly k dispozici, byl tedy

proveden jejich odhad s ohledem na běžně se vyskytující typy transformátorů. Parametry tohoto transformátoru však nijak zásadně neovlivňují výsledky simulace, jelikož je jeho impedance s ohledem na impedanci VN kabelů a VN/NN transformátorů zanedbatelná. Nastavované parametry VVN/VN transformátoru jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Parametrizace transformátoru VVN/VN

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota	Jednotka
Jmenovité primární napětí	V_{n1}	110	kV
Jmenovité sekundární napětí	V_{n2}	22,5	kV
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_n	25	MVA
Maximální zdánlivý výkon	S_{max}	25	MVA
Napětí nakrátko	v_{sc}	11	%
Ohmická část napětí nakrátko	v_r	1	%
Ztráty v železe	V_{fe}	35	kW
Proud naprázdno	i_0	0,15	%

Parametry kabelových a venkovních vedení jsou převzaty z [2] a [3]. Nastavované parametry byly především měrné hodnoty podélného odporu a reaktance a hodnota příčné provozní kapacity. Hodnoty příčné konduktance vedení byly zanedbány. Uvažovány byly pouze dva typy vedení a to venkovní 120AlFe6 v rovinném uspořádání a kabelové vedení s izolací ze zesíťovaného polyethylenu NA2XS(F)2Y 240 mm² v trojúhelníkovém uspořádání. Nastavované parametry vedení jsou uvedeny v Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Parametrizace VN vedení

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota		Jednotka
		NA2XS(F)2Y 240 mm ²	120AlFe6	
Délka	l	Dle popisu níže		km
Měrný odpor	r	0,125	0,2206	Ω/km
Měrná reaktance	x	0,113	0,3487	Ω/km
Měrná kapacita	c	300,007	10,244	nF/km
Měrné příčné ztráty	v_a	0	0	kW/km
Jmenovité napětí	V_n	22	22	kV
Zatížitelnost	I_{th}	417	345	A

Na rozdíl od transformátorů, které byly předmětem analýzy v kapitole 3.1.4, byly pro simulaci zvoleny transformátory s hodnotou napětí nakrátko 6 %. Parametry distribučních transformátorů jsou převzaty z katalogu transformátorů s redukovánými ztrátami C₀C_k typu 378/22 dle [11]. Do parametrů, které byly nastavovány, bylo nutné zahrnout fakt, že každá DTS

v simulaci reprezentuje pět samostatných transformátorů (při uvažování jejich paralelního zapojení). V simulaci tedy byly parametry v pojmenovaných jednotkách násobeny pěti, parametry v poměrných jednotkách byly ponechány, jelikož jsou vztaženy k nastavenému jmenovitému výkonu. Parametry pro jeden transformátor a pro ekvivalentní transformátor (představující pět paralelně spojených transformátorů) jsou uvedeny v Tab. 4-3. Všechny nastavené parametry odpovídají těm katalogovým, až na poměrnou hodnotu ohmické části napětí nakrátko, ta se vypočítá dle vztahu 4.1.

$$v_r = \frac{\Delta P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{6,75}{630} \cdot 100 = 1,07 \quad (\%) \quad (4.1)$$

Tab. 4-3 Parametrizace transformátoru VN/NN

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota		Jednotka
		DTS	5xDTS	
Jmenovité primární napětí	V_{n1}	22	22	kV
Jmenovité sekundární napětí	V_{n2}	0,42	0,42	kV
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_n	0,63	3,15	MVA
Maximální zdánlivý výkon	S_{max}	0,63	3,15	MVA
Napětí nakrátko	v_{sc}	6	6	%
Ohmická část napětí nakrátko	v_r	1,07	1,07	%
Ztráty v železe	V_{fe}	0,8	4	kW
Proud naprázdno	i_0	0,35	0,35	%

Odběry jsou definovány hodnotou činného a jalového výkonu. Tato hodnota je konstantní a výpočetní program iteruje hodnotu proudu odběru tak, aby s ohledem na aktuální napětí v místě odběru byl činný/jalový výkon vždy konstantní, rovný nastavené hodnotě. Volba velikostí odběrů činného/jalového výkonu je popsána níže, hodnoty pro jednotlivé uvažované varianty jsou uvedeny v Tab. 4-4 a Tab. 4-5.

Předmětem simulace bylo sledování toků jalových výkonů na vývodu z napájecí rozvodny (na Obr. 4-1 označeno $Q_{výv.}$) při různých konfiguracích sítě a při různém zatížení DTS činným a jalovým výkonem. Parametrizace zatížení jednotlivých DTS činným a jalovým výkonem je realizována na základě výsledků analýzy provedené zadavatelem práce.

Pro simulovanou síť byly uvažovány tři samostatné varianty zatížení činným výkonem. Ke každé této variantě náleží čtyři, opět samostatné, varianty zatížení DTS jalovým výkonem. Varianty byly vždy voleny tak, aby byl postihnut jednak základní stav (tedy stav zatížení, který se na DTS nachází statisticky nejčastěji), tak i stavy extrémní, které se objevují pouze zřídka. Jednotlivé varianty zatížení jsou popsány níže. Zatížení činným a jalovým výkonem bylo provedeno vždy pro každou simulaci na všech třech ekvivalentních DTS na stejnou hodnotu.

Jednotlivé varianty zatížení DTS činným výkonem:

- a) P_{\min} - Zpětný tok činného výkonu do nadřazené sítě o velikosti 15% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS
- b) $P_{\text{stř}}$ - Zatížení DTS o velikosti 20% jejího zdánlivého výkonu – tento stav odpovídá standardnímu zatížení DTS
- c) P_{\max} - Zatížení DTS o velikosti 70% jejího zdánlivého výkonu

Jednotlivé varianty zatížení DTS jalovým výkonem:

- 1) $Q_{C\max}$ - Dodávka jalového výkonu do nadřazené sítě o velikosti 5% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS
- 2) $Q = 0$ - Nulový jalový výkon na NN straně DTS – tento stav odpovídá úplné kompenzaci jalového výkonu na sekundární straně DTS
- 3) $Q_{L\text{střed}}$ - Odběr jalového výkonu o velikosti 5% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS – tento stav odpovídá standardnímu zatížení DTS
- 4) $Q_{L\max}$ - Odběr jalového výkonu o velikosti 20% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS

Tab. 4-4 Nastavení činného výkonu zátěží v základní simulaci VN sítě

Parametrizace činného výkonu DTS ($P_n = 630\text{kW}$)			
Varianta	P/P_n (%)	P_{DTS} (kW)	P_{5xDTS} (kW)
a) P_{\min}	-15	-94,5	-472,5
b) $P_{\text{stř}}$	20	126	630
c) P_{\max}	70	441	2205

Tab. 4-5 Nastavení jalového výkonu zátěží v základní simulaci VN sítě

Parametrizace jalového výkonu DTS ($Q_n = 630\text{kVAr}$)			
Varianta	Q/Q_n (%)	P_{DTS} (kW)	P_{5xDTS} (kW)
1) $Q_{C\max}$	-5	-31,5	-157,5
2) $Q = 0$	0	0	0
3) $Q_{L\text{střed}}$	5	31,5	31,5
4) $Q_{L\max}$	20	126	630

Další varianty, které náleží těm již výše uvedeným, jsou různé konfigurace sítě. Jako základní stav byla zvolena varianta smíšené sítě, která sestává z 10,5 km kabelového vedení NA2XS(F)2Y 240 mm² a 25 km venkovního vedení 120AlFe6. Délky vedení byly uzpůsobeny tak, aby při střední hodnotě zatížení DTS činným a jalovým výkonem byl na vývodu z rozvodny 22 kV nulový přetok jalového výkonu, tedy aby jalový výkon zátěží, distribučních transformátorů a podélných prvků vedení vykompenzoval nabíjecí kapacitní jalový výkon VN kabelů. Tato varianta je zvolena jako referenční. K této referenční variantě jsou pak dále přidány dvě extrémní varianty. Jedna z nich je taková, kde jsou všechna vedení nahrazena venkovními (tato varianta je

extrémní z hlediska induktivního jalového výkonu). Varianta má reprezentovat případ sítě v oblastech s nízkou hustotou osídlení, kde se předpokládá, že jsou vedení převážně v extravilánu obcí. Naopak v druhé extrémní variantě jsou všechna vedení nahrazena kabelovými (tato varianta je extrémní z hlediska kapacitního jalového výkonu). Varianta naopak reprezentuje síť v oblastech s velkou hustotou osídlení – městskou síť. Jednotlivé varianty jsou shrnuty níže.

Jednotlivé varianty konfigurace sítě jsou:

- A) **Smíšená síť** – konfigurace sítě odpovídá konfiguraci na Obr. 4-1.
- B) **Venkovní síť** – všechna vedení jsou venkovní 120AlFe6
- C) **Kabelová síť** – všechna vedení byly nahrazeny kabelem NA2XS(F)2Y 240mm²

Celkem bylo provedeno 36 samostatných simulací ustáleného chodu sítě, kdy byly jednotlivé DTS parametrizovány činným (a,b,c) a jalovým (1,2,3,4) výkonem, byla měněna konfigurace sítě (A,B,C) a byl hodnocen vývoj jalového výkonu na daném vývodu z rozvodny 22 kV.

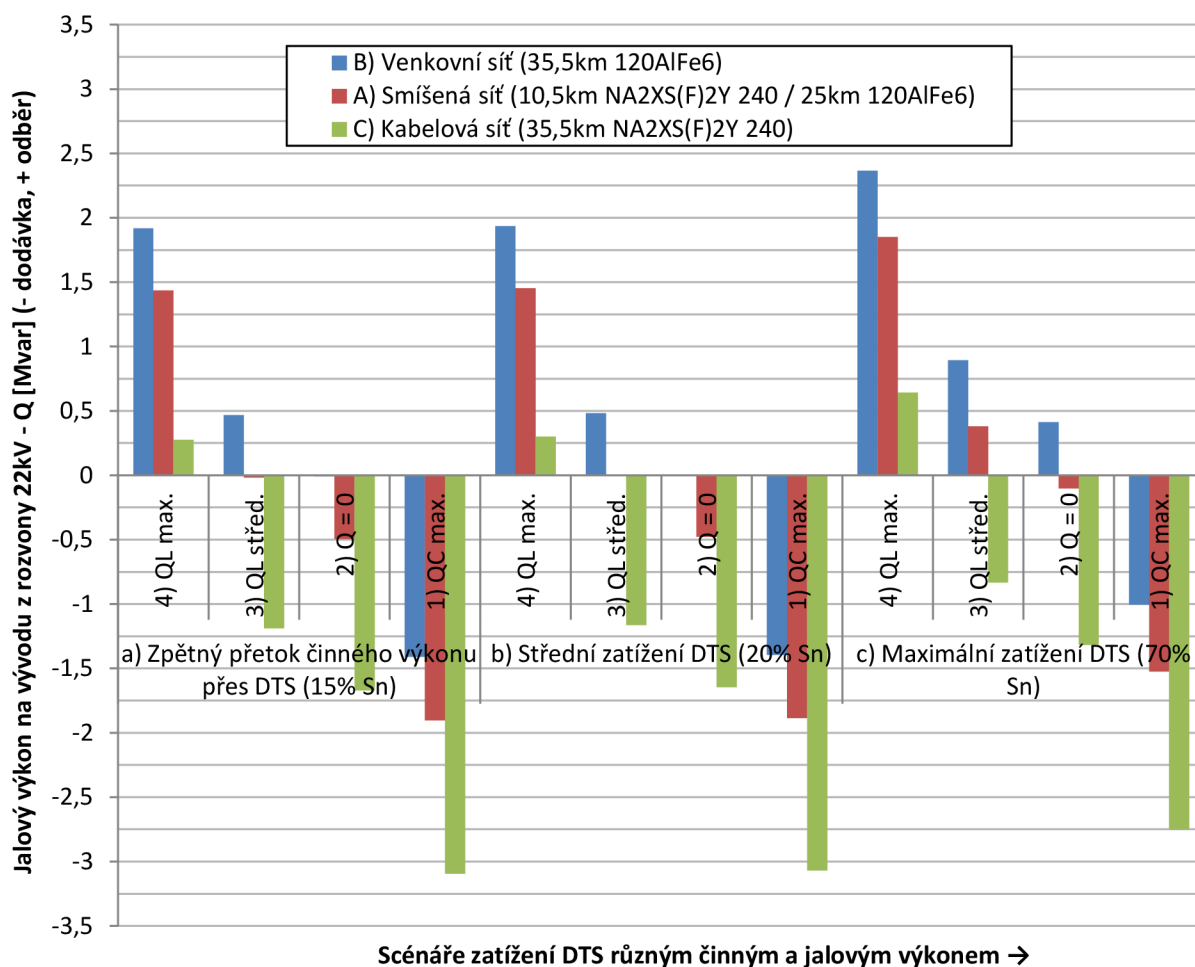
Referenční variantou je varianta b3A (viz označení výše), tedy **smíšená síť**, střední hodnota činného výkonu P_{str} a střední hodnota odběru jalového výkonu $Q_{\text{Lstřed}}$. Tato varianta odpovídá účinník na sekundární straně DTS 0,97, což přibližně odpovídá průměrné hodnotě účinníku na Obr. 3-9, tedy z analýzy dat podle [9].

4.2 Zhodnocení simulace

Z analýzy dat z DTS poskytnuté zadavatelem práce vyplývá, že lze po většinu času předpokládat malý odběr jalového výkonu (do 5% jmenovitého výkonu distribučního transformátoru), nicméně mohou být i DTS se značnými výkyvy jalového výkonu od odběru 20 % až po dodávku 5 % jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru.

Na Obr. 4-2 si lze všimnout, že v případě smíšené sítě nastává stav, kdy se kapacita kabelových vedení kompenzuje odběrem jalového výkonu na úrovni NN ($Q_{\text{Lstřed}}$). V tomto případě má odběr jalového výkonu pozitivní dopad na kompenzaci nabíjecího výkonu kabelového vedení. Naopak případná kompenzace odebíraného jalového výkonu na úrovni NN působí kontraproduktivně. Je nezbytné zdůraznit, že okolo uvažovaných 20 % zatížení se venkovní vedení chová takřka neutrálně (mírná induktivní zátěž) a dodávka jalového výkonu ze soustavy NN tuto problematiku dále zhoršuje.

Podobný efekt lze sledovat i v případě kabelové soustavy, kde jakýkoliv odběr jalového výkonu danou situaci zlepšuje, přičemž kompenzace na úrovni NN či dodávka jalového výkonu ze soustavy NN situaci zhoršuje. Pozitivní přínos kompenzace jalového výkonu na úrovni NN ($Q = 0$) lze spatřovat v případě čistě venkovní distribuční soustavy nebo v případě smíšené soustavy a extrémního odběru činného výkonu. Nutno však dodat, že uvažovaný scénář odběru/dodávky jalového výkonu vychází z extrémního chování analyzovaných DTS při uvažování jejich soudobého chování. Pro dokreslení požadavků na kompenzaci přetoků jalového výkonu v kontextu provozované DS je tento pohled postačující.



Obr. 4-2 Závislost jalového výkonu vybraného vývodu z rozvodny 22kV na různém zatížení DTS činným a jalovým výkonem pro různé typy sítě

Z dosažených výsledků je možné udělat obecný shrnující komentář. Pokud by bylo snahou kompenzovat extrémní hodnoty toku jalové energie, tak by přístrojové vybavení takovéto kompenzace bylo do značné míry závislé především na typu sítě, ve které by byla kompenzace umístěna. Z provedené simulace se jeví následující:

- kompenzace odběru jalového výkonu má smysl v soustavách venkovních,
- v kabelové soustavě musí být kompenzována dodávka jalového výkonu a nekompensován odběr jalového výkonu
- ve smíšené síti musí být kompenzována dodávka jalového výkonu a lze připustit částečnou kompenzaci odběru jalového výkonu

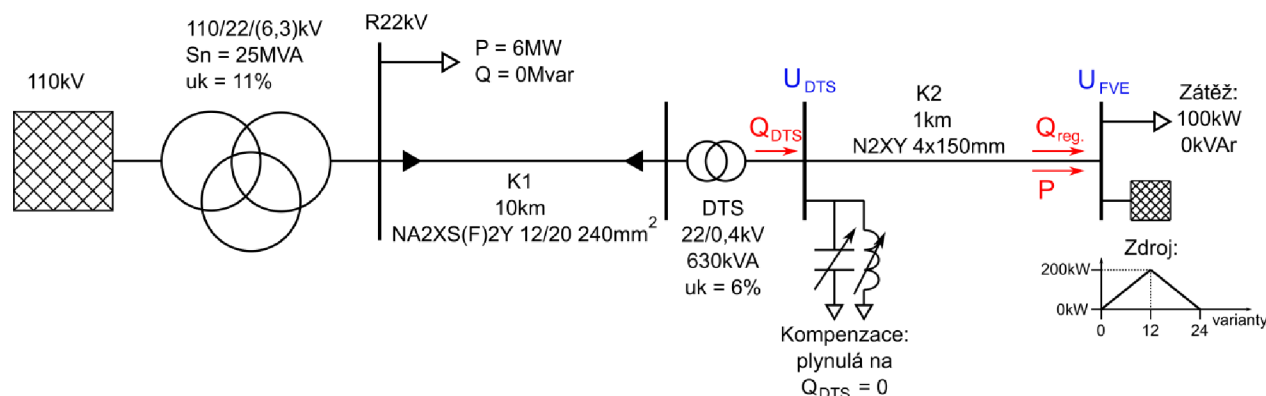
Do budoucna při uvažování kabelizace je vhodné řešení zamezení dodávky jalového výkonu z NN soustavy a na to by měla být navržena i kompenzace.

Výsledky uváděné na Obr. 4-2 odpovídají pouze simulované topologii distribuční sítě z Obr. 4-1, resp. parametrizace vývoje výkonů na DTS byla realizována na základě analýzy poskytnuté zadavatelem a to bez respektování nesoudobosti jednotlivých DTS. Platí, že není možné výsledky simulace paušalizovat napříč distribuční soustavou a je nutné výsledky vnímat i v kontextu zavedených předpokladů a zjednodušení.

5 ZÁKLADNÍ SIMULACE NN SÍTĚ

5.1 Popis simulace

Hlavním předmětem simulace je posouzení vlivu kompenzace a implementace $Q(U)$ regulace distribuovaných zdrojů na NN úrovni během vybraných provozních poměrů. Současně je posuzována i případná kontraindikace kompenzace na sekundární straně DTS na $Q(U)$ regulaci zdrojů ve smyslu stabilního a hospodárneho provozu sítě jako celku. Parametrizace VN sítě byla převzata z předchozí simulace. Pro lepší demonstraci vzájemných vazeb mezi $Q(U)$ regulací a kompenzací je nejprve využito modelu pouze jedné VN větve tvořené kabelovým vedením, na jehož konci je jeden distribuční transformátor 22/0,4 kV. Schéma simulované sítě včetně vyznačení sledovaných parametrů je na Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Schéma sítě s $Q(U)$ regulací FVE a kompenzačními prostředky na NN úrovni

Simulace byla rovněž provedena ve výpočetním programu PSS[®] Sincal 14.5. Nyní však nebyl využit mód simulace *load flow* jako u předchozí simulace (popsané v kapitole 4), ale byl využit mód *load profile*. Tento mód umožňuje výpočet sad ustálených chodů, ve kterých se mění činné a jalové výkony zdrojů a zátěží. Ve výpočetním programu je na tyto jednotlivé sady ustálených chodů pohlíženo jako na chování zdrojů/zátěží v čase. Výpočet byl nastaven na denní bázi s krokem 1h. Tímto nastavením bylo možné vytvořit 24 samostatných ustálených chodů. Jelikož předmětem simulace nebylo modelování denních průběhů zatížení, jsou tyto jednotlivé ustálené chody s ohledem na parametrizaci výkonů zdroje/zátěže dále označovány jako stavy.

Parametry napáječe, transformátoru VVN/VN, kabelového VN vedení a DTS jsou stejné, jako ty popsané v kapitole 4. DTS však zde již reprezentuje pouze jeden distribuční transformátor. S ohledem na malé zatížení VN sítě zde bylo upraveno napětí a to jak na transformátoru VVN/VN z hodnoty 22,5 kV na hodnotu 22 kV, tak na transformátoru VN/NN a to z hodnoty 0,42 kV na hodnotu 0,4 kV.

NN síť, která je předmětem této simulace je napájena z distribučního transformátoru 22/0,4 kV o výkonu 630 kVA. Na jeho sekundární straně je umístěna kompenzace, která umožňuje plynulou regulaci na nulový přetok jalového výkonu přes DTS ($Q_{DTS} = 0$), přičemž kompenzační prostředek představuje ideální kompenzátor. Na sekundární stranu transformátoru je připojeno kabelové vedení NN o délce 1 km v provedení N2XY 150 mm². NN vedení bylo vybráno z knihovny prvků, která je dostupná v PSS[®] Sincal. Měrná impedance tohoto vedení je: $\bar{Z}_k = R_k + jX_k = 0,124 + j0,078 \Omega/\text{km}$. Kabelové vedení bylo zvoleno úmyslně a to z důvodu, že má malou měrnou reaktanci v porovnání s měrným odporem. To by pak dle výše uvedeného

předpokladu mělo vést k větším hodnotám jalového výkonu, který zdroje s $Q(U)$ regulací poskytují. Použití kabelového vedení v simulaci rovněž zohledňuje trend rozšiřování kabelizace NN sítě.

Na konci NN vedení je uvažován uzel, do kterého je připojena konstantní zátěž s činným výkonem 100 kW a účínkem $\cos\varphi = 1$, resp. je zde připojen zdroj elektrické energie s maximálním činným výkonem 200 kW. Zdroj je parametrizován prostřednictvím lineární rampy, kde činný výkon lineárně stoupá od 0 kW na 200 kW v krocích od 0 do 12 a klesá z 200 kW na 0 kW v krocích od 12 do 24. Tímto nastavením zdroje a zátěže je zajištěn profil přenášeného činného výkonu po NN vedení v rozmezí od 100 kW (směr toku činného výkonu z VN do NN) do -100 kW. Zátěž je namodelována pomocí prvku *Load*, jako typ zátěže byl zvolen konstantní činný a jalový výkon.

Zdroj lze v PSS[®] Sincal modelovat pomocí různých prvků. Jejich použití se liší jednak v tom, jaký typ zdroje prvek představuje, tak v možnostech jejich nastavení. V úvahu při modelování FVE připadají dva typy zdroje a to:

- *Infeeder* – obecný napáječ
- *DC-infeeder* – napáječ respektující skutečnost, že jde o zdroj s měničem

Výhodou prvku typu *DC-infeeder* je možnost nastavení limitních napětí, při kterých se zdroj odpojí od sítě, nebo například možností konfigurace bateriového úložiště, nebo možnost konfigurace transformátoru, přes který je zdroj připojen. Naopak nevýhodou je, že zde nelze nastavit omezení na maximální hodnotu účínku. S ohledem na možnost rozšíření simulace a na fakt, že výše uvedené výhody tohoto prvku nejsou předmětem simulace, byl zvolen prvek *Infeeder*, tedy obecný napáječ. Tento napáječ byl nakonfigurován jako typ PQ, což znamená, že prvek udržuje konstantní hodnotu činného a jalového výkonu. Profil tohoto výkonu se zadává v kartě *element data* ve skupině *operating points*. Konfigurace výše uvedeného nastavení je v PSS[®] Sincal provedena dle Tab. 5-1.

Tab. 5-1 Nastavení profilu výroby v základní simulaci NN sítě

t (h)	Curve	P (kW)	Q (kVAr)
0	Continuous	0,0	0,0
12,0	Continuous	200,0	0,0
24,0	Continuous	0,0	0,0

Nastavení profilu v simulaci (které je uvedeno v Tab. 5-1) by mělo korespondovat s nastavením periody výpočtu, tedy pokud je nastaven výpočet na denní bázi, je potřeba, aby byl počáteční stav v 0h a koncový v 24h. V nastavení profilu lze nastavit typ křivky, se kterou se jednotlivé stavy mění. Jalový výkon byl ve všech stavech pro výrobu nastaven na 0kVAr. Jde o přednastavenou hodnotu jalového výkonu. Zde nastavenou hodnotu jalového výkonu zdroj dodává bez aktivace $Q(U)$ regulace. Pokud je $Q(U)$ regulace aktivována, zdroj dodává hodnotu jalového výkonu, která odpovídá nastavené regulační křivce. Typ křivky v nastavení profilu udává způsob propojení jednotlivých zadaných bodů (krok simulace lze zvolit menší, než je počet nastavených bodů křivky). Pokud je tento parametr nastaven na *continuous*, jsou jednotlivé body spojeny přímkou. Pokud je parametr nastaven na *discrete*, je nastavená hodnota konstantní až do dalšího nastavovaného bodu.

Simulace je souhrn 24 ustálených chodů. Vstupní parametr, který se v těchto jednotlivých ustálených chodech mění je pouze činný výkon vyráběný FVE, zátěž zůstává konstantní. Sledovanými parametry jsou pak napětí v uzlu DTS a FVE a jalový výkon, který poskytuje FVE v rámci $Q(U)$ regulace (její nastavení je popsáno v kapitole 5.1.1). Testovány jsou pak tři varianty s ohledem na kompenzaci v DTS a $Q(U)$ regulaci zdroje. Tyto varianty jsou následující:

- Bez kompenzace a $Q(U)$ regulace
- Bez kompenzace při zapnuté $Q(U)$ regulaci
- Kompenzace při zapnuté $Q(U)$ regulaci

5.1.1 $Q(U)$ regulace zdroje

$Q(U)$ regulace slouží především proto, aby pomocí odběru jalového výkonu vyrovnala kladný úbytek napětí, způsobený dodávkou činného výkonu. V ideálním případě by mělo být navýšení napětí vlivem dodávky činného výkonu potlačeno odběrem výkonu jalového. Úbytek napětí na podélném prvku, který tvoří odpor a reaktance (např. vedení a transformátor) lze ve zjednodušené formě vyjádřit vztahem 5.1:

$$\Delta U \approx \frac{P}{U_f} \cdot R + \frac{Q}{U_f} \cdot X \quad (\text{V}) \quad (5.1)$$

Kde R (Ω) je odpor, X (Ω) je reaktance, P (W) je přenášený činný výkon, Q (VAr) je přenášený jalový výkon a U_f (V) je fázová hodnota napětí.

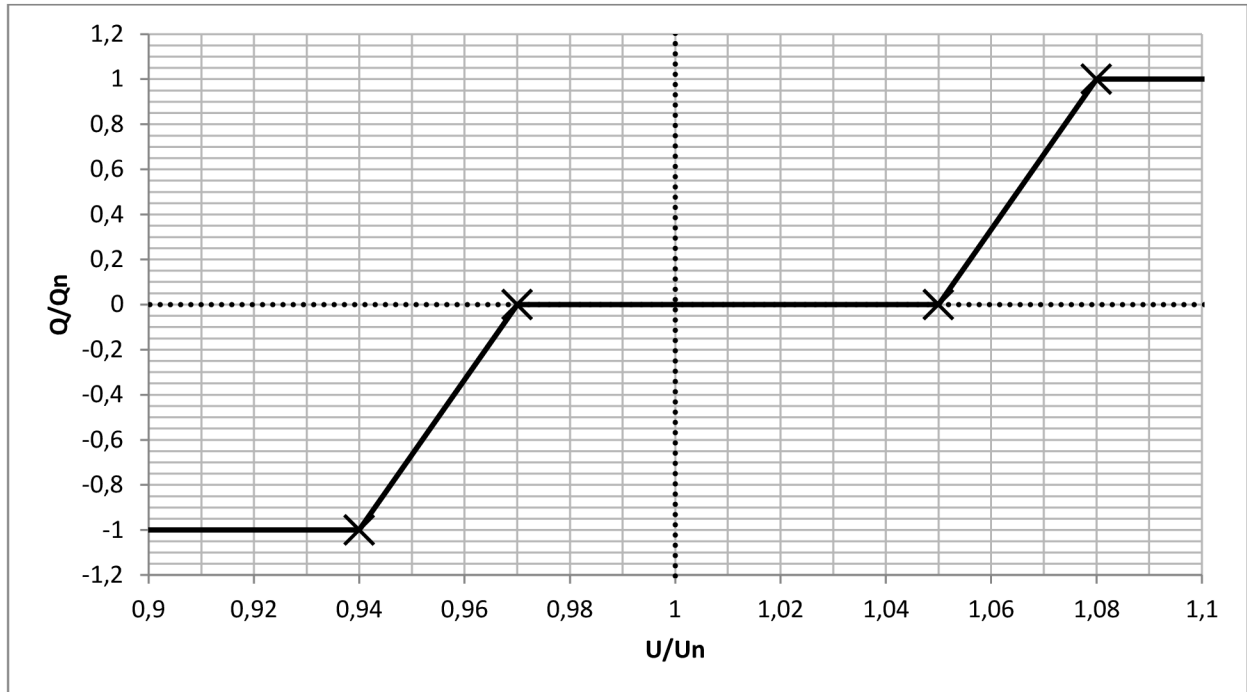
Vztah 5.1 platí, pokud uvažujeme spotřebu jak činného, tak jalového výkonu. Pak je napětí v místě odběru právě o tento úbytek menší. Ze vztahu je patrné, že zatímco část úbytku napětí způsobená přenosem činného výkonu na vedení je závislá na velikosti odporu vedení, tak část úbytku způsobená přenosem jalového výkonu je úměrná reaktanci vedení. Pokud by se obrátil směr činného výkonu, je potřeba tuto skutečnost respektovat a změnit znaménko u činného výkonu (v první části vztahu). Stejně tak pokud by se obrátil směr jalového výkonu, je potřeba změnit znaménko u jalového výkonu (v druhé části vztahu).

Z výše uvedeného vztahu je tedy patrné, že účinnost regulace napětí pomocí injektáže jalového výkonu je silně závislá na velikosti reaktance, respektive princip vyrovnání úbytku napětí způsobeného přenosem činného výkonu výkonem jalovým závisí na vzájemném poměru odporu a reaktance.

Parametrizace charakteristiky $Q(U)$ regulace zdroje je nastavena dle příkladu nastavení, který je uveden v [6]. Nastavení charakteristiky je patrné z Obr. 5-2. Znaménková konvence na tomto obrázku je v souladu se zavedenou konvencí v Tab. 2-1, tedy že odběr jalového výkonu induktivního charakteru má kladné znaménko. Dle hodnoty napětí v místě připojení výroby pak lze tuto regulační charakteristiku rozdělit do následujících oblastí:

- Pokud je napětí v místě připojení zdroje menší, než $0,94U_n$, **dodává** zdroj maximální jalový výkon.
- V pásmu od $0,94U_n - 0,97U_n$ je **dodávaný** jalový výkon úměrný napětí v místě připojení zdroje.
- Pásmo od $0,97U_n - 1,05U_n$ je pásmo necitlivosti, kde zdroj nevyrábí ani nespotebovává jalový výkon.

- V pásmu od $1,05U_n - 1,08U_n$ je **odebíraný** jalový výkon úměrný napětí v místě připojení zdroje.
- Pokud je napětí v místě připojení zdroje větší, než $1,08U_n$, **odebírá** zdroj maximální jalový výkon.



Obr. 5-2 Nastavení $Q(U)$ regulace zdroje

Kromě aplikace $Q(U)$ charakteristiky je podpora jalovým výkonem ovlivňována i dalšími limity. Dle [6], konkrétněji platné přílohy č.4 PPDS, je povinnost umožňovat podporu napětí pomocí jalového výkonu v rámci účinnosti 0,9. Běžné zdroje s měniči jsou dimenzovány na hodnotu jalového výkonu, která odpovídá hodnotě jalového výkonu při jmenovitém činném výkonu a účinnosti 0,9. Tuto hodnotu jalového výkonu umožňují běžné zdroje s měniči dodávat i při nulovém činném výkonu.

Podle způsobu nastavení PQ charakteristiky rozlišujeme dva základní případy:

- a. Omezení maximálním účinností 0,9 (na Obr. 3-7 oblast „V“)
- b. Omezení maximální hodnotou jalového výkonu (na Obr. 3-7 oblast „obdélníku“)

V základní simulaci NN sítě je výrobní nastavena na omezení maximální hodnotou jalového výkonu (dle výše uvedeného budu b.). To umožňuje regulaci i v případě, že je vyráběný činný výkon roven nule a do uzlu je připojena pouze zátěž. To má výhodu v tom, že může zdroj dodávkou jalového výkonu vyrovnat (nebo alespoň zmenšit) úbytek napětí vzniklý díky odběru činného výkonu.

Nastavení $Q(U)$ regulace se v programu PSS[®] Sincal provádí v kartě *controller* v nastavení prvku *infeeder*. Nejdříve je však v hlavním nastavení zdroje nastavit jmenovitou hodnotu činného a jalového výkonu zdroje. Od této hodnoty se pak odvíjí nastavení $Q(U)$ charakteristiky, které je v poměrných hodnotách. Poměrné hodnoty jsou vztaženy právě k jmenovitému zdánlivému výkonu zdroje. Jmenovitý činný výkon zde byl nastaven na hodnotu 200 kW, jalový výkon pak na 0 kVAr. Jmenovitý zdánlivý výkon zdroje je tedy v nastavení roven jmenovitému činnému

výkonu. Tento způsob nastavení pak usnadní konfiguraci $Q(U)$ regulace, jelikož se bude zadávat hodnota jalového výkonu vztažena k činnému výkonu ($\text{tg}\varphi$).

Pro nastavení celé $Q(U)$ regulace se musí vyplnit dvě skupiny nastavení. První skupina se nazývá *Controlled Reactive Power* a nastavuje se zde samotná $Q(U)$ charakteristika. Zde je nejdříve je potřeba nastavit parametr *Type of Controlling* na *Voltage – Q*. Křivka se pak parametrizuje pomocí *V – Q Characteristics*. Po otevření nastavení tohoto parametru lze do tabulky vkládat body charakteristiky. Tyto body si pak výpočetní program protne přímkou. Nastavení této křivky je uvedeno v Tab. 5-2. V této tabulce si lze všimnout, že na rozdíl od hodnot v Obr. 5-2 je poměrná hodnota jalového výkonu v simulaci nastavena na hodnotu 0,484 (namísto 1). To je z důvodu, že v Obr. 5-2 je poměrná hodnota jalového výkonu vztažena k maximální hodnotě jalového výkonu, zatímco v simulaci se nastavuje jalový výkon vztažený k jmenovitému zdánlivému (dle výše uvedeného předpokladu k jmenovitému činnému) výkonu.

Tab. 5-2 Nastavení $Q(U)$ regulace zdroje v základní simulaci NN sítě

V (pu)	Q (pu)
0,0	-0,484
0,94	-0,484
0,97	0,0
1,05	0
1,08	0,484
2,0	0,484

Druhá skupina se nazývá *Limiting Values*. Nastavují se zde limity zdroje, tedy oblast PQ diagramu, ve které zdroj pracuje. Nastavení lze provést jak zadáváním bodů PQ diagramu (podobným způsobem, jako u $Q(U)$ křivky), tak nastavením předdefinovaných limitů. Typy předdefinovaných limitů, které jsou relevantní pro $Q(U)$ regulaci jsou následující:

- **P and $\cos\varphi$** – Omezení maximálním účíníkem (dle výše uvedeného způsobu nastavení PQ diagramu - dle výše uvedeného bodu a.)
- **P and Q** – Omezení maximální hodnotou jalového výkonu (dle výše uvedeného nastavení PQ diagramu - dle výše uvedeného bodu b.)

Pro správnou funkci $Q(U)$ regulace zdroje je nutné nastavit limity i přes to, že jsou limity jalového výkonu ve své podstatě definovány už při nastavení $Q(U)$ křivky.

Kombinace typu a délky NN vedení a velikosti zdroje a zátěže byla záměrně zvolena tak, aby bylo napětí i při vypnuté $Q(U)$ regulaci v dovořených mezích. Pro demonstraci vlivu kompenzace na $Q(U)$ regulaci byl průřez vedení volen tak, aby výroba při zapnuté regulaci nedodávala svůj maximální jalový výkon (aby bylo napětí v mezích od $0,94U_n$ do $1,08U_n$).

5.1.2 Kompenzace jalového výkonu na DTS

Jak již bylo řečeno výše, kompenzátor byl v rámci této simulace modelován jako ideální, s nastavením na nulovou hodnotu přetoku jalového výkonu přes DTS. Výpočetní program PSS[®] Sincal má ve svých knihovnách různé komponenty, které se chovají jako kondenzátor/tlumivka:

- *Variable shunt element* – parametrizovatelný příčný prvek
- *Shunt impedance* – příčná impedance
- *Shunt RLC circuit* – příčný RLC obvod
- *Static compensator* – statický kompenzátor
- *Shunt reactor* – příčný reaktor
- *Shunt capacitor* – příčný kondenzátor

Prvky *variable shunt element*, *shunt impedance* a *shunt RLC circuit* nemají možnost automatického řízení v průběhu simulace, proto nebyly nadále zkoumány. Prvek *static compensator* slouží jako zdroj jalového výkonu, avšak pouze v závislosti na napětí. Lze zde nastavit podobná $Q(U)$ charakteristika jako u síťového napáječe. Rozdíl je pouze v tom, že je charakteristika vždy plynulá (nelze nenastavit pásmo necitlivosti).

Prvky, které byly využity jako kompenzátor, jsou *shunt reactor* a *shunt capacitor*. Způsob parametrizace obou těchto prvků je obdobný, jejich nastavení se od sebe liší pouze minimálně. Jak již bylo řečeno výše, tyto prvky jsou modelovány jako ideální kompenzátory. Prvky mají v simulaci charakter konstantní impedance (nikoliv konstantního jalového výkonu) a proto je nutné vzít do úvahy fakt, že jalový výkon kompenzátoru je ovlivněn skutečnou hodnotou napětí v místě jeho připojení.

U kondenzátoru jsou definovanými parametry jmenovitý jalový výkon, dielektrické ztráty a jmenovité napětí. Impedance tohoto prvku pak program počítá dle vztahu 5.2, kde označení veličin odpovídá označení v PSS[®] Sincal, které je uvedeno v Tab. 5-3.

$$\bar{Z}_C = \frac{V_n^2}{V_{di} \cdot 10^{-3} - jQ_n} \quad (\Omega) \quad (5.2)$$

Tab. 5-3 Nastavení kompenzačního kondenzátoru

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý jalový výkon	Q_n	0,1	MVA _r
Dielektrické ztráty	V_{di}	0	kW
Jmenovité napětí	V_n	0,4	kV

U reaktoru jsou definovanými parametry jmenovitý jalový výkon, ztráty v mědi, ztráty v železe a jmenovité napětí. Impedance tohoto prvku pak program počítá dle vztahu 5.3, kde označení veličin odpovídá označení v PSS[®] Sincal, které je uvedeno v Tab. 5-4.

$$\bar{Z}_L = \frac{V_n^2}{(V_{cu} + V_{fe}) \cdot 10^{-3} + jQ_n} \quad (\Omega) \quad (5.3)$$

Tab. 5-4 Nastavení kompenzačního reaktoru

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý jalový výkon	Q_n	0,1	MVAr
Ztráty v mědi	V_{cu}	0	kW
Ztráty v železe	V_{fe}	0	kW
Jmenovité napětí	V_n	0,4	kV

U obou těchto prvků je pak nutné nastavit, jakým způsobem budou regulovat. To se provádí v záložce *controller*. U obou těchto prvků byly parametry v této záložce nastaveny shodně. Výpočetní program uvažuje způsob spínání jednotlivých stupňů kompenzátoru obdobným způsobem jako je tomu u přepínání odboček transformátoru. Jednotlivé stupně pak musí mít stejnou velikost (není zde možnost kaskádního spínání). Celkový jmenovitý jalový výkon je při zapnutém controlleru dvojnásobný než jmenovitý, jelikož jmenovitého výkonu (definovaného výše v Tab. 5-3, respektive v Tab. 5-4) je dosaženo při přepnutí na hlavní odbočku ρ_m . Hodnota jalového výkonu je s ohledem na aktuální polohu odbočky vypočítána ze vztahu 5.4, kde Q_a je aktuální hodnota jalového výkonu kompenzátoru:

$$Q_a = Q_n + \Delta Q \cdot (\rho - \rho_m) \quad (\text{MVAr}) \quad (5.4)$$

Tab. 5-5 Nastavení controlleru u kompenzátorů

Parametr	Označení v PSS [®] Sincal	Hodnota	Jednotka
Současná poloha odbočky	ρ	-1000	-
Minimální poloha odbočky	ρ_l	-1000	-
Hlavní poloha odbočky	ρ_m	0	-
Maximální poloha odbočky	ρ_u	1000	-
Jalový výkon na jednu odbočku	ΔQ	0,0001	MVAr

Jak již bylo řečeno výše, pro zjednodušení byl uvažován ideální kompenzátor, nastavený počet stupňů je tedy v praxi nereálný. V simulačním programu lze volit mezi dvěma způsoby spínání jednotlivých stupňů a to:

- *Discrete* – kompenzátor přepíná pouze na celou hodnotu odbočky
- *Continuous* – kompenzátor reguluje plynule

Aby byla kontrola nad spínáním stupňů, respektive aby bylo možné řídit plynulost regulace, byl zvolen způsob přepínání odboček na *discrete*.

Podle požadované veličiny umožňuje PSS[®] Sincal tyto základní režimy provozu kompenzačních prvků:

- *Fix* – konstantní hodnota odbočky
- *V (node)* – konstantní hodnota napětí v uzlu

- Q (*to node*) – konstantní hodnota jalového výkonu (pouze při činném výkonu, který teče do uzlu)
- Q (*from node*) – konstantní hodnota jalového výkonu (pouze při činném výkonu, který teče do uzlu)
- Q (*node total*) – konstantní celková hodnota jalových výkonů do uzlu vstupujících a z uzlu vystupujících
- Q (*terminal*) – konstantní hodnota jalového výkonu na jednom konkrétním vývodu z uzlu
- $\cos\varphi$ (*terminal*) – konstantní hodnota účinníku na jednom konkrétním vývodu z uzlu

Pro potřeby simulace byl zvolen režim Q (*terminal*) a jako místo vývodu z uzlu bylo zvoleno místo připojení k NN straně DTS (dle Obr. 5-1 proměnná Q_{DTS}).

Dále je zde potřeba nastavení mezí, ve kterých se má požadovaná hodnota nacházet. Tyto meze se nastavují parametry Q_{\min} a Q_{\max} , přičemž platí, že aktuální hodnota jalového výkonu Q_a se má nacházet právě mezi těmito limitními hodnotami. Označení proměnných vychází z označení v programu PSS[®] Sincal.

5.2 Zhodnocení simulace

Výstupy ze simulace jsou patrné na Obr. 5-3. V první části obrázku je činný výkon na konci NN vedení. Tento výkon je nastavovaný parametr a je pro všechny tři varianty stejný.

V druhé části grafu je pak jalový výkon Q_{reg} . (jalový výkon na konci NN vedení). Vzhledem k tomu, že v této simulaci není na konci NN vedení není žádný odběr/zdroj jalového výkonu kromě FVE, lze tuto hodnotu považovat za hodnotu jalového výkonu, kterou poskytuje FVE v rámci $Q(U)$ regulace. Na tomto lze vidět, že pokud je $Q(U)$ regulace vypnuta, FVE nevyrábí ani nespotřebovává jalový výkon. Když je regulace zapnuta, FVE dodává/odebírá jalový výkon, který odpovídá napětí U_{FVE} (v obrázku níže) dle nastavené křivky $Q(U)$ regulace (Obr. 5-2). Dodávka/odběr jalového výkonu pak způsobí úbytek napětí (v kladném/záporném směru). Pokud jsou přenášeny výkony po vedení malé a napětí v místě FVE je v mezích pásma necitlivosti $Q(U)$ regulace, FVE nedodává ani neodebírá jalový výkon vůbec.

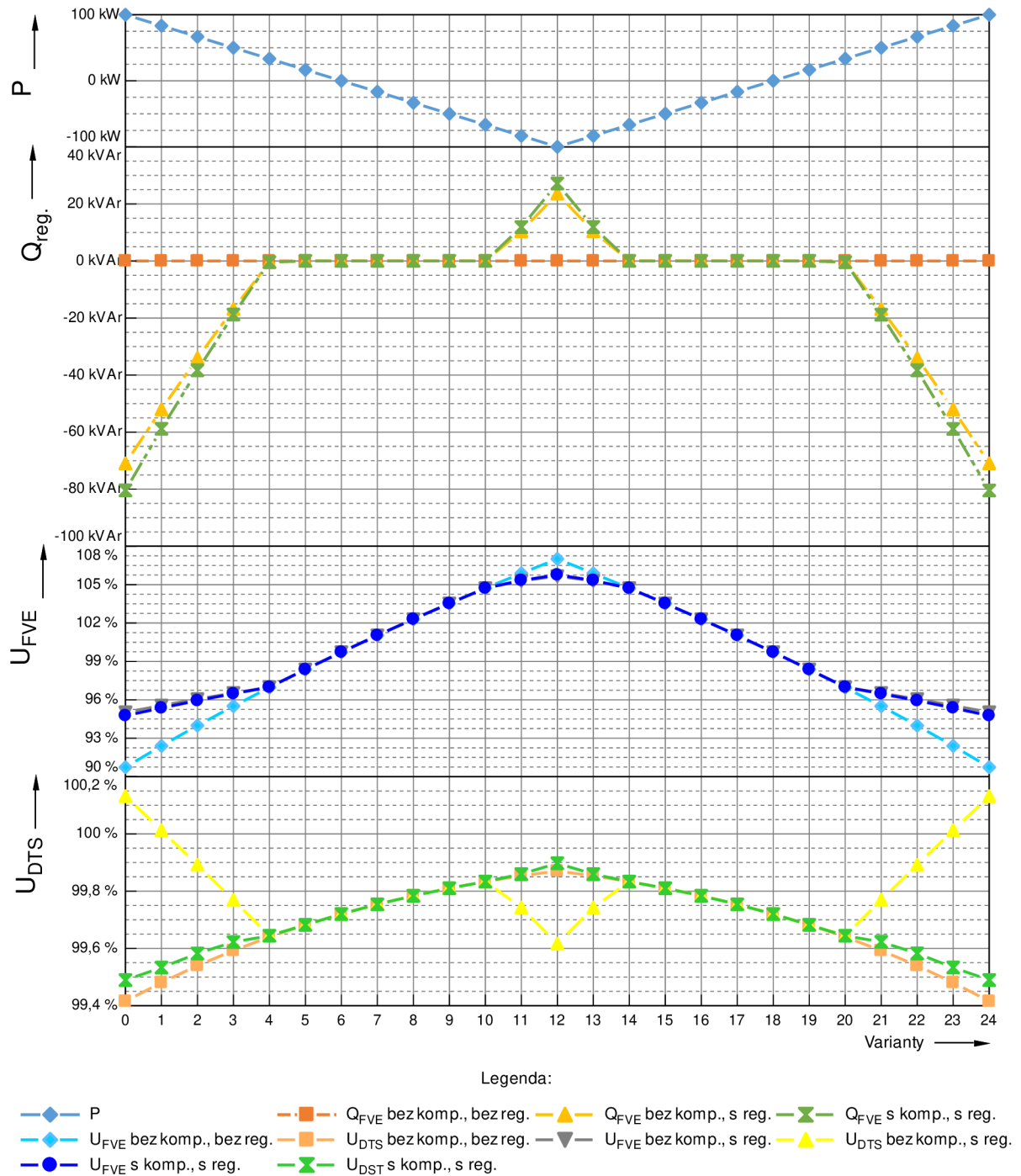
Pokud je zapnuta jak $Q(U)$ regulace FVE, tak kompenzace na DTS, lze si z průběhu jalového výkonu Q_{reg} všimnout, že je hodnota tohoto jalového výkonu větší, než při vypnuté kompenzaci (při stavu, kdy je vedením přenášeno 100 kW do zátěže je rozdíl v jalovém výkonu přibližně 10 kVAr). Toto navýšení se samozřejmě projeví pouze v případě, kdy se výroba nenachází v oblasti maximálního jalového výkonu (při nastavení dle Obr. 5-2 v mezích napětí $0,94U_n - 1,08U_n$)

Toto navýšení jalového výkonu $Q(U)$ regulace je způsobeno tím, že jalový výkon nezpůsobuje úbytek napětí na VN vedení a především na distribučním transformátoru (úbytek napětí v opačném směru - dodávkou jalového výkonu přes transformátor do nadřazené soustavy). Ve vztahu 5.1 je pak druhá část vztahu, ve které vystupuje jalový výkon, relevantní pouze pro úbytek na NN vedení (jelikož jalový výkon přenášený přes DTS a VN vedení po vykompenzování neprochází).

V Obr. 5-3 je vyneseno rovněž i napětí v DTS (v místě kompenzace). Z průběhu tohoto napětí si lze všimnout, že při zapnuté kompenzaci je napětí nepatrně vyšší, než při vypnuté kompenzaci (oba stavy bez $Q(U)$ regulace). To je způsobeno tím, že i přes to, že je zátěž pouze činného charakteru, tak přenosem tohoto výkonu po NN vedení vzniká induktivní jalový výkon

na reaktanci NN vedení. Tento jalový výkon indukčního charakteru při vypnuté kompenzaci není kompenzován a způsobuje úbytky napětí v záporném směru.

Naopak při zapnuté $Q(U)$ regulaci a vypnuté kompenzaci přetok jalového výkonu přes distribuční transformátor způsobí kladný úbytek a při odběru činného výkonu (varianty 1-4 a 20-24) tak navyšuje napětí v DTS. Naopak odběr jalového výkonu při zvýšeném napětí v místě FVE způsobuje pokles napětí v místě DTS (varianty 10-14).



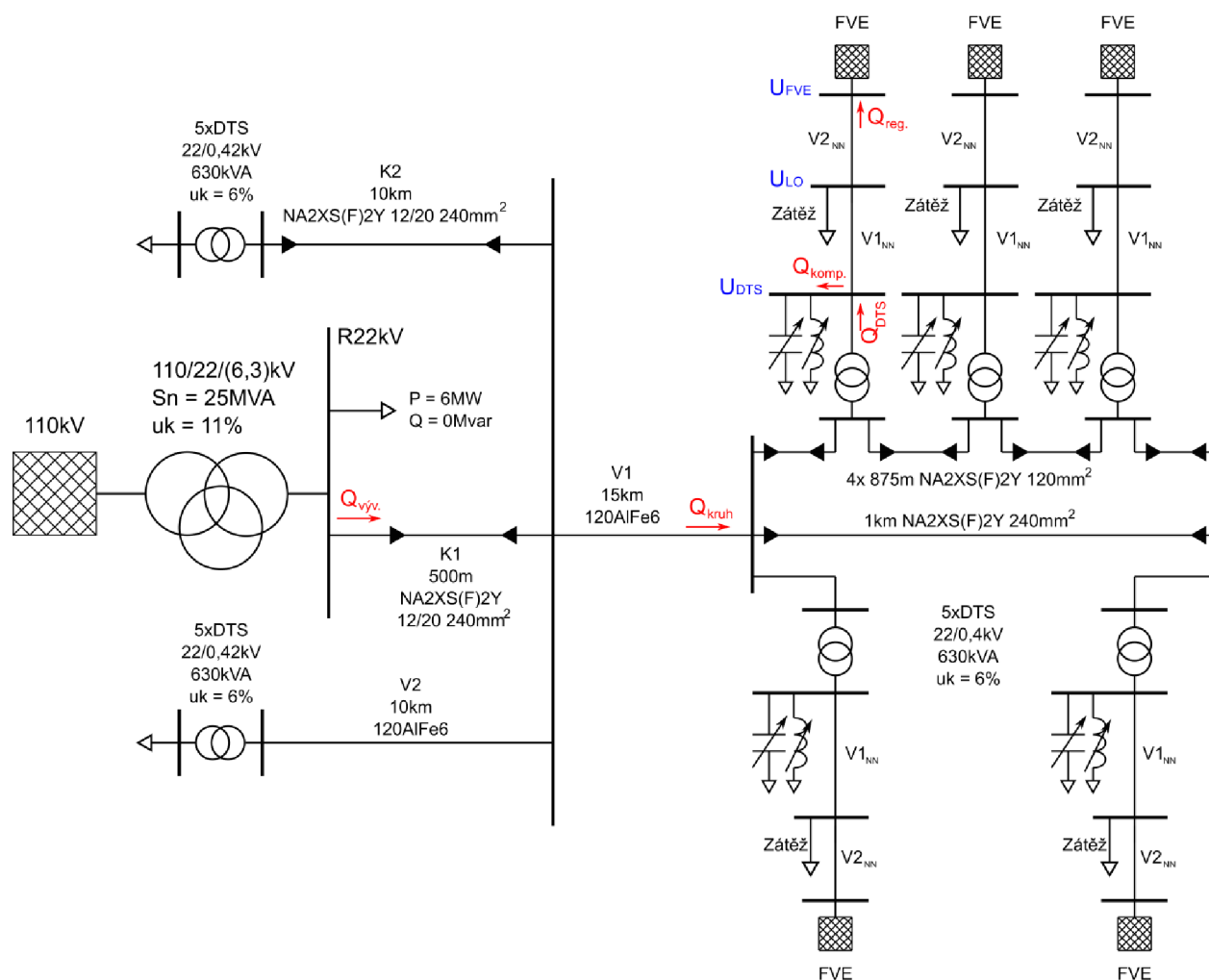
Obr. 5-3 Profily napětí a jalových výkonů v závislosti na velikosti činného výkonu přenášeného NN kabelovým vedením

6 KOMPLEXNÍ SIMULACE

6.1 Popis simulace

Komplexní simulace navazuje na předchozí dvě základní simulace a má za účel demonstrovat vliv kompenzace a $Q(U)$ regulace na toky jalových výkonů v síti. Schéma sítě, která byla předmětem simulace, je na Obr. 6-1. Toky jalových výkonů jsou v této simulaci zkoumány jak na VN, tak na NN hladině. Místa sítě, ve kterých jsou sledovány toky jalových výkonů, jsou včetně označení proměnné (které koresponduje s označením v grafech) naznačeny ve schématu červenou barvou. Uzly, kde bylo sledováno napětí, jsou ve schématu vyznačeny modře.

Schéma sítě vychází ze základní simulace VN sítě. V komplexní simulaci byla vybrána prostřední větev sítě a ekvivalentní DTS, která souhrnně představovala pět DTS, byla rozložena na pět fyzicky samostatných DTS. Schéma propojení jednotlivých samostatných DTS bylo poskytnuto zadavatelem práce a vychází z nového konceptu napájení obcí nad 500 obyvatel. Schéma simulované sítě pak vychází ze schématu rekonstrukce VN sítě v obci Drnholec. Převzata odtud byla především topologie, typy kabelových vedení a jejich přibližné délky.



Obr. 6-1 Schéma sítě komplexní simulace

Schéma NN sítě je oproti základní simulaci NN sítě změněno. Z DTS vede jeden úsek vedení, na jehož konci je zátěž. Od zátěže pak vede druhý úsek vedení, na jehož konci je výroba

(FVE). Podélné parametry NN vedení byly poskytnuty zadavatelem práce a představují vedení, které je tvořeno dvěma třetinami venkovního vedení a jednou třetinou kabelového vedení. Měrná impedance tohoto vedení je: $\bar{Z}_k = R_k + jX_k = 0,385 + j0,226 \Omega/\text{km}$.

Délky jednotlivých vedení $V1_{NN}$ a $V2_{NN}$ byly upravovány tak, aby se napětí ve všech bodech pohybovalo přibližně v mezích $\pm 10\%$ okolo jmenovité hodnoty. Vedení $V1_{NN}$ má délku 130m, vedení $V2_{NN}$ má délku 300m.

Parametry VN sítě vychází ze simulace, která byla popsána v kapitole 4. Transformátor VVN/VN je parametrizován dle Tab. 4-1. Sekundární napětí bylo s ohledem na napěťové poměry sníženo z 22,5 kV na 22 kV. Krajní větve VN sítě zůstaly naprosto totožné. Obě dvě jsou zatíženy středním činným výkonem (dle Tab. 4-4 varianta b) $P_{stř}$) a středním jalovým výkonem (dle Tab. 4-5 varianta 3) $Q_{Lstřed}$). VN vedení je parametrizováno dle Tab. 4-2, distribuční transformátory VN/NN dle Tab. 4-3. $Q(U)$ regulace byla nastavena dle kapitoly 5.1.1, změněn byl pouze jmenovitý výkon zdroje. Kompenzace na DTS byla nastavena obdobným způsobem, jako je popsáno v 5.1.2, avšak nyní se již neuvažoval ideální kompenzátor. Detailnější popis nastavení kompenzace je popsán v kapitole 6.1.1.

Simulace je ve své podstatě výpočet sad ustálených chodů sítě. Jednotlivé ustálené chody jsou vždy kombinací nastavení zátěží a výroby. Simulace byla rovněž provedena v módu *load profile*, avšak nyní již nebyla konfigurována pouze výrobní, ale i zátěž. Všechny pět DTS má v simulaci nastaveny stejné profily výroby a zátěže. Na těchto profilech pak byly testovány různé varianty kompenzace a $Q(U)$ regulace zdroje.

Profil zátěže má následující stavy:

1. Zátěž o velikosti 5% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS
2. Zátěž o velikosti 20% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS
3. Zátěž o velikosti 35% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS
4. Zátěž o velikosti 50% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS

Zátěž má nastaven konstantní účinník a to na hodnotu 0,95 induktivního charakteru. Se zvětšující se činnou zátěží tedy roste i velikost odebíraného jalového výkonu. Pro každý stav zátěže pak byl vytvořen vždy stejný profil výroby činného výkonu výrobnou (FVE). Tento profil se tedy opakuje pro všechny stavy zátěže. Jmenovitý výkon výrobní pak byl nastaven jako 20% jmenovitého zdánlivého výkonu DTS.

Profil dodávaného činného výkonu výrobnou má následující stavy:

- 1) 0% jmenovitého činného výkonu výrobní
- 2) 20% jmenovitého činného výkonu výrobní
- 3) 40% jmenovitého činného výkonu výrobní
- 4) 60% jmenovitého činného výkonu výrobní
- 5) 80% jmenovitého činného výkonu výrobní
- 6) 100% jmenovitého činného výkonu výrobní

Pro lepší představu nastavení zátěží a výroben jsou nastavené hodnoty uvedeny v Tab. 6-1 a Tab. 6-2. Tyto hodnoty jsou rovněž vyneseny do Obr. 6-2. Na ose x jsou jednotlivé stavy (kombinace zátěže a výroby) a na ose y je velikost dané nastavené hodnoty. V grafu není průběh dané veličiny v čase, jsou zde pouze vyneseny jednotlivé ustálené stavy, které jsou propojeny přímkou.

V horní části grafu jsou nastavené hodnoty činných výkonů FVE a zátěží, které odpovídají jednotlivým stavům. V dolní části jsou pak stejným způsobem vyneseny hodnoty jalových výkonů. Vynesen je zde jak nastavený jalový výkon zátěže, tak limitní hodnoty jalového výkonu FVE pro oba dva uvažované způsoby nastavení omezení $Q(U)$ regulace. V grafu jsou vyneseny vždy absolutní hodnoty výkonů (tj. bez rozlišení směru výkonů). Hodnoty výkonů zátěže (jak činného, tak jalového) mají ve skutečnosti znaménko kladné, zatímco činný výkon FVE má znaménko záporné. Limity $Q(U)$ regulace pak mohou nabývat stejné hodnoty jak v kladném směru, tak i ve směru záporném a to v závislosti na tom, zda jde o dodávku nebo odběr jalového výkonu.

Hodnota jalového výkonu zátěže je v Tab. 6-1 dopočítána podle vztahu 6.1:

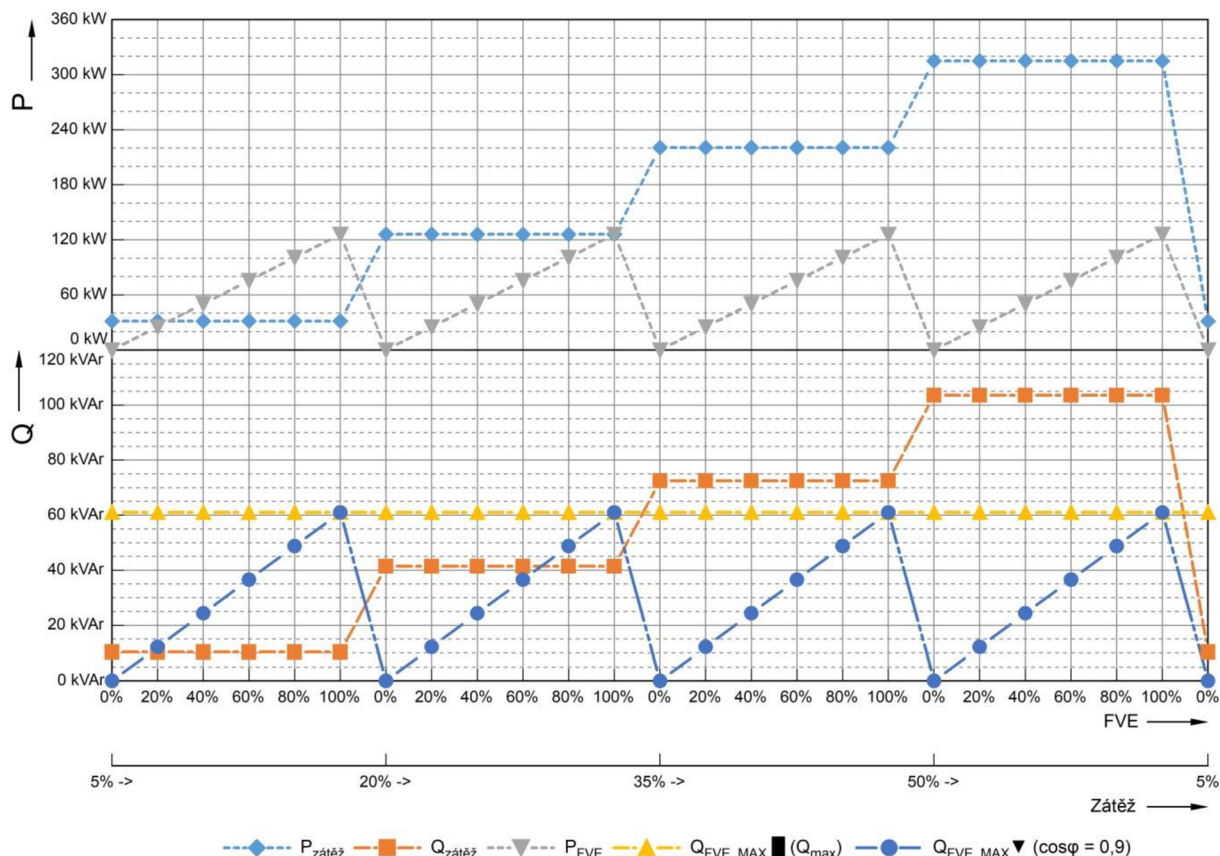
$$Q_z = \sqrt{S_z^2 - P_z^2} = \sqrt{\left(\frac{P_z}{\cos \varphi_z}\right)^2 - P_z^2} \quad (6.1)$$

Tab. 6-1 Nastavení zátěží v komplexní simulaci

Profil zátěže ($P_{nz} = 630 \text{ kW}$, $\cos \varphi_z = 0,95$)			
Označení stavu zátěže	P_z/P_{nz}	P_z (kW)	Q_z (kVAr)
5%	0,05	31,5	10,35
20%	0,2	126	41,41
35%	0,35	220,5	72,47
50%	0,5	315	103,54

Tab. 6-2 Nastavení FVE v komplexní simulaci

Profil výroby ($P_{nFVE} = 0,2 \cdot 630 = 126 \text{ kW}$, Q – dle $Q(U)$ regulace)		
Označení stavu FVE	P_{FVE}/P_{nFVE}	P_{FVE} (kW)
0%	0	0
20%	0,2	25,2
40%	0,4	50,4
60%	0,6	75,6
80%	0,8	100,8
100%	1	126



Obr. 6-2 Stavby výkonů FVE a zátěží

Na výše uvedených profilech pak byly testovány jednotlivé varianty kompenzace:

- I. **QDTS = 0** - Kompenzace na sekundární straně DTS je nastavena na nulový přetok jalového výkonu
- II. **QDTS ~ Q_{kruh}** - Kompenzace na sekundární straně DTS je nastavena na takovou hodnotu jalového výkonu, aby byl pokryt nabíjecí výkon kabelů VN lokálního kruhu
- III. **Bez kompenzace** – Kompensátory jsou odpojeny (varianta slouží k porovnání s předchozími variantami)

Každá z výše uvedených variant má pak v závislosti na nastavení limitů $Q(U)$ regulace následující podvarianty:

- Aa) **FVE ▼** - Výrobna je omezena účíníkem 0,9 (na Obr. 3-7 oblast „V“)
- Ab) **FVE ■** - Výrobna je omezena maximálním jalovým výkonem ($Q_{\max FVE} = 0,484P_{nFVE}$ – na Obr. 3-7 oblast „obdélníku“)
- B) **bez FVE** - Výrobna je odpojena

Celkem je tedy testováno 9 variant na 24 stavech zátěže a výroby. Nastavení $Q(U)$ regulace je shodné s tím, které bylo použito při základní simulaci NN sítě a je popsáno výše v kapitole 5.1.1 ($Q(U)$ regulace zdroje). Výše uvedené názvy variant korespondují s názvy, které budou uvedeny ve výstupech ze simulace.

6.1.1 Nastavení kompenzace u komplexní simulace

Kompenzace byla zvolena jako klasická stupňová. Jalový výkon jednoho stupně byl určen jako 5 kVAr. Jako vhodný způsob provozu se jeví kaskádní spínání jednotlivých stupňů a to především kvůli omezení počtu jednotlivých kondenzátorů/tlumivek a rovněž taky kvůli omezení počtu stykačů, které tyto prvky spínají. Program pro výpočet ustálených chodů, ve kterém byly simulace prováděny, však umožňuje simulovat kompenzátory, jejichž stupně mají stejnou velikost. Pro simulaci byla tedy jako krok zvolena nejmenší hodnota jalového výkonu jednoho stupně.

Pro kompenzaci na nulový přetok přes DTS dostačuje kompenzovat pouze kapacitou. Celkový jalový výkon kompenzátoru je 130 kVAr a je tvořen 26 stupni, každý po 5 kVAr. Maximální hodnota jalového výkonu v DTS bez kompenzace přibližně odpovídá této hodnotě. Napětí v DTS je ale u každé varianty větší, než je 100 % a proto je i jalový výkon kompenzátoru (při konstantní velikosti kapacity) větší a takto navržený kompenzátor (s dostatečnou rezervou) postačuje.

Pro kompenzaci na přibližnou hodnotu jalového výkonu VN kabelového kruhu bylo nejdříve nutné zjistit, jaká velikost jalového výkonu induktivního charakteru bude potřeba pro kompenzaci kapacitního jalového výkonu VN kabelu. Tato hodnota byla zjištěna experimentálně, jako hodnota jalového výkonu Q_{kruh} (místo kde je tento jalový výkon měřen je patrné z Obr. 6-1) při odpojených DTS (je to tedy hodnota jalového výkonu kabelu naprázdno). Z grafu závislosti jalového výkonu kabelu na zatížení (Obr. 3-2) vyplývá, že do přibližné hodnoty zatížení kabelu 30 % není pokles jalového výkonu kapacitního charakteru se zatížením příliš významný (strmost křivky není tak velká). Zjištěná hodnota jalového výkonu kabelového kruhu je 150 kVAr. Při rovnoměrném rozdělení mezi pět DTS dostáváme hodnotu 30 kVAr na jednu DTS. Tato hodnota je jednak jako jmenovitá hodnota kompenzačního reaktoru, tak je to zároveň i žádaná hodnota jalového výkonu, na kterou je regulace kompenzátoru nastavena. Kompenzace kondenzátory zůstala stejná jako u předchozího případu.

V simulaci bylo nastaveno pásmo necitlivosti kompenzátoru jako \pm jeden stupeň, tedy ± 5 kVAr. To je z toho důvodu, aby nedošlo ke stavu, že by nebylo možné najít stabilní stupeň kompenzátoru, tedy aby se regulace nerozkmitala. Rezerva o velikosti dvou stupňů byla zvolena proto, aby bylo pásmo necitlivosti dostatečně velké, jelikož při vyšším než jmenovitém napětí je i jalový výkon kompenzátoru větší než jmenovitý.

6.2 Výstupy simulace

Výstupem ze simulace jsou grafy, které jsou uvedeny v příloze P1. Tyto grafy jsou ve stejném formátu. Na ose x jsou vyneseny jednotlivé kombinace stavů odběru zátěží a výroby FVE. Na ose y je pak daný vyhodnocovaný parametr. Aby bylo možné jednotlivé varianty srovnávat, je všech 9 variant s ohledem na kompenzaci a $Q(U)$ regulaci vyneseny vždy do jednoho grafu.

Vyhodnocované parametry jsou vyznačeny na Obr. 6-1. Na Obr. P1-1 jsou toky jalových výkonů v místě připojení zdroje FVE (Q_{reg}) a kompenzační jalový výkon (Q_{komp}), na Obr. P1-2 jsou toky jalových výkonů na NN straně DTS (Q_{DTS}), na Obr. P1-3 jsou jalové výkony na vývodu z kabelového kruhu (Q_{kruh}), na Obr. P1-4 jsou jalové výkony na sledovaném vývodu z rozvodny 22kV ($Q_{\text{výv.}}$). Dále jsou sledována napětí v různých místech NN sítě a to v místě připojení FVE (U_{FVE} na Obr. P1-5), v místě zátěže (U_{LO} na Obr. P1-6) a na DTS (U_{DTS} na Obr. P1-7). Dále pak

byly vypočítány ztráty (Obr. P1-8) a účinnost (Obr. P1-9) sítě v rámci sledovaného vývodu z rozvodny. Ztráty byly vypočítány jako rozdíl součtu zdrojů a součtu odběrů, účinnost byla vypočítána jako jejich podíl. Do výpočtu ztrát a účinnosti nebyly započítány ztráty VVN/VN transformátoru.

Z Obr. P1-2, Obr. P1-3 a Obr. P1-4, jde vidět, že kompenzace jalového výkonu na DTS vede ke stabilizaci jalového výkonu. Pokud je nastavena kompenzace na nulový přetok jalového výkonu v DTS nebo na výstupu z kabelového kruhu, zabrání se sice přetoku na těchto místech, ovšem na vývodu z rozvodny (Obr. P1-4) je pro obě tyto situace konstantní přetok jalového výkonu kapacitního charakteru (dodávka jalového výkonu do rozvodny 22 kV).

Z Obr. P1-2 jde vidět, že kompenzace pracuje v nastavených mezích \pm jeden stupeň, avšak zejména při kompenzaci na hodnotu jalového výkonu, která odpovídá hodnotě jalového výkonu kabelového kruhu je vidět, že při největším zatížení (50 %) jsou kompenzátory na horní hranici dovoleného pásma. To se projeví zejména v místech vývodu z kruhu (Obr. P1-3) a na vývodu z rozvodny 22 kV (Obr. P1-4), jelikož se zde tento efekt sčítá ze všech pěti DTS. Při kompenzaci na hodnotu jalového výkonu kabelového kruhu tento fakt situaci v místě vývodu z kabelového kruhu zhoršuje (zvětšuje hodnotu jalového výkonu – induktivního charakteru), avšak v rozvodně 22 kV je tento jev pozitivní, jelikož tento induktivní jalový výkon vykompenzuje část kapacitního jalového výkonu zbytku sítě VN a v rozvodně je pak přetok jalového výkonu menší (avšak tento jalový výkon je stále kapacitního charakteru)

Z Obr. P1-4 plyne, že zatímco pro oba scénáře kompenzace jalového výkonu v DTS je na vývodu z rozvodny stále přetok jalového výkonu kapacitního charakteru. Bez kompenzace je při nízkém zatížení (5 %) na vývodu z rozvodny rovněž přetok jalového výkonu kapacitního charakteru, avšak situaci zde zlepšuje $Q(U)$ regulace zdrojů, která dokonce při větších hodnotách výkonu FVE způsobí tok jalového výkonu induktivního charakteru (odběr jalového výkonu). Při středních hodnotách zatížení (20 a 35%) se jalový výkon na vývodu z rozvodny pohybuje okolo nuly, a to v pásmu od 100 kVAr kapacitního charakteru do 150 kVAr induktivního charakteru. $Q(U)$ regulace zdrojů zde má opět pozitivní přínos ve zmenšování hodnoty jalového výkonu (kromě stavů při 20 % zátěži a 80 a 100 % výroby FVE). Při velkých zatíženích (50 %) má $Q(U)$ regulace zdrojů opět pozitivní přínos. Zde se již projevuje značný rozdíl v charakteristikách regulace, kde při omezení pouze maximální hodnotou jalového výkonu zdrojů (oblast obdélníku PQ diagramu) je jalový výkon na vývodu při nulovém výkonu FVE o cca 300 kVAr menší, než při nastaveném omezení účinníkem 0,9 (oblast „V“ PQ diagramu).

V Obr. P1-1 jsou vyneseny jalové výkony $Q(U)$ regulace FVE a kompenzátoru. Do grafů byly vyneseny záměrně obě dvě proměnné a to z důvodu snazší analýzy vzájemné interakce $Q(U)$ regulace a kompenzace. Na průběhu jalového výkonu FVE poskytnutého v rámci $Q(U)$ regulace Q_{reg} jde vidět, že zatímco pro nízké a střední hodnoty zátěže (5 % a 20 %) je poskytnutý jalový výkon induktivního charakteru (odběr). To je způsobeno tím, že při takovýchto hodnotách zatížení je napětí v místě FVE větší než jmenovité a $Q(U)$ regulace odběrem jalového výkonu napětí snižuje. Při zátěži 35 % a nízkých hodnotách výroby FVE převládá vliv zátěže a napětí je nižší, FVE tedy vyrábí jalový výkon, aby napětí v místě připojení zvýšila. Naopak při vyšších hodnotách výroby FVE převládá v tomto místě navýšení napětí vlivem výroby činného výkonu a v rámci $Q(U)$ regulace je toto napětí snižováno odběrem jalového výkonu. Při největší hodnotě zatížení (50 %) převládá vliv zátěže a FVE dodává jalový výkon, aby napětí v místě připojení zvýšila. Z průběhu kompenzačního výkonu jde vidět, že v případech, kdy FVE odebírá jalový výkon (induktivní charakter), kompenzace úměrně s tím začne jalový výkon dodávat.

Kompensace tedy reguluje proti $Q(U)$ regulaci zdroje. Tento stav také není vhodný s ohledem na výše popsany profil jalových výkonů na vývodu z rozvodny, kde při variantách bez kompenzace právě tento induktivní jalový výkon kompenzoval část jalového výkonu zbytku VN sítě. Nasazování kompenzace tedy není vhodné v sítích s velkým zastoupením zdrojů, podporujících napětí pomocí jalového výkonu. Při stavech, kdy FVE dodává jalový výkon, $Q(U)$ regulace kompenzaci naopak podporuje (snižuje potřebný kompenzační jalový výkon). To se děje zejména při velkém zatížení (50 %). Při tomto zatížení jde opět vidět zásadní rozdíl v jalovém výkonu při různém nastavení limitů $Q(U)$ regulace. Pokud je limit nastaven na maximální hodnotu jalového výkonu, je kompenzační jalový výkon menší, než při nastaveném limitu účinníku 0,9 (při hodnotách výroby 0 – 40 %).

Na Obr. P1-5 je vyneseno napětí v místě FVE. Zde je vidět, že pokud FVE není v provozu, úbytky napětí jsou způsobeny pouze zátěží. Pokud je FVE v provozu, je toto napětí navyšováno zejména vlivem výroby činného výkonu. $Q(U)$ regulace pak pomocí jalového výkonu pomáhá toto napětí stabilizovat.

Na Obr. P1-6 je vyneseno napětí v místě zátěže. Trend je obdobný jako v místě připojení FVE, avšak navýšení napětí vlivem výroby zde není tak majoritní. Při velkých zatíženích zde lze spatřit drobný přínos kompenzace na navýšení napětí.

Na Obr. P1-7 je vyneseno napětí v uzlu DTS. Z průběhu jde vidět, že má kompenzace negativní dopad na stabilizaci napětí v tomto místě. Kompensace zde zbytečně navyšuje napětí, které je i v případě největšího zatížení, bez kompenzace a bez $Q(U)$ regulace větší než 100 %.

Na Obr. P1-8 a Obr. P1-9 jsou vyneseny hodnoty ztrát a účinnosti. Z průběhů lze vidět, že větší závislost než na kompenzaci je zde na tom, zda je, nebo není v provozu FVE. Při větších zatíženích lze pozorovat nepatrný přínos kompenzace ve zmenšení ztrát.

7 ZÁVĚR

Kromě jalového výkonu provází přenos činného výkonu taktéž deformační výkon, který je způsobován především nelineárními zátěžemi, a který rovněž vytváří ztráty na vedení. Tento výkon však nelze snadným způsobem kompenzovat. Některé kompenzační prostředky, které kompenzují jalový výkon na první harmonické, mohou tento deformační výkon vytvářet a mohou se tak podílet na zvětšování harmonického zkreslení napětí v sítích NN. Proto je nutné volit kompenzační prostředky uvážlivě.

Síťové prvky jsou nezanedbatelným zdrojem jalového výkonu. U síťových prvků je množství vygenerovaného/spotřebovaného jalového výkonu silně závislé na jejich zatížení, které je během dne proměnlivé. Zejména pak kabelová vedení VN jsou značným zdrojem jalového výkonu a to ve většině případů v celém pásmu zatížení. Dalším zdrojem jalového výkonu je pak také vnořená výroba, která v mnoha případech využívá pro stabilizaci napětí v místě připojení jalový výkon. Nabíjení elektromobilů zatím na toky jalových výkonu nemá větší vliv, jelikož je v dnešní době zastoupení elektromobilů velmi malé, avšak do budoucna bude potřeba i s tímto počítat. Co se týče samotných spotřebitelů, tak v sektoru MOO je i přes růst spotřebičů napájených přes spínané zdroje odebíraný jalový výkon kapacitního charakteru stále zanedbatelný. Účinník je u drtivé většiny odběratelů na velice dobrých hodnotách. Problém však začíná být u odběratelů ze sektoru MOP, kde je účinník podstatně horší.

Co se týče přetoků jalového výkonu přes distribuční transformátorové stanice, z dlouhodobého pohledu je účinník stále v přijatelných mezích a neklesá v průběhu roku pod hodnotu 0,95 induktivního odběru.

Základní simulace VN potvrdila předpoklad, že je velikost jalového výkonu na vývodu z rozvodny VN silně závislá především na konfiguraci sítě a na velikosti jalových odběrů DTS. Z této simulace vyplývá, že zatímco ve venkovních soustavách má kompenzace odběru jalového výkonu (induktivní charakter) smysl, v kabelových sítích je vhodné kompenzovat pouze dodávku jalového výkonu (kapacitní charakter), nikoliv odběr. Ve smíšené by měla být kompenzována dodávka jalového výkonu a lze zde připustit i částečnou kompenzaci jalového odběru. Do budoucna při uvažování kabelizace je pak vhodné řešení zamezení dodávky jalového výkonu z NN soustavy a na to by měla být navržena i kompenzace.

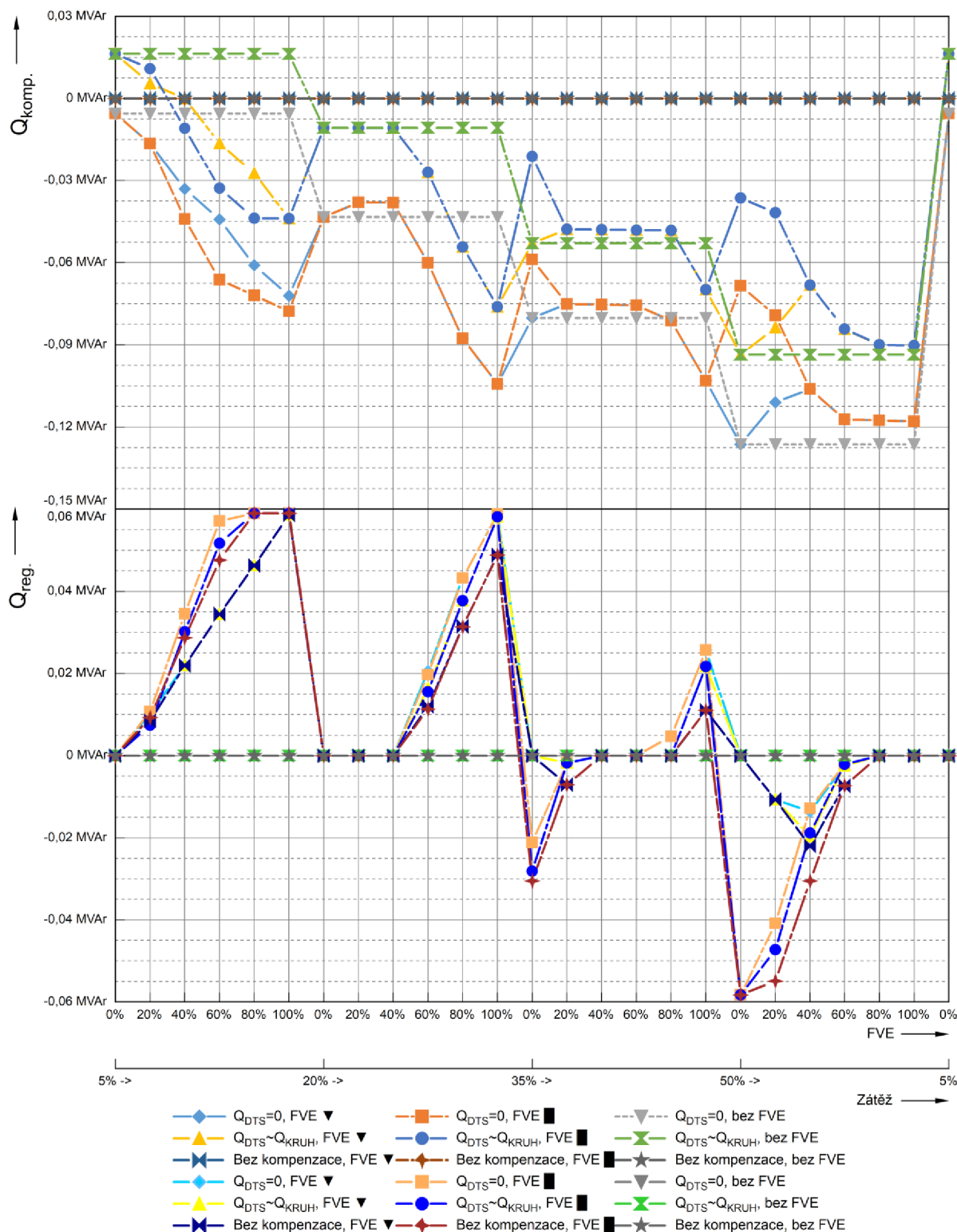
V základní simulaci NN sítě byl ověřen vliv kompenzace na $Q(U)$ regulaci zdrojů a byly teoreticky vysvětleny jejich vzájemné interakce. Simulací bylo ověřeno, že v případě kompenzace na DTS se zvětšuje velikost jalového výkonu, který výrobní poskytuje v rámci $Q(U)$ regulace. Toto navýšení jalového výkonu $Q(U)$ regulace je způsobeno tím, že jalový výkon nezpůsobuje úbytek napětí na VN vedení a především na distribučním transformátoru (tokem jalového výkonu přes distribuční transformátor do nadřazené soustavy). Ze základní simulace NN sítě dále plyne, že trendy regulace napětí pomocí jalového výkonu, zamezení přetoku do VN soustavy a kabelizace NN soustavy jsou protichůdné.

S využitím znalostí a zkušeností z předchozích dvou modelů sítě, byl vytvořen model komplexní, kde jsou sledované parametry jak ve VN, tak v NN síti. Ověřeno zde bylo to, že kompenzace jalového výkonu v DTS vede ke stabilizaci jalového výkonu na vývodu z rozvodny, ovšem v závislosti na konfiguraci sítě může vést ke konstantnímu toku jalového výkonu kapacitního charakteru v tomto místě. Dále zde byla ověřena kontraindikace kompenzace a $Q(U)$ regulace, kdy kompenzátory kompenzují jalový výkon spotřebovaný v rámci $Q(U)$ regulace.

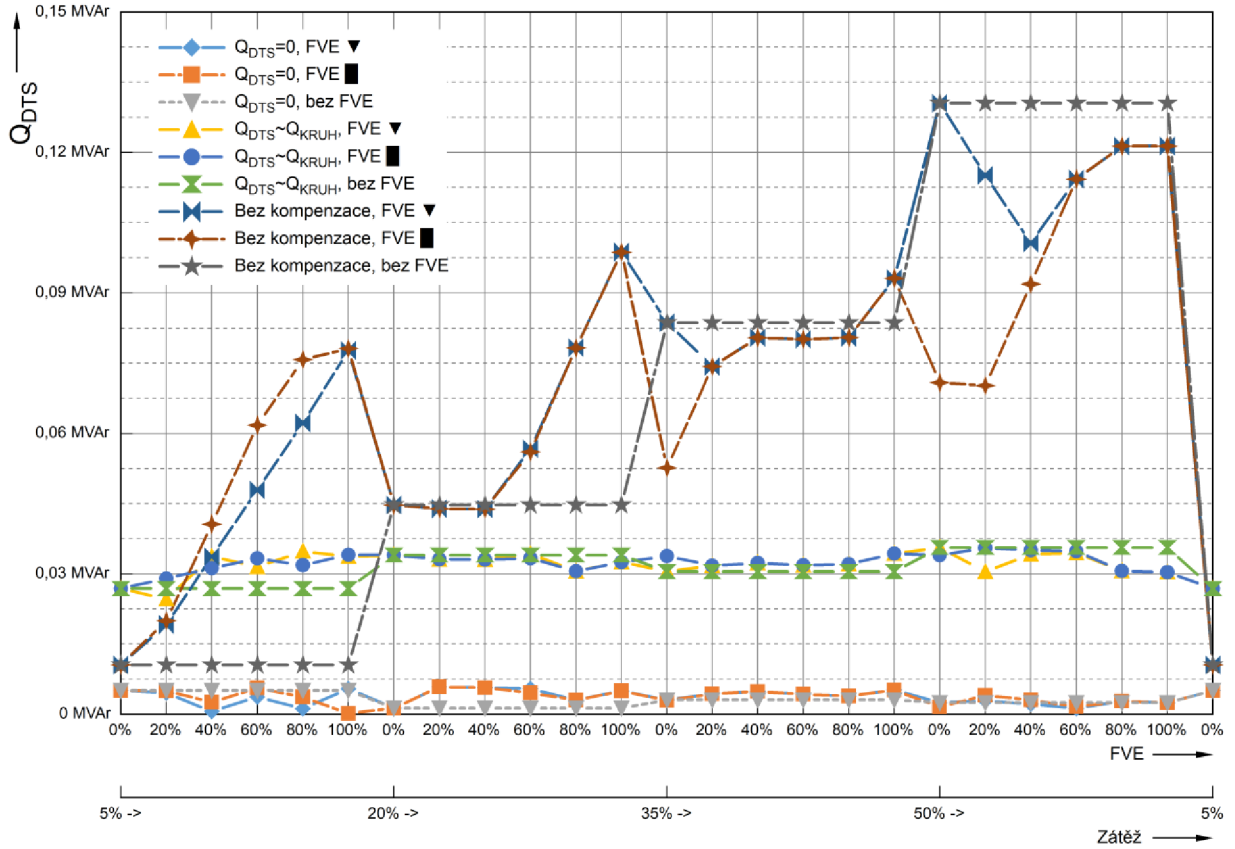
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] WEEDY, B. M. *Electric power systems. 1. Aberdeen: John Wiley, 1967.*
- [2] *Silové kabely s izolací ze zesíťeného polyetylenu* [online]. [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: [https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/NA2XS\(F\)2Y_12\\$20_kV+DS+CZ+EN.pdf](https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/NA2XS(F)2Y_12$20_kV+DS+CZ+EN.pdf)
- [3] PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav. Páté vydání. 2015.
- [4] Trojfázové olejové hermetizované transformátory 50 - 2 500 kVA, 7.2 - 24 kV, straty CoCk , Al vinutie [online]. [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: <http://www.bez.sk/subor/103.pdf>
- [5] VANĚK, Roman. Regule U/Q obnovitelných zdrojů v síti VN ČEZ Distribuce, a.s. *Energetika: Odborný měsíčník pro elektrárenství, teplárenství a použití energie*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2018, **68**(5), 6. ISSN 0375-8842.
- [6] Pravidla provozování distribučních soustav: *Příloha 4 - Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se síti provozovatele distribuční soustavy* [online]. 2017 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2018-09/Priloha_c_4_Pravidla_pro_paralelni_provoz_vyroben_a_akumulacnich_zarizeni_se_siti_PDS_new.pdf
- [7] Pravidla provozování distribučních soustav: *Příloha 6 - Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě* [online]. listopad 2017 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2018-09/Priloha_6_k_PPDS_Standardy_pripojeni_zarizeni_k_distribucni.pdf
- [8] KURFIŘT, Martin, Jan HLAVNIČKA a Jan TEPLÝ. Zpětný vliv nabíjení elektromobilů na distribuční soustavu. In: *Konference ČK CIRED 2018*[USB]. Tábor, 2018, s. 8.
- [9] BRETTSCHEIDER, Zbyněk, Boris VODVÁRKA, Vojtěch NOVÁK a Pavel BÜRGER. Toky jalových výkonů v sítích NN a jejich možný vliv na vyšší napěťové hladiny. In: *Konference ČK CIRED 2018*[USB]. Tábor, 2018, s. 10 [cit. 2019-01-21].
- [10] VYKUKA, Roman a Miloslava TESAŘOVÁ. Analýza výkonových toků na distribučních trafostanicích 22/0,4 kV. In: *Konference ČK CIRED 2017* [USB]. Tábor, 2017, s. 7 [cit. 2019-01-21].
- [11] Katalog transformátorů - Kočí&Valášek [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://transformatory.cz/files/file/souhrnny-katalog-KV.pdf>

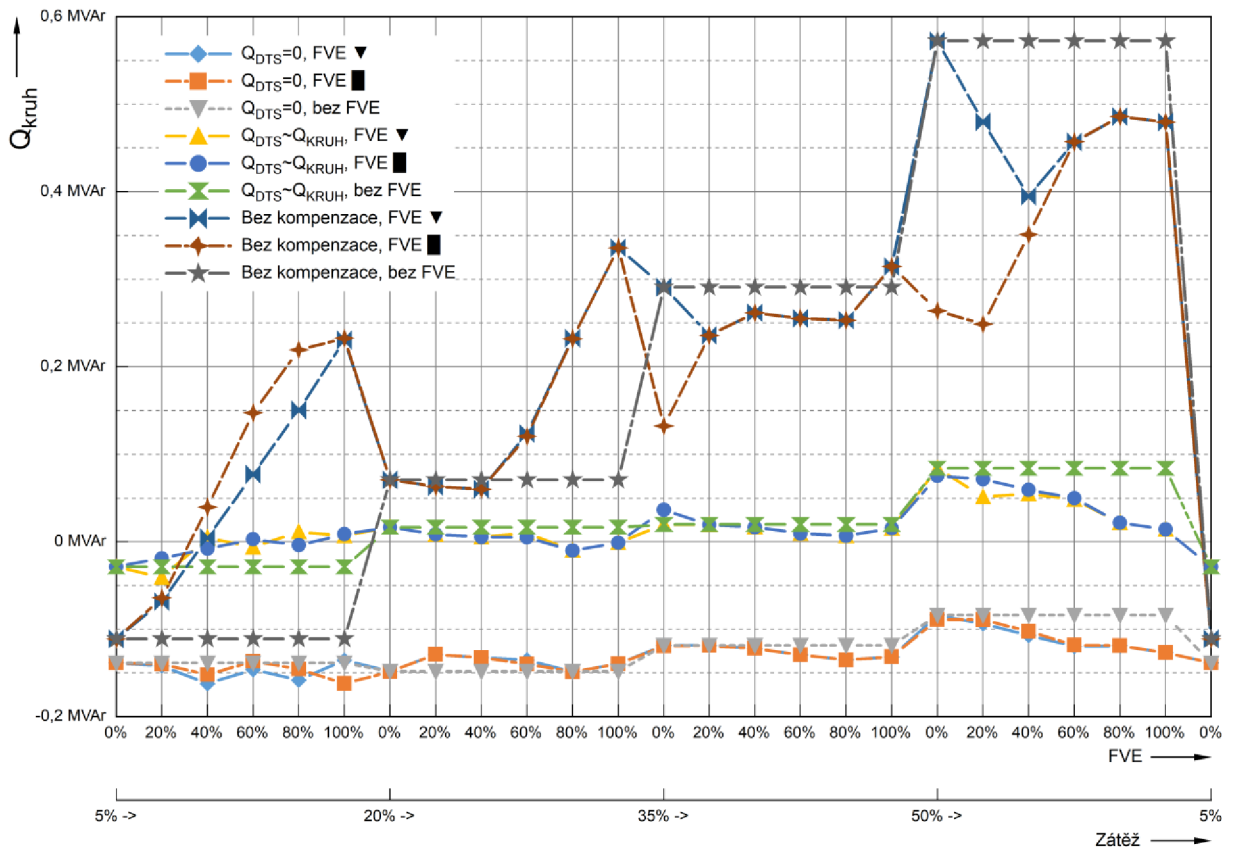
PŘÍLOHA P1



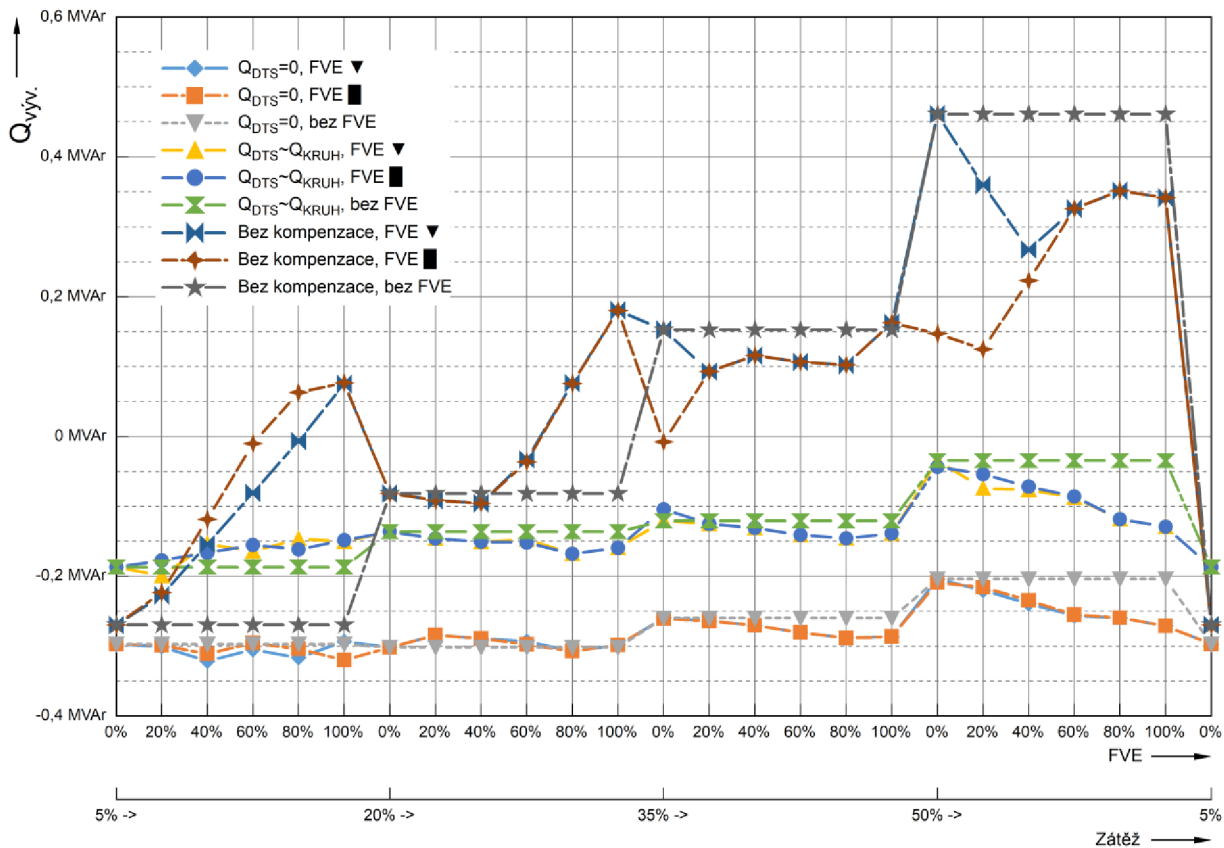
Obr. P1-1 Jalový výkon $Q(U)$ regulace a kompenzace



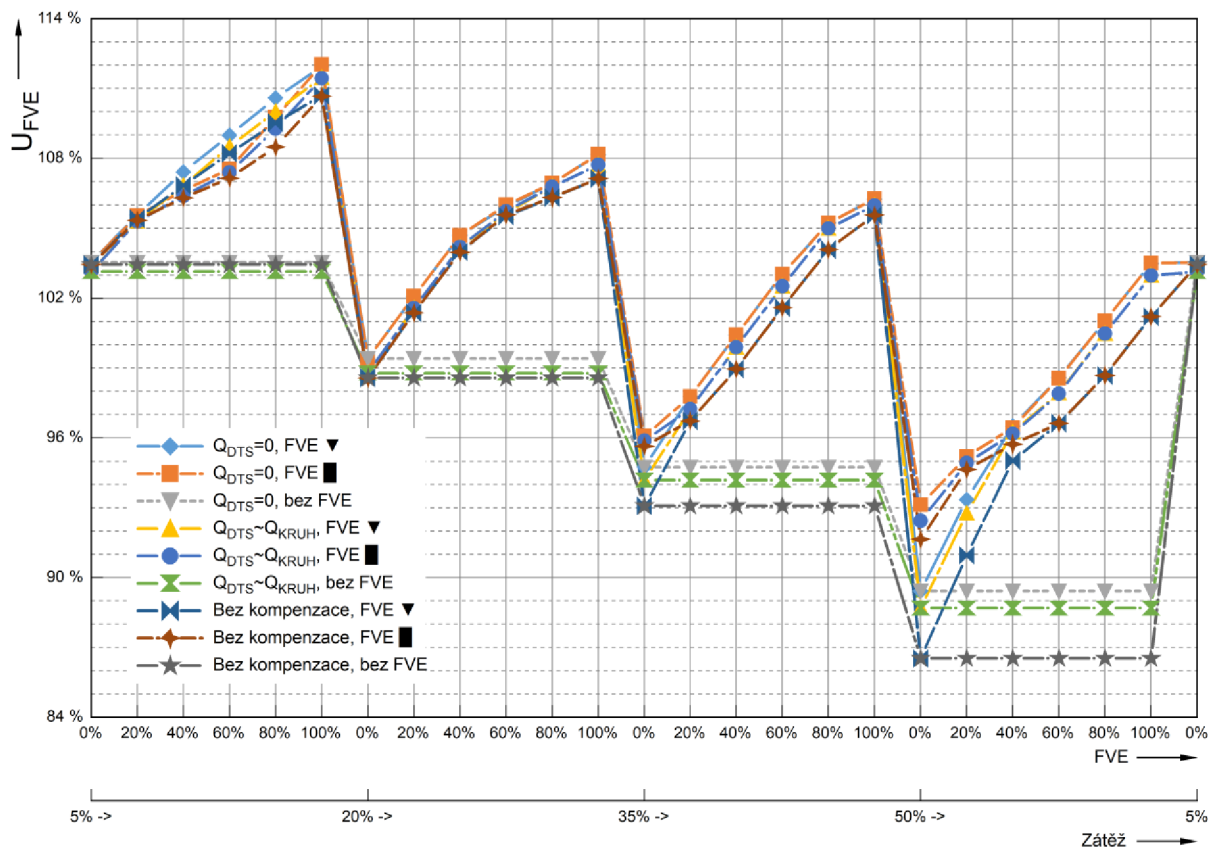
Obr. P1-2 Jalový výkon na NN straně DTS



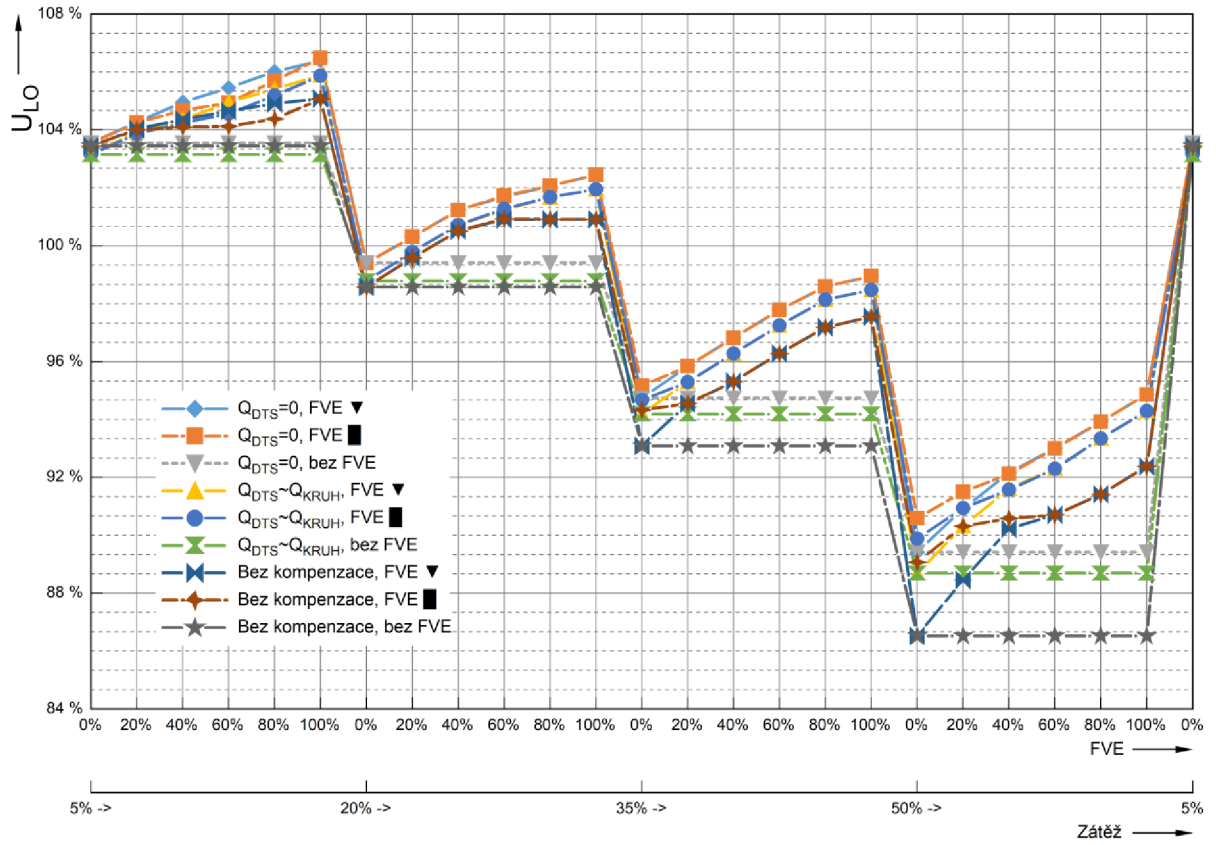
Obr. P1-3 Jalový výkon na výstupu z kabelového kruhu VN



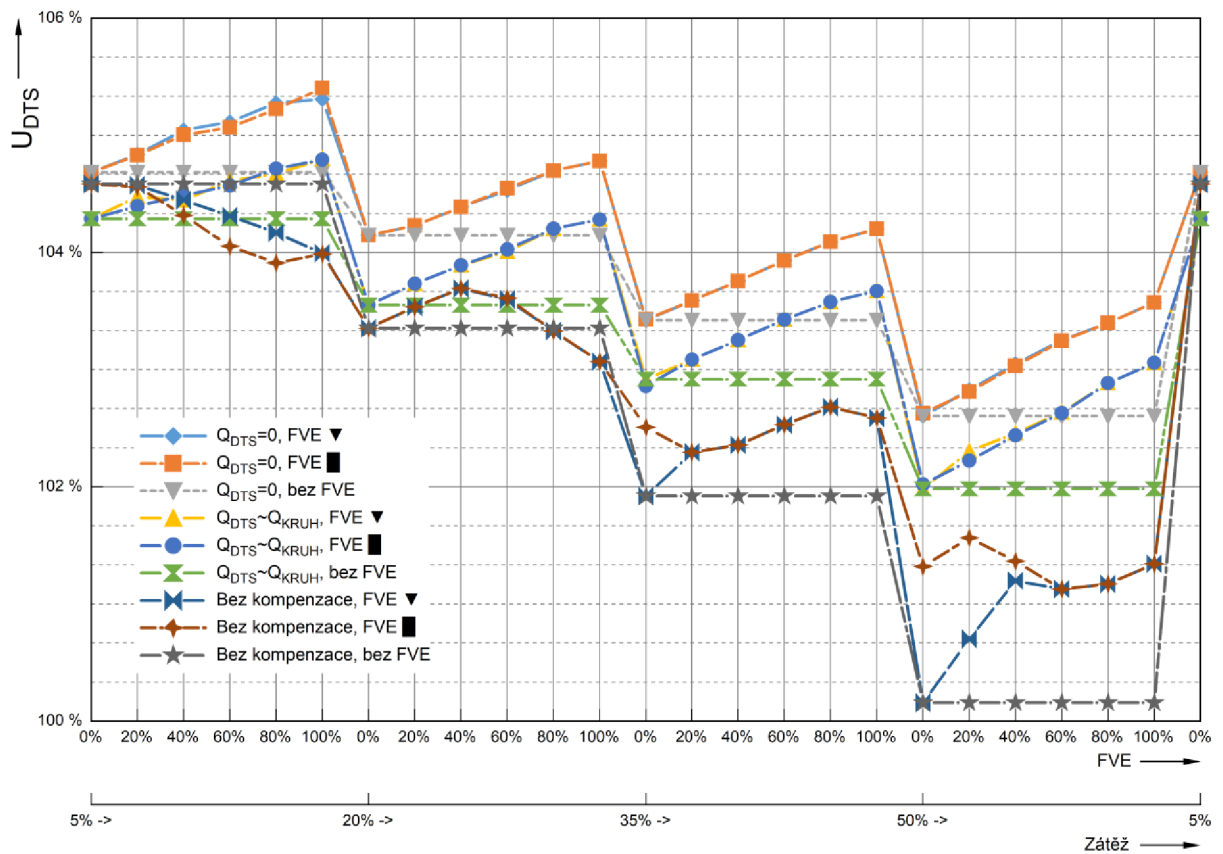
Obr. P1-4 Jalový výkon na vývodu z rozvodny 22 kV



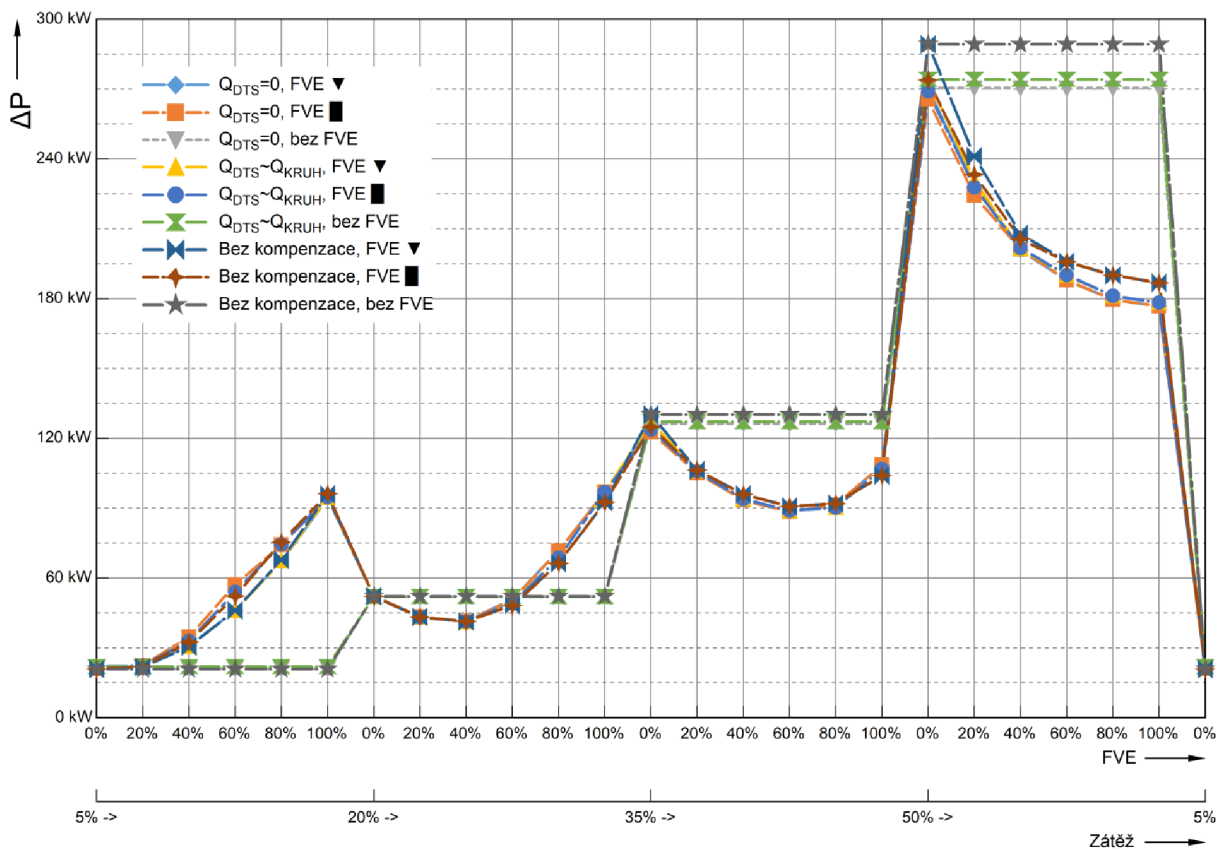
Obr. P1-5 Napětí v místě připojení FVE



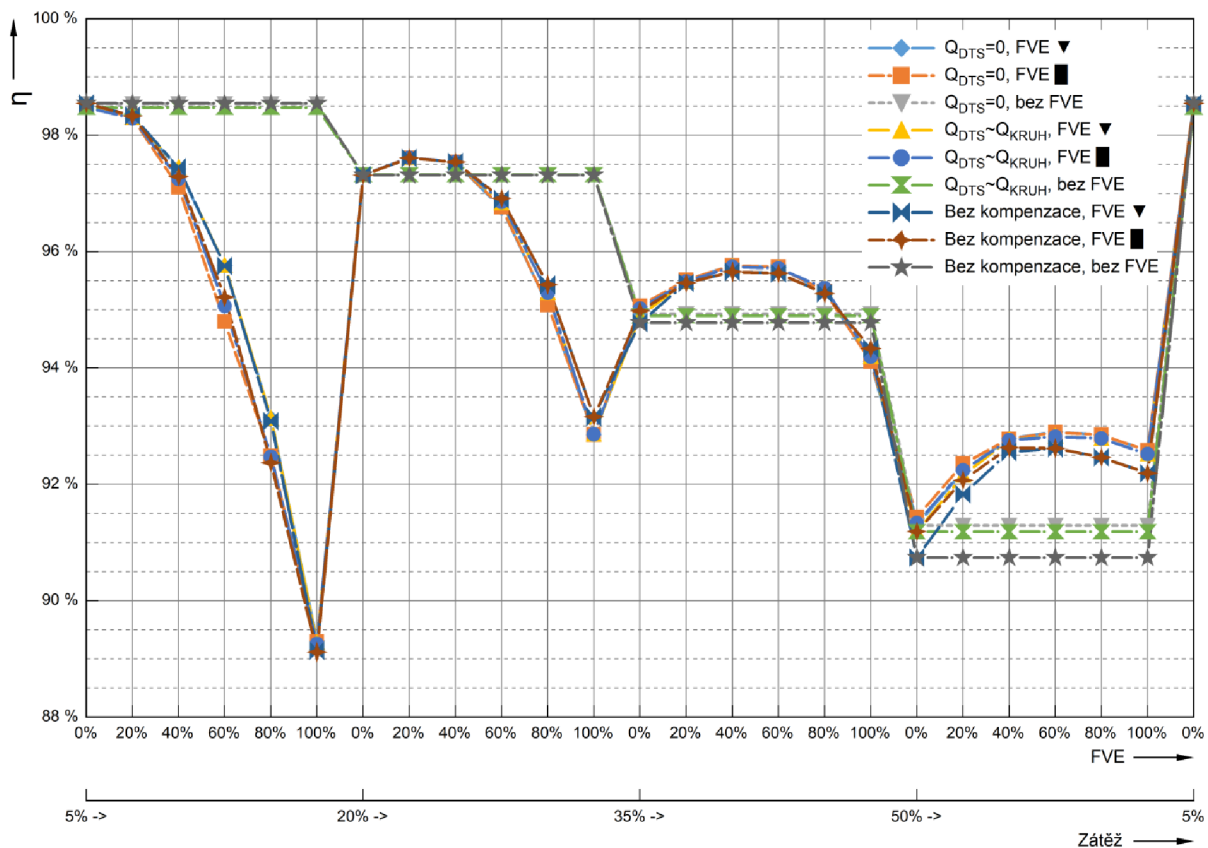
Obr. P1-6 Napětí v místě zátěže



Obr. P1-7 Napětí v DTS



Obr. P1-8 Ztráty v síti (vztaženo na sledovaný vývod z rozvodny)



Obr. P1-9 Účinnost sítě (vztaženo na sledovaný vývod z rozvodny)