

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Řízení jalového výkonu v obnovitelných zdrojích
připojených do distribuční sítě**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek DVOŘÁK**

Osobní číslo: **E12B0216P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Řízení jalového výkonu v obnovitelných zdrojích připojených do distribuční sítě**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bakalářská práce "Řízení jalového výkonu v obnovitelných zdrojích připojených do distribuční sítě" bude zaměřena na tyto body:

1. Provedte rozbor zákona o řízení P, Q u zdrojů nad 200 kW.
2. Zhodnoťte stávající stav připojování obnovitelných zdrojů menších výkonů v České republice.
3. Zpracujte informace o možnostech řízení jalového výkonu a jeho vlivu na změnu napětí.
4. Porovnejte informace z hlediska vlastností, ztrát a ekonomiky provozu na konkrétním případě zvolené sítě.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Elektroenergetika I, II.
3. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P,Q u zdrojů nad 200 kW.
4. Dle uvážení a pokynů udá vedoucí BP.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je přiblížit čtenáři problematiku připojování a provozu obnovitelných zdrojů elektrické energie k elektrizační síti. Za tímto účelem nejprve popisují energetický zákon a aktuální stav připojování obnovitelných zdrojů v České republice. Dále provádím rozbor energetického zákona o řízení výkonů. Následně se zaměřuji na teorii dělení kompenzace výkonů, stručně popisují způsob řízení jalového výkonu a jeho vlivu na změnu napětí v České republice. V praktické části práce řeším ztrátu výkonů pro konkrétní případ připojené fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě.

Klíčová slova

Elektrizační soustava, obnovitelné zdroje, činný výkon, kompenzace, fotovoltaická elektrárna

Abstract

The aim of this bachelor thesis is give insight into problems with the connection and operation of renewable energy sources to the electricity network. First i describe the Energy Act and the current state of the connection of renewable sources in the Czech Republic. I am also conducting an analysis of the Energy Act on Electric Power Management Then I focus on the theory of dividing the compensation of power, briefly describe the way of controlling reactive power and its influence on the change of voltage in the Czech Republic. In the practical part of the thesis I solves problems of losses power for the specific case of the connected photovoltaic power plant to the distribution network.

Key words

Power system, renewable energy sources, active power, compensation, photovoltaic power plant

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 15.6.2017

Marek Dvořák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. a mému konzultantovi Ing. Františkovi Žákovi ze společnosti EGE, s.r.o. za věnovaný čas a ochotu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	11
1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	12
1.1.1 Přenosová soustava	12
1.1.2 Distribuční soustava	12
2 ZDROJE V DISTRIBUTUČNÍ SOUSTAVĚ	14
2.1 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DS	14
2.2 VÝVOJ PŘIPOJOVÁNÍ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ V ČR	15
3 VÝKONY A JEJICH ŘÍZENÍ V RÁMCI PPDS	17
3.1 ČINNÝ A JALOVÝ VÝKON	17
3.2 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU V RÁMCI PPDS	18
3.2.1 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci	18
3.2.2 Snížení činného výkonu při podfrekvenci	19
3.2.3 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách	19
3.3 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU V RÁMCI PPDS	20
3.3.1 Zdroje v sítích vn a 110 kV	21
3.3.2 Způsoby řízení jalového výkonu	21
4 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU V SÍTI	22
4.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ KOMPENZACE	23
4.1.1 Sériová kompenzace	24
4.1.2 Paralelní kompenzace	24
4.2 UMÍSTĚNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	25
4.2.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace	25
4.2.2 Skupinová kompenzace	26
4.2.3 Ústřední (centrální) kompenzace	26
4.2.4 Smíšená kompenzace	26
4.3 REGULACE NAPĚTÍ ŘÍZENÍM JALOVÉHO VÝKONU V ČR	27
4.3.1 Terciální regulace napětí	28
4.3.2 Sekundární regulace napětí	29
4.3.3 Primární regulace napětí	29
5 ŘEŠENÍ PŘIPOJENÉ FVE K DISTRIBUTUČNÍ SÍTI	30
5.1 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA	30
5.2 STRÍDAČ	30
5.3 TRANSFORMÁTOR	31
5.4 VEDENÍ	31
5.5 ODBĚR ZE SÍTĚ	32
5.6 DODÁVKA ZE ZDROJE	35
5.7 NAPĚTÍ A VÝKONY V SÍTI	37
5.8 VÝSTUPY PRO KONKRÉTNÍ SÍŤ	39
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44
SEZNAM PŘÍLOH	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

Úvod

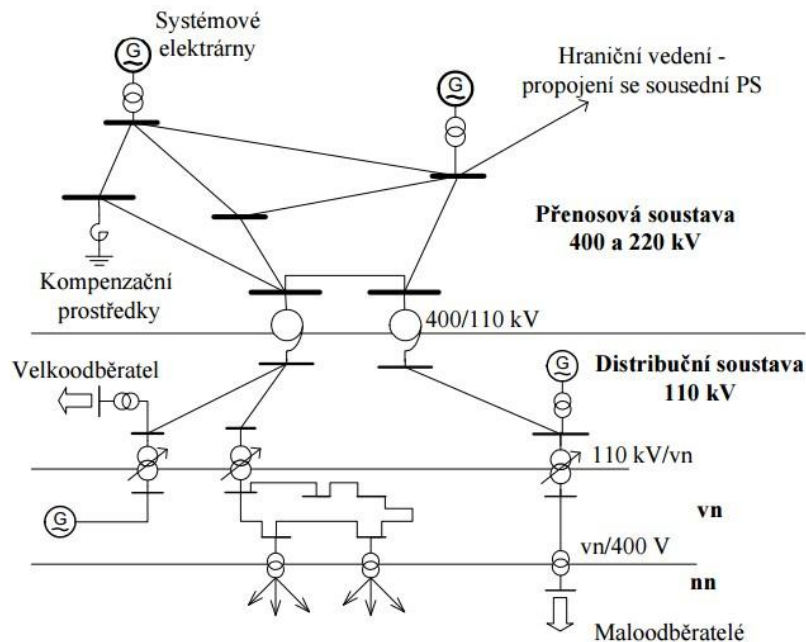
Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na princip řízení jalového výkonu obnovitelných zdrojů připojených do distribuční soustavy. Celá práce je rozdělena do pěti kapitol. V První kapitole popisují elektrizační soustavu a její následné dělení na distribuční a přenosovou. Dále jsem v této části práce stručně popsal hlavní rozdíly mezi těmito soustavami a současné uspořádání společností v české energetice. V druhé kapitole jsem se zaměřil na pravidla provozování distribuční soustavy a jejich náležitostí. Následně jsem v této části porovnal vývoj a současný stav připojování obnovitelných zdrojů elektrické energie v České republice v závislosti na vydávaných energetických ustanovení. V třetí části jsem se věnoval požadavkům na řízení jalového a činného výkonu stanovených v Pravidlech provozování distribuční soustavy vypracované provozovatelem distribuční soustavy. Ve čtvrté kapitole se věnuji teorii řízení výkonů, dělení kompenzace a způsobu řízení jalového výkonu v elektrizační soustavě v České republice. V poslední kapitole řeším konkrétní případ připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě a její následnou kompenzaci jalového výkonu pro snížení ztrát v síti.

Seznam symbolů a zkratk

<i>ES</i>	Elektrizační síť
<i>ENTSO – E</i>	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav
<i>PS</i>	Přenosová síť
<i>DS</i>	Distribuční síť
<i>nn</i>	nízké napětí
<i>vn</i>	vysoké napětí
<i>vvn</i>	velmi vysoké napětí
<i>PPDS</i>	Pravidla provozování distribučních soustav
<i>ERÚ</i>	Energetický regulační úřad
<i>OZE</i>	obnovitelné zdroje elektrické energie
<i>FVE</i>	fotovoltaická elektrárna
<i>P</i>	činný výkon (W)
<i>Q</i>	jalový výkon (VAr)
<i>S</i>	zdánlivý výkon (VA)
$\cos \varphi$	účinník (-)
<i>U</i>	elektrické napětí (V)
<i>I</i>	elektrický proud (A)
<i>f</i>	frekvence (Hz)
U_k	napětí nakrátko (%)
X_C	kapacitní reaktance (Ω)
X_L	induktivní reaktance (Ω)

Elektrizační soustava

Elektrizační soustava (ES) je centrálně řízený systém obsahující paralelně pracující různé zdroje elektrické energie, elektrické přenosové a rozvodné zařízení, starající se o dodávku elektrické energie a v poslední řadě elektrické spotřebiče se společnou výkonovou rezervou. Hlavním úkolem ES je spolehlivá dodávka dostatečného množství elektrické energie všem odběratelům v dohodnuté kvalitě, s minimálními náklady. Princip fungování ES se zakládá na pravidlu neskladovatelnosti elektrické energie v elektrickém vedení. To znamená, že se energie v soustavě musí ihned spotřebovávat. Dojde-li k poklesu spotřeby elektrické energie z důvodu nižší poptávky u spotřebitele, musí se omezit výroba elektrické energie (snížením využití výrobního bloku elektrické energie). Z toho vyplývá, že výroba i spotřeba elektrické energie se musí udržovat v bilanční rovnováze. Tyto změny zatížení sítě mají za následek změny velikosti napětí a frekvence v ES. Centrálně řízený systémem, se má namysli udržení jmenovitého kmitočtu a jmenovitého napětí v přípustných mezích, které stanovují normy. Hodnota napětí se může lišit od jmenovité hodnoty sítě, pro napětí do 220kV maximálně o 10% a pro 400kV je rozsah $\pm 5\%$. Jmenovitá hodnota frekvence sítě je 50 Hz, která má stanovenou mezní odchylku $\pm 1\%$. [1][2]



Obr. 1.1 – Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy [4]

1.1 Rozdělení Elektrizační soustavy

Elektrizační soustavu můžeme rozdělit na přenosovou soustavu a distribuční (rozvodnou) soustavu. Základním rozdílem mezi přenosovou a distribuční soustavou je kromě velikosti napěťových hladin, také způsob propojení sítě. V přenosové soustavě se jedná o propojenou síť, kde se jednotlivé prvky vzájemně ovlivňují. Při výpadku jednoho či více vedení a transformátorů převezmou jejich zátěž ostatní prvky sítě, které zůstaly v provozu. Distribuční soustava je tvořena jednotlivými vzájemně neovlivňujícími oblastmi, které jsou napájeny z přenosové soustavy jedním nebo více paralelně zapojenými transformátory. Distribuční soustava spíše ovlivňuje přenosovou soustavu svým odebíraným nebo dodávaným výkonem (např. při nadbytku výroby).

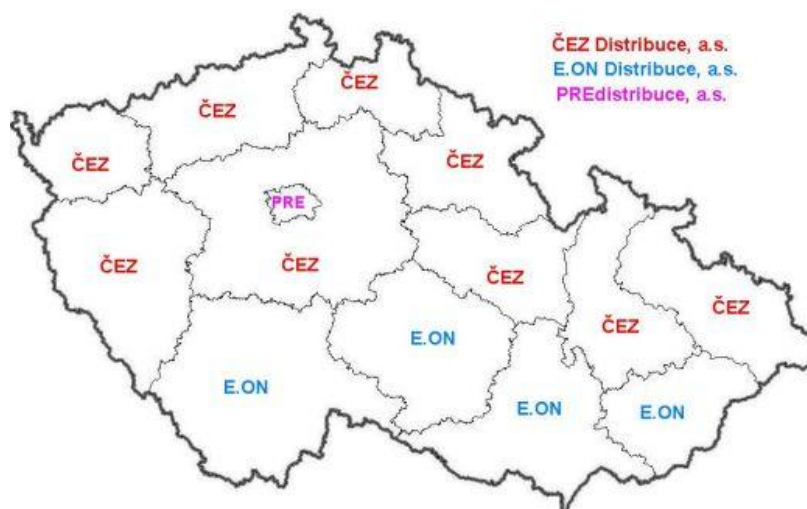
1.1.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava zajišťuje přenášení velkých výkonů na velké vzdálenosti ze zdrojů elektrické energie, přes transformátory, do distribuční sítě. Na území České republiky provozuje a řídí přenosovou soustavu společnost ČEPS, a.s. Dále zajišťuje mezinárodní spolupráci propojováním elektrizačních sítí se sousedními zeměmi. Tato síť se nazývá Evropská síť provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E), kterou tvoří 36 zemí napříč Evropou. Výhodou vzájemného propojení jednotlivých ES je zvýšení kvality dodávané elektrické energie a zmenšení potřebného rezervního výkonu, které by bylo potřeba udržovat v samostatně pracující ES. Normalizované jmenovité napětí v přenosových soustavách je dimenzováno od 110 kV až po 400 kV o jmenovitém kmitočtu 50 Hz. Přenosovou soustavu České republiky podle věštníku Energetického regulačního úřadu v roce 2016 tvoří 3724 km vedení o napěťové hladině 400 kV, 1 909 km vedení 220 kV a 84km vedení 110 kV. [3]

1.1.2 Distribuční soustava

Distribuční soustava zajišťuje rozvod elektrické energie z přenosové soustavy až k samostatným spotřebitelům. V České republice se o řízení distribuční soustavy starají celkem tři společnosti. Mezi provozovatele zajišťující chod distribuční soustavy v České republice patří společnost PRE Distribuce, a.s. starající se o distribuční soustavu na území Hlavního města Prahy. O distribuční soustavu Jihočeského a Jihomoravského kraje se stará společnost E.ON Distribuce, a.s. a zbytek ČR spadá pod správu společnosti ČEZ Distribuce, a.s., jak je znázorněno na obrázku 1.2. Distribuční soustava oproti soustavě přenosové přenáší výkony na menší vzdálenosti a umožňuje i připojení elektrárny dosahujících menších výkonů. Distribuční

sítě je složena ze sítí pracujících na hladině velmi vysokého napětí (110 kV) až po sítě pracující na hladině nízkého napětí. [3]



Obr. 1.2 – Zastoupení provozovatelů distribuční soustavy [5]

Zdroje v distribuční soustavě

Veškeré zdroje, které jsou připojeny a řízeny v distribuční soustavě, se musí řídit podle Pravidel provozování distribuční soustavy, zkráceně PPDS. Tyto pravidla navazující na Pravidla provozování přenosové soustavy tak, aby společně zajistily spolehlivý provoz elektrizační soustavy a dodávky elektřiny v potřebné kvalitě až ke spotřebiteli. Každý jednotlivý energetický subjekt podnikající v distribuci elektrické energie je povinen v České republice pravidla vypracovat a následně nechat schválit Energetickým regulačním úřadem (ERÚ). Provozovatel distribuční soustavy v PPDS musí uvést území vymezené konkrétní licencí na distribuci elektřiny na základě Energetického zákona 458/2000 Sb. a výpis provozované napěťové hladiny distribuční soustavy, jakých se konkrétní pravidla týkají. Jednou z podmínek, které stanovují výše zmíněná pravidla, je povinnost provozovatele distribuční soustavy připojit a umožnit distribuci elektřiny v distribuční soustavě každému, kdo o to požádá a splňuje podmínky stanovené prováděcím právním předpisem a podmínky stanovené v dané PPDS. [6]

Hlavní body pravidel:

- stanovování minimální technických, plánovacích, provozních a informačních požadavků pro připojení uživatelů k distribuční soustavě
- poskytování informací bez nutnosti pracovat s mnoha souvisejícími právními, technickými a dalšími podklady
- stanovování základních pravidel, zajišťujících spolupráci a koordinaci mezi jednotlivými účastníky trhu s elektřinou [6]

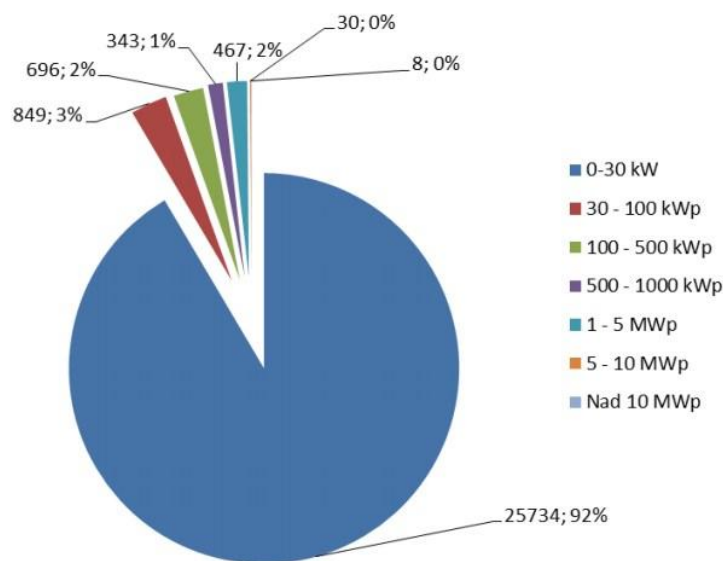
1.2 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele DS

Jedná se o rozšíření PPDS (příloha č. 4) používané jako podklad při projektování a pomůcka při rozhodování provozovatele distribuční soustavy i výrobce elektřiny a provozovatele lokálních distribučních soustav s vnořenými zdroji. Obsahují pravidla pro plánování, zřizování, provoz a úpravy zdrojů elektrické energie připojených do sítí nn, vn nebo 110 kV provozovatele distribuční soustavy. Takovými zdroji elektrické energie jsou solární, větrné, vodní, geotermální elektrárny a také generátory poháněné tepelnými stroji, mezi které patří např. blokové teplárny nebo spalování biomasy a bioplynu. Při zřizování vlastní výroby je zapotřebí dbát na platná nařízení a předpisy, aby bylo vyloučeno rušivé zpětné působení na síť nebo zařízení dalších odběratelů. Zdroje elektrické energie připojené do sítě musí být

schopny, při stálém provozu, udržet frekvenci v přípojném bodě v mezích 49 Hz až 51 Hz. Rozsah trvalého napětí v přípojném bodě se liší podle napěťové hladiny sítě, ke které je daná výrobní připojena. Pro výrobní připojené do sítě nn je stanovený rozsah napětí -15% až +10% od jmenovité hodnoty napětí U_n a pro výrobní připojené k síti vn a 110 kV je rozsah napětí stanoven na -10% až +10% od U_n .

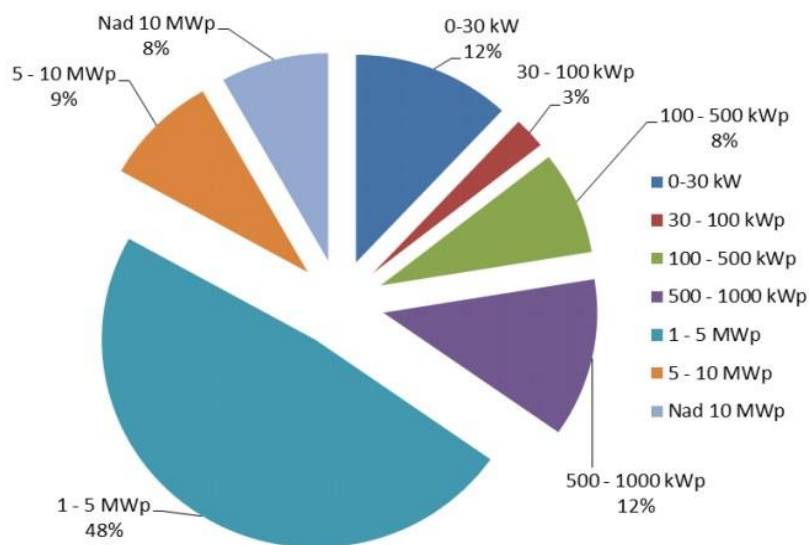
1.3 Vývoj připojování Obnovitelných zdrojů v ČR

Než začnu rozebírat aktuální stav připojování obnovitelných zdrojů, dále OZE, je třeba se podívat do roku 2001. V tomto roce byla přijata Směrnice 2001/77/EC Evropské unie v rámci své energetické politiky o podpoře výroby elektřiny z OZE, kde byl stanoven pro Českou republiku indikativní cíl podílu OZE v roce 2010 na úroveň 8% z hrubé konečné spotřeby elektřiny. Tento cíl byl v roce 2010 splněn (konkrétně 8,3%) a to hlavně díky neadekvátně nastavené podpoře OZE, která vyústila v masový nárůst instalací fotovoltaických elektráren (FVE) v letech 2009-2011. V následujících letech 2011-2013 došlo k zlepšení dílčího podílu OZE v ČR při bioplynovém „boomu“, hlavně díky bioplynovým stanicím (BPS), které najely do plného provozu v roce 2012, přibližně 112MW. Vzhledem k ukončení podpory pro BPS od roku 2014 nelze počítat s růstem instalací využívající bioplyn či biomasu. Dle statistiky ERÚ o vydaných a platných licencích je v ČR 28194 licencovaných FVE o celkovém instalovaném výkonu 2113,83 MWp. [8]



Obr. 2.1 – Podíl jednotlivých kategorií FVE dle počtu instalací v ČR [8]

Největší podíl na aktuálním počtu licencovaných instalací připadá malým instalacím do 30 kW, a to z cca 92% (25 734 instalací), nicméně tyto instalace představují pouze 12% z instalovaného výkonu FVE, znázorněno na obrázku 2.1. Pokud se podíváme na problematiku připojení FVE z hlediska instalovaného výkonu, jak ukazuje obrázek 2.2, zjistíme velkou disproporci mezi instalovaným výkonem a počtem instalací FVE podle jednotlivých výkonových kategorií. Nejvyšší podíl na instalovaném výkonu, přibližně 48%, zastupují FVE o výkonu 1-5 MWp.



Obr. 2.2 – Podíl jednotlivých kategorií FVE dle výkonu v ČR [8]

Celkem mají FVE s výkonem nad 30 kWp dominantní podíl 88%. Kdežto instalace FVE menších výkonů (do 30 kWp), odpovídající převážně o střešním systémům na rodinných domech a ve veřejném sektoru, mají podíl pouhých 12% instalovaného výkonu, to odpovídá cca 254 MW. Při „fotovoltaickém boomu“, v letech 2009-2011, přispěl segment trhu FVE menších výkonů jen nepatrným způsobem. V letech 2013 se sice počet instalovaných elektráren zdvojnásobil, ale navýšil instalovaný výkon pouze o 8,5%. V rámci Evropské unie je poměr výkonů malých a velkých zdrojů přibližně rovnocenný, což ukazuje na prozatím nevyužitý potenciál střešních FVE v ČR.[8]

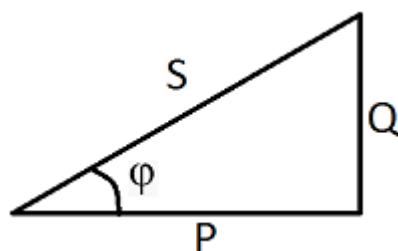
Výkony a jejich řízení v rámci PPDS

1.4 Činný a jalový výkon

Výkon činný i jalový se přenáší na všech úrovních střídavých elektrizačních soustavách. Optimalizace toků těchto výkonů je důležitá z hlediska efektivity provozu elektrizačních soustav a maximálního využití přenosových vedení. Činným výkonem nazýváme elektrickou energii přenášenou sítí, která vykonává práci. Nebo-li dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou (např. el. motor) nebo tepelnou energii (např. tepelný spotřebič). Určitá část činného výkonu je spotřebována na pokrytí ztrát průchodem proudu vodiče. Činný výkon značíme P a jeho jednotkou je Watt (W) a vypočte se podle vztahu (3.1).

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (W; \Omega, A, V, -) \quad (0.1)$$

Úhel φ je úhel mezi fázorem napětí a fázorem proudu. Poměr mezi činným a jalovým výkonem přenášeným od zdroje ke spotřebiči nám udává $\cos \varphi$, který se nazývá účinník. Při účinníku rovnu 1 se přenáší pouze činný výkon, takový spotřebič nazýváme odporovou zátěží. Dále rozlišujeme induktivní a kapacitní charakter zátěže. U induktivního charakteru zátěže fázor proudu zaostává za fázorem napětí a u kapacitního charakteru zátěže fázor proudu předbíhá fázor napětí.



Obr. 3.1 – Trojúhelník výkonů

Účinník je bezrozměrná veličina a vypočte se jako poměr mezi činným výkonem (P) a zdánlivým výkonem (S), podle vztahu (3.2).

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (-; W, VA) \quad (0.2)$$

Jalový výkon se v síti nespotřebovává, ale přelévá mezi jednotlivými prvky sítě. Tento výkon je potřebný pro vytvoření elektrických a magnetických polí jak v spotřebiči, tak i v síti. Kondenzátory využívají tuto energii k vytváření elektrického pole a cívky k vytváření pole magnetického. Vzájemná výměna energie, změna elektrického a magnetického pole, je zapříčiněna vlivem působení sinusového průběhu v ES. Jalový výkon nekoná práci, ale stejně jako činný výkon, přispívá ke ztrátám elektrické energie ve vodičích. Mimo to jalový výkon zaujímá část přenosové kapacity vedení a omezuje tím velikost možného přenášeného činného výkonu. Proto je ve všeobecném zájmu jalové výkony kompenzovat přímo u spotřebiče a tím se vyhnout přenášení jalového výkonu na větší vzdálenosti v ES. Jalový výkon značíme Q a jeho jednotkou je Voltampér reaktanční (VAr).

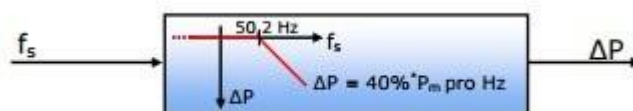
$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{VAr}; V, A, -) \quad (0.3)$$

1.5 Řízení činného výkonu v rámci PPDS

Příloha č. 4 k PPDS nařizuje, aby všechny výrobní elektrické energie připojené do distribuční soustavy, byly schopné snižovat činný výkon automaticky v závislosti na kmitočtu v síti, podle poměrů v síti i podle povelů z řídicího dispečinku provozovatele distribuční sítě nebo se automaticky odpojit od distribuční sítě.

1.5.1 Snižování činného výkonu při nadfrekvenci

Zdroje elektrické energie připojené do distribuční sítě, které se při nadfrekvenci, kmitočtu větším než 50,2 Hz, musí snižovat okamžitý činný výkon gradientem 40% na Hz. Znázorněno na obr. 3.2.



Obr. 3.2 – Snižování činného výkonu při nadfrekvenci [7]

$$\Delta P = 20P_m \cdot \frac{50,2 \text{ Hz} - f_s}{50 \text{ Hz}} \quad (0.4)$$

ΔP – snížený výkon (W)

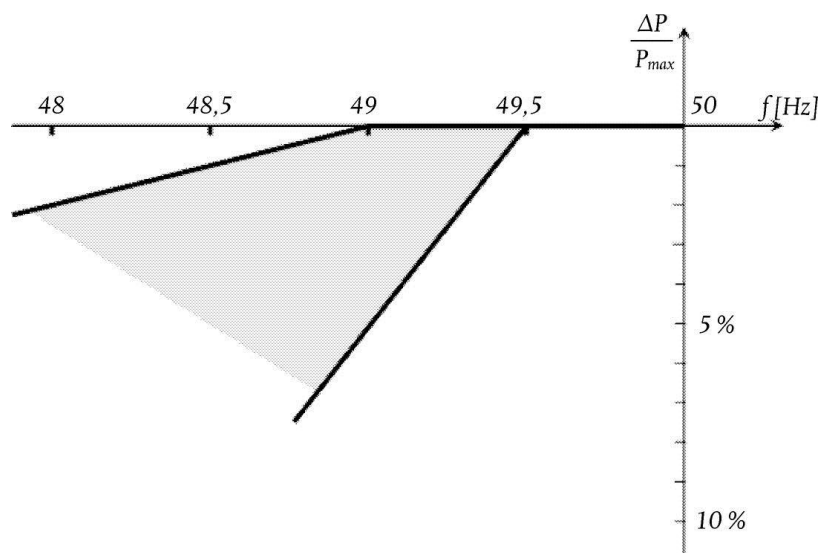
P_m - okamžitý dostupný výkon (W)

f_s - frekvence sítě (Hz)

Pokud se frekvence sítě pohybuje v rozsahu $47,5 \text{ Hz} < f_s < 50,2 \text{ Hz}$ nedochází k omezení. V Případě, že frekvence sítě bude v rozsahu $f_s \leq 47,5 \text{ Hz}$ nebo $f_s \leq 51,5 \text{ Hz}$ musí dojít k odpojení od sítě.

1.5.2 Snížení činného výkonu při podfrekvenci

Jedná se o snížení činného výkonu z maximální hodnoty se snižující se frekvencí v mezích daných provozovatelem přenosové soustavy. Obrázek 3.3 znázorňuje rozsah definovaný provozovatelem přenosové soustavy je mezi plnými čarami.



Obr. 3.3 – Snížení činného výkonu s klesajícím kmitočtem [7]

1.5.3 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Zdroje elektrické energie připojené do distribuční sítě musí být provozu schopné se sníženým činným výkonem. Změnu činného výkonu může provozovatel distribuční sítě uskutečnit v následujících stavech sítě:

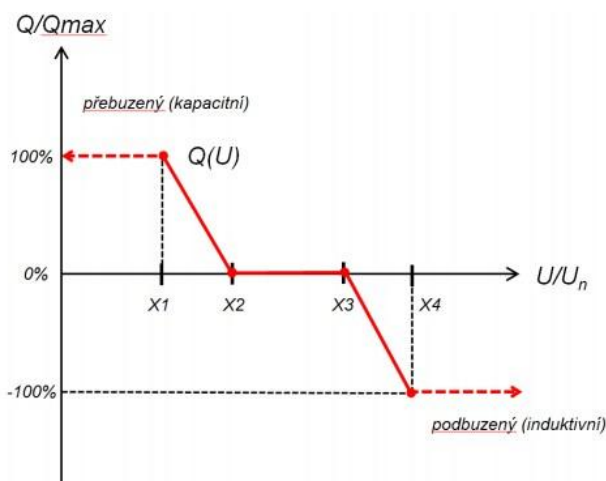
- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému (např. při předcházení stavu nouze a při stavech nouze)
- nutné provozní práce popř. nebezpečí přetížení v distribuční síti

- nebezpečí vzniku ostrovního provozu
- ohrožení statické nebo dynamické stability
- vzrůst frekvence ohrožující systém
- údržba nebo provádění stavebních prací [7]

Ve výše zmíněných stavech sítě má provozovatel distribuční sítě právo vyžadovat omezení dodávaného činného výkonu nebo přímo odpojení zařízení. Avšak nezasahuje do samotného řízení výroby elektrické energie, nýbrž zadává pouze požadovanou hodnotu. Snížení dodávaného výkonu v přípojním bodě sítě na provozovatelem požadovanou hodnotu musí být provedeno neprodleně, maximálně v průběhu jedné minuty např. u fotovoltaické elektrárny 60, 30 a 0 % instalovaného výkonu. Přitom musí být technicky možné, bez automatického odpojení celé výroby od sítě, snížit až na hodnotu 0 %. Při omezení činného výkonu vzrůstem frekvence může být činný výkon opět zvyšován teprve po návratu frekvence na hodnotu $f \leq 50,2$ Hz. [7]

1.6 Řízení Jalového výkonu v rámci PPDS

Všeobecně způsob řízení jalového výkonu se liší vždy podle místa umístění výroby v distribuční soustavě a určuje ho vždy provozovatel distribuční sítě po konzultaci s výrobcem. Na způsoby řízení jalového výkonu se zaměřím v další kapitole. Nastavené charakteristické křivky podle obr. 3.4 provede provozovatel distribuční sítě podle místních síťových podmínek, ev. studie připojitelnosti. Dynamika řízení funkce $Q(U)$ musí odpovídat filtru prvního řádu s časovou konstantou. Konstanta je nastavitelná v rozmezí od 3 s do 60 s. Doba potřebná k dosažení 95% nové žádané hodnoty v důsledku změny v napětí bude trojnásobek časové konstanty. [7]



Obr. 3.4 – Charakteristika funkce $Q(U)$ [7]

1.6.1 Zdroje v sítích vn a 110 kV

Zdroje připojené do sítí vn a vvn musí být schopny při dodávce činného výkonu do DS udržovat účinník v předávacím místě mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní ve stanoveném rozsahu napětí za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 10 % jmenovitého proudu (transformátoru proudu) předávacího místa.

1.6.2 Způsoby řízení jalového výkonu

Jako další bod, který pravidla specifikují je nastavený jalového výkonu ve výrobnách elektrické energie. Výrobní s instalovaným výkonem větším než 100 kVA musí mít jalový výkon říditelný. Pokud výrobní dodává činný výkon, je nastavení jalového výkonu zadáváno provozovatelem distribuční sítě buď pevnou hodnotou, nebo když to provoz sítě vyžaduje dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou.

Žádaná hodnota je buď:

- Pevná hodnota jalového výkonu Q
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí $Q(U)$
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu $Q(P)$
- Pevná hodnota účinníku $\cos \varphi$
- Hodnota účinníku závislá na napětí $\cos \varphi(U)$
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu $\cos \varphi(P)$
- Zadaná hodnota napětí[7]

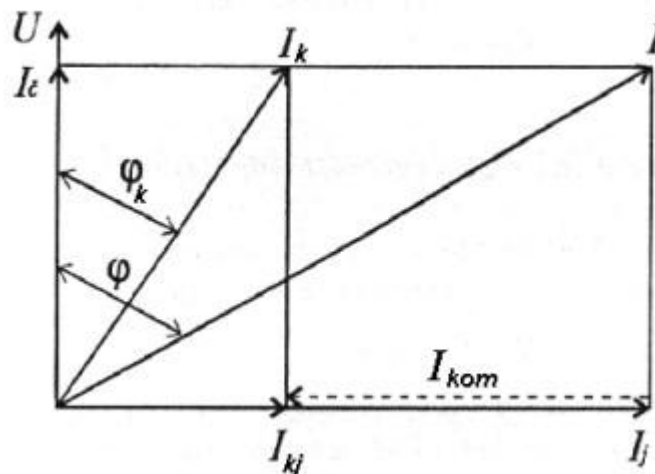
Dále u kompenzačního zařízení zdrojů je zapotřebí přihlížet ke způsobu provozu vlastní výrobní a z toho vyplývajících zpětných vlivů na síťové napětí. S provozovatelem distribuční sítě je zapotřebí odsouhlasit výkon, zapojení a způsob regulace kompenzačního zařízení, případně i hrazení harmonických nebo frekvence hromadného dálkového ovládání (HDO) vhodnými indukčnostmi.

Řízení jalového výkonu v síti

Většina spotřebičů elektrické energie vyžaduje pro svou funkci magnetické pole. K vytváření tohoto pole je potřeba právě jalový výkon, jak popisují v kapitole 3.1. To znamená, že spotřebič připojený k síti odebírá zároveň činný a jalový proud. Proto je třeba si uvědomit, že vedení je zatěžováno a musí se dimenzovat na průchod zároveň činné a jalové složky proudu, jak znázorňuje vztah (4.1).

$$I = \sqrt{I_{\xi}^2 + I_j^2} \quad (A; A) \quad (0.1)$$

Díky nenulovému odporu elektrického vedení vzniká průchodem jalového proudu ve vedení úbytek napětí a činné ztráty na výkonu, které jsou úměrné druhé mocnině proudu (viz. obr. 4.1).



Obr. 4.1 – Kompenzace jalového výkonu [9]

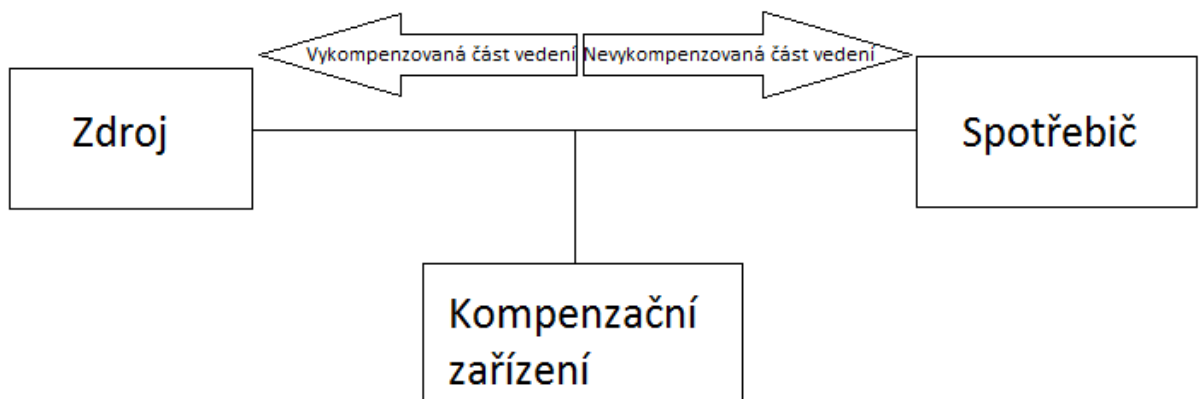
Výkonové ztráty lze vyjádřit pro třífázové vedení vztahem:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot (I_{\xi}^2 + I_j^2) \quad (W; \Omega, A) \quad (0.2)$$

Úbytek napětí na elektrickém vedení vyjádříme:

$$\Delta U = R \cdot I_{\xi}^2 + X \cdot I_j^2 \quad (V; \Omega, A) \quad (0.3)$$

Z výše uvedených vztahů si můžeme všimnout, že na činném výkonu se podílí pouze činná složka proudu, ale na ztrátách na elektrickém vedení se podílí i jalová složka proudu. Proto je ve všeobecném zájmu vyrábět jalový proud (výkon) z jiného zdroje než z generátoru v elektrárně, čímž se výrazně sníží zdánlivý proud a není zbytečně zatěžována elektrizační soustava při přenosu elektrické energie. Toto snížení jalového proudu v distribučních sítích se nazývá kompenzace jalového výkonu. Ke kompenzaci se nejčastěji používají statické kondenzátory. Tyto kondenzátory se umísťují co nejbližší k zařízení, které chceme kompenzovat, aby byla odlehčena co největší část elektrického vedení, protože kompenzace se bude týkat jen části mezi kompenzačním zařízením a zdrojem elektrické energie. S pohledu kompenzace elektrického vedení, mohou nastat tři stavy.



Obr. 4.2 Vliv kompenzace na síť

První stav je, když vedení není kompenzováno a jalový výkon se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Druhý stav se nazývá částečně kompenzované vedení, kdy se pouze sníží velikost jalové energie přenášené vedením a mezi kompenzačním zařízením a zdrojem se stále určitá část jalové energie předává. Poslední stav je kompenzované vedení, při kterém dochází k úplné kompenzaci jalové energie, která se přenáší pouze mezi kompenzačním zařízením a zdrojem.

1.7 Základní dělení kompenzace

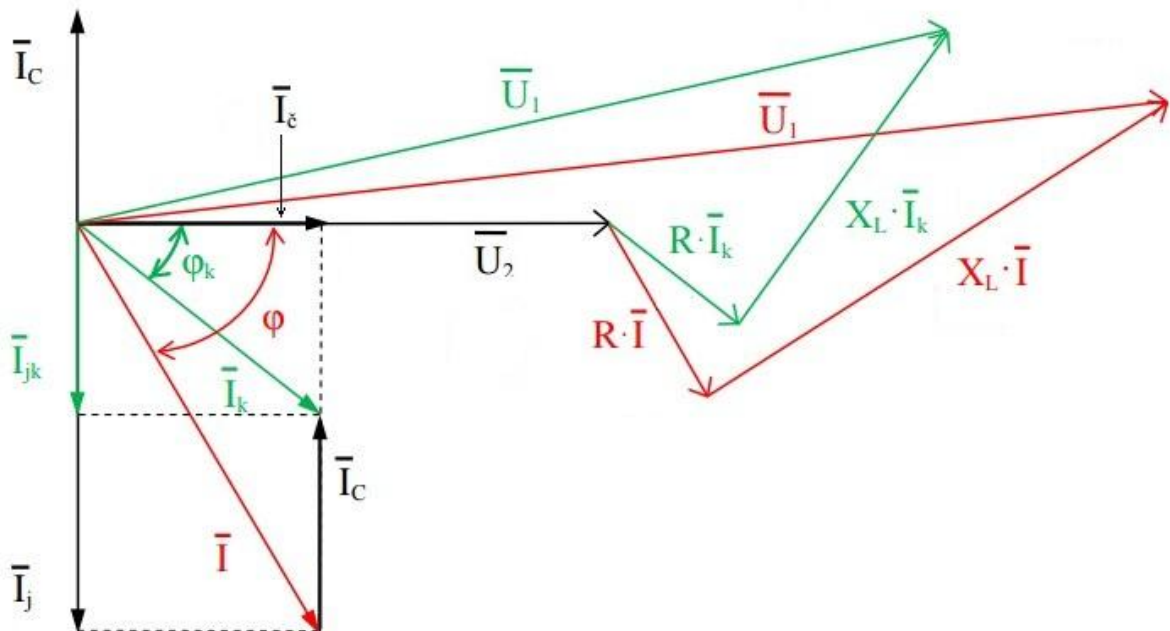
Kompenzaci můžeme rozdělit na dva základní druhy, podle způsobu zapojení kompenzačního zařízení (sériově nebo paralelně). Ke kompenzaci jalového výkonu, která nás zajímá, se však vztahuje pouze jedna z nich. Sériovou kompenzací dochází ke zlepšení napěťových poměrů a paralelní kompenzací zlepšujeme výkonové poměry.

1.7.1 Sériová kompenzace

Tato kompenzace se používá ke zlepšení přenosu elektrické energie ve vedení. Princip spočívá v sériovém připojení kompenzačního kondenzátoru na začátek vedení nebo nejdéle do 2/3 jeho délky. Tímto připojením dojde ke zmenšení indukční reaktance vedení a vlivem kapacitní reaktance kondenzátoru. Kondenzátor dimenzuje na celkový proud procházející vedením. Dále se touto kompenzací nebudeme zabývat.

1.7.2 Paralelní kompenzace

Paralelní připojení kompenzačního zařízení ke zdroji elektrické energie slouží ke kompenzaci jalového výkonu. Na obrázku 4.3 je znázorněn fázorový diagram kompenzace jalového proudu (výkonu).



Obr. 4.3 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Červeně znázorněná část fázorového diagramu značí celkový proud a napětí bez použití kompenzace a zelená část fázorového diagramu ukazuje změnu těchto veličin, pouze v místě mezi kompenzačním zařízením a zdrojem, při provedení kompenzace. V případě paralelního připojení kompenzačního zařízení se sníží jalová složka proudu I_j na hodnotu I_{jk} vlivem kapacitního proudu kompenzačního zařízení I_c . V kompenzované části vedení dojde ke snížení celkového zdánlivého proudu I na hodnotu I_k . Díky čemuž dojde ke změně účinnosti podle vztahu (4.4). [9]

$$I_k = I \cdot \frac{\cos(\varphi)}{\cos(\varphi_k)} \quad (A; A, -) \quad (0.4)$$

Poměr jalového proudu před provedením kompenzace a po provedení kompenzace se nazývá stupeň kompenzace (k_p). V případě, kdy je stupeň kompenzace roven nule, říkáme, že je vedení zcela vykompenzováno.

$$k_p = \frac{I_{jk}}{I_j} \quad (-; A) \quad (0.5)$$

1.8 Umístění kompenzačních zařízení

Zvolením umístění kompenzačního zařízení je důležitou částí při návrhu daného kompenzačního zařízení. Pozice kompenzačního zařízení je určujícím faktorem, jak při jeho samotném dimenzování, tak i při dimenzování elektrického vedení. Následné vysvětlení umístění kompenzačních zařízení a obrázky uvedené v podkapitolách znázorním na spotřebičích v průmyslových sítích.

1.8.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

V případě jednotlivé kompenzace se kompenzační zařízení připojí přímo na svorky kompenzovaného zařízení, nebo pokud je to možné co nejbližší. Kompenzace se připojuje se zapnutím kompenzované zařízení. Použitím jednotlivé kompenzace je kompenzována celá elektrizační síť mezi zdrojem elektrické energie a spotřebičem. Využití této metody kompenzace se používá pro asynchronní motory nebo transformátorů s vysokým časovým využitím. [9]

Výhody:

- odlehčení vedení až ke spotřebiči, zmenšením výkonových ztrát a úbytku napětí
- z důvodu navržení výkonu kompenzačního zařízení podle výkonu spotřebiče není potřeba regulace jalového výkonu
- jednodušší a provozně spolehlivější než ostatní způsoby kompenzace

Nevýhody:

- vyšší náklady na kompenzaci, zejména při používání spotřebičů s nižším využitím, hlavně díky velkému množství kompenzačních zařízení
- s větším počtem kompenzačních zařízení roste i prostorová náročnost této metody
- možnost překompenzování u spotřebičů s měnícím se zatížením [9]

1.8.2 Skupinová kompenzace

Kompenzační zařízení se připojuje na přípojnice skupinového rozváděče, který napájí několik spotřebičů. Touto metodou se kompenzace vztahuje na vedení mezi rozvaděčem a spotřebičem. Používá se hlavně u spotřebičů, které jsou provozovány krátkodobě nebo v určitém časovém intervalu. Kompenzační zařízení se dimenzuje na kompenzaci soudobého odebíraného výkonu. Využití této metody se praktikuje nejčastěji v síti nn.

Výhody:

- zlepšení využití kompenzačních zařízení a snížení jejich počtu, což má za následek menší prostorovou náročnost než u individuální metody kompenzace
- odlehčení elektrického vedení od vstupní rozvodny ke skupinovému rozváděči

Nevýhody:

- elektrické vedení od skupinového rozváděče ke spotřebiči není kompenzováno
- potřeba automatické regulace jalového výkonu [9]

1.8.3 Ústřední (centrální) kompenzace

U této metody se kompenzační zařízení připojuje přímo k hlavnímu rozvaděči, díky čemuž se kompenzuje jalový výkon už od připojení k síti. Stejně jako u skupinové kompenzace i zde se musí použít automatická regulace dodávaného kompenzačního výkonu. Tato metoda bývá častým řešením pro menší průmyslové podniky.

Výhody:

- nepotřebuje se velký kompenzační výkon

Nevýhody:

- nutnost rozváděče vybaveného automatickou regulací
- řešení probíhá většinou na straně vyššího napětí, tudíž rozvod uvnitř průmyslového podniku není vykompenzován [9]

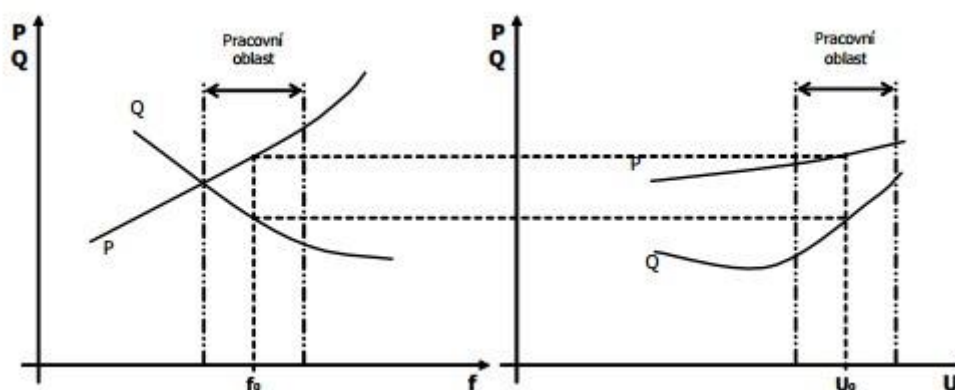
1.8.4 Smíšená kompenzace

Jedná se o nejčastější řešení kompenzace účinníku v průmyslových podnicích. Navrzení v průmyslovém podniku může vypadat následovně. U velkých motorů s velkou dobou využití se používá jednotlivá kompenzace, u skupin malých motorů s kratší dobou využití se použije

skupinová kompenzace a v hlavní transformovně se kompenzace provádí na požadovanou hodnotu účinníku centrální kondenzátorovou baterií. Většinou se navrhne více variant kompenzace z technického i ekonomického hlediska. [9]

1.9 Regulace napětí řízením jalového výkonu v ČR

V elektrizační soustavě je velmi silná vazba mezi jalovým výkonem a napětím, které mají lokální charakter. Jak znázorňuje obrázek 4.3, kde je patrný rozdíl velikosti změny P a Q v závislosti na změně napětí. Činný výkon se mění jen nepatrně, kdežto jalový výkon vykazuje patrné změny ve velikosti.



Obr. 4.4 Statická charakteristika zátěže

Lokální charakter znamená, že napětí může být v jednotlivých místech ES různé na rozdíl od frekvence, která je v celé síti stejná, má globální charakter. Proto je tedy možné provádět regulaci napětí centralizovaně pro celou ES, tak i decentralizovaně pro konkrétní místo v síti. Hladinu napětí v určitém místě ES můžeme měnit právě změnou hodnoty jalového výkonu. Této změny jalového výkonu v určité části ES lze dosáhnout buď na straně odběru (kompenzací) nebo přímo na straně dodávky změnou jalového výkonu u zdroje. Bohužel se změnou napětí v uzlu ES se změní napětí i v blízkých uzlech soustavy. Z toho vyplývá, že změna napětí závisí jednak na velikosti změny jalového výkonu, tak i na aktuálním zapojení daného uzlu. Pro vyjádření množství jalového výkonu potřebného ke změně napětí o 1kV nám slouží parametr elektrické tvrdosti uzlu (K_Q). Z tohoto důvodu se v ES určují pilotní uzly neboli rozvodny, kde jsou technické prostředky použitelné pro regulaci napětí, v podobě generátorů nebo transformátorů. Dále se označuje, které generátory nebo transformátory budou pracovat

jako akční člen měnící hodnotu napětí v soustavě prostřednictvím změny dodávky jalového výkonu. Proto prakticky soustava není schopna dlouhodobě změnit velikost napětí v pilotním uzlu, neboť při změně toků jalového výkonu do uzlu je možné rychle a přesně vyrovnávat bilanci Q změnou dodávky Q připojených akčních členů a tím eliminovat vzniklé napěťové odchylky od zadané hodnoty. V České republice je pro řízení napětí aplikovaná třístupňová hierarchie.

Třístupňovou hierarchii dělíme na:

- terciární regulace napětí – na úrovni celé regulované soustavy
- sekundární regulace napětí – na úrovni jednoho uzlu soustavy
- primární regulace napětí – na úrovni jednoho bloku výroby

1.9.1 Terciální regulace napětí

První stupeň hierarchie je terciální regulace, která koordinuje toky jalových výkonů a velikosti napětí v pilotních uzlech pro bezpečný a ekonomický provoz elektrizační soustavy jako celku. Hlavním kritériem je minimalizace technických ztrát v soustavě řízením Q a U v reálném čase. Samozřejmostí je automatizace prováděné regulace, jelikož dispečer není schopen v reálném čase určovat zadaná napětí v pilotních uzlech a optimalizovat koordinaci regulačních prostředků. O vše se stará optimalizační program, který je součástí souboru vyšších dispečerských funkcí (VFDŘ). Proto pro regulaci v pilotních uzlech jsou stanoveny podmínky, které jsou při nastavování programu terciální regulaci respektovány:

- minimální a maximální hodnoty napětí v uzlech soustavy (technická omezení)
- aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu pro jednotlivé pilotní uzly
- toky jalového výkonu např. přes hraniční vedení v případě přenosové soustavy nebo přes transformátory PS/110kV v případě distribuční soustavy 110kV atd.
- další omezovací podmínky podle konkrétních místních podmínek

Program provádí výpočet chodu sítě, kterým se určují jednotlivá napětí v uzlech, výkony a proudy ve větvích ES. Jako vstupní data se musí zadat konfigurace ES, parametry jednotlivých vedení, činné a jalové odebírané výkony a velikost napětí v bilančním uzlu (pilotním). Přesto je nutné provádět estimaci – odhad stavu sítě.[11]

1.9.2 Sekundární regulace napětí

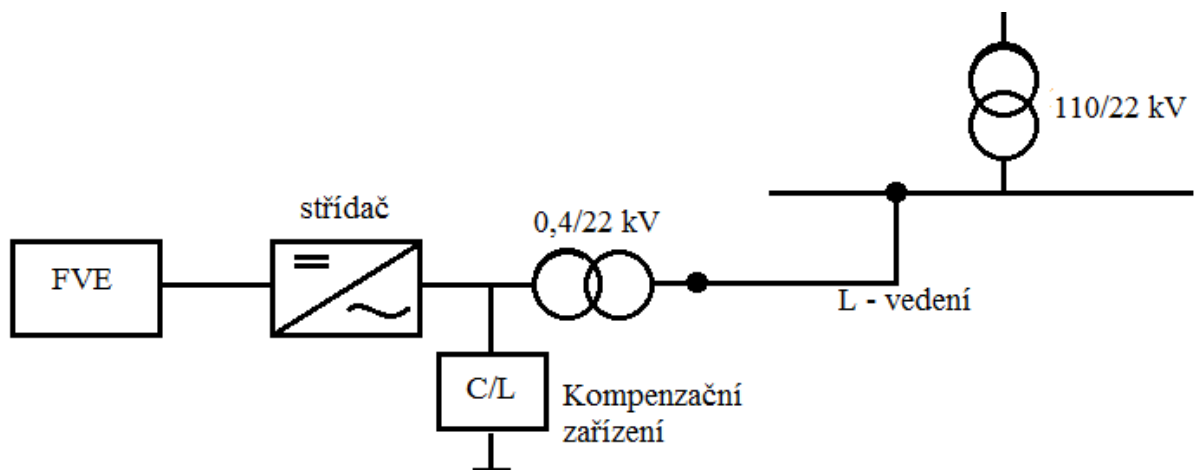
Pod pojmem sekundární regulace si můžeme představit technologický proces obnovující rovnováhu spotřeby a výroby jalového výkonu v pilotním uzlu právě na úrovni požadovaného napětí v konkrétním sledovaném místě. Výsledná doba regulace nesmí být větší než 120 s. Sekundární regulace se skládá z Automatické regulace napětí (ARN), Skupinové regulace napětí (SRU), Sekundární regulace jalového výkonu (SRQ) a Regulátoru odboček transformátoru PS/110kV (PRN). V první řadě se vyhodnotí aktuální regulační odchylka a vypočte se celková změna jalového výkonu, která je nutná pro její eliminaci. Následně podle existující regulační rezervy provede rozdělení požadavku na jednotlivé SRU, které má pro regulaci v daném uzlu k dispozici. Dále SRU na elektrárně rozdělí svůj požadavek podle rezervy na jednotlivé SRQ generátorů. SRQ generátorů pak generují velikost impulsu na mechanismus změny zadané hodnoty napětí PRN, který změní velikost jalového výkonu. Tato změna se následně vrací zpět do soustavy.[11]

1.9.3 Primární regulace napětí

Úkolem primární regulace napětí je udržovat zadané svorkové napětí generátoru změnou buzení generátoru. Působí lokálně a přímo ovlivňuje stabilitu celého systému prostřednictvím nastavených mezí, které jsou dány maximálním proudem statoru, rotoru nebo mezí podbuzení. Jednotlivé budicí soustavy generátorů jsou různé podle typů generátorů a data uvedení generátorů do provozu. Blokované transformátory sloužící pro vyvedení výkonu do pilotních uzlů jsou v ES ČR většinou bez možnosti regulace odboček pod zatížením. Z toho důvodu působí z hlediska automatické regulace napětí pouze jako pasivní prvky s tím, že ovlivňují velikost použitelných regulačních rozsahů Q .

Řešení připojené FVE k distribuční síti

Po konzultaci s panem Ing. Františkem Žákem se v této kapitole bakalářské práce budu věnovat případu připojení FVE k distribuční síti. Zvolená FVE je připojená přes střídač do transformátoru 22/04 kV a poté 5 kilometrovým vedením k distribuční síti transformátoru 110/22 kV. V tomto konkrétním případě mám možnost pro kompenzaci výkonů, s ohledem na zvolený transformátor a typ vedení, připojením kompenzačního zařízení na hladině nízkého napětí. Výpočty a grafy jsem zpracoval v tabulkovém editoru MS Excel, který mi umožnil automatizovat výpočty. Na obrázku 5.1 jsem vypracoval blokové schéma řešeného případu.



Obr. 5.1 Blokové schéma FVE připojené do DS

1.10 Fotovoltaická elektrárna

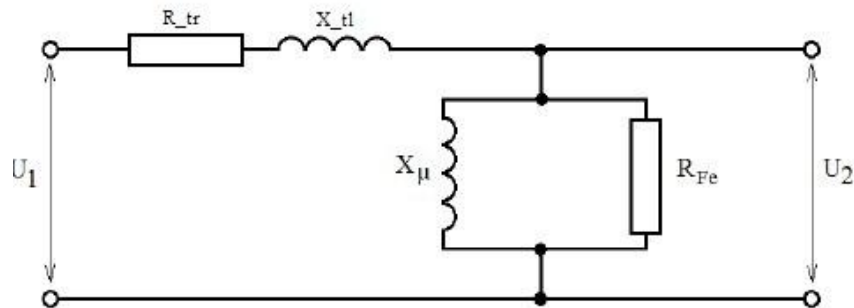
Je složena sério-paralelní kombinací fotovoltaických panelů. Výkon panelu se udává v jednotkách Watt peak (Wp). Jedná se o maximální hodnotu výkonu FVE za ideálních podmínek. Tedy při energetické hustotě záření 1000 W/m^2 , teplotě 25°C a světelném spektru odpovídajícím slunečnímu záření po průchodu bezoblačnou atmosférou Země. V mém případě budu řešit FVE o špičkovém výkonu 600 kWp. Zároveň beru v úvahu proměnný výkon FVE, který se mění v závislosti na oblačnosti nebo denní době. Maximální proud dodávaný do sítě pro zvolenou FVE je 833 A.

1.11 Střídač

Mění stejnosměrné napětí generované z FVE na střídavé napětí. Díky střídači lze z FVE vytvořit „řízený zdroj“. Ve zvoleném případě uvažuji připojený střídač s převažující kapacitní reaktancí. Z toho důvodu nahrazuji střídač v obvodu kondenzátorem o výkonu 12 kVAr.

1.12 Transformátor

Navzdory vysoké účinnosti je vzhledem k dlouhodobému využití transformátorů nějaká energie přeměněna na ztráty. Na obrázku 5.2 jsem vytvořil náhradní schéma transformátoru, který jsem následně použil při výpočtech. Paralelní obvod představuje magnetický obvod transformátoru, který spotřebuje část proudu na vytvoření magnetického pole X_{μ} a na pokrytí ztrát v železe R_{Fe} . V sériovém obvodu představuje R_{tr} odpor vinutí a X_{tl} rozptylovou reaktanci.



Obr. 5.2 Náhradní schéma transformátoru

Po dohodě s konzultantem jsem zvolil pro převod z 400V na 22kV olejový transformátor DOTEK 630H/20 od firmy Elpro-Energo s.r.o. Parametry transformátoru jsem uvedl v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Hlavní parametry transformátoru

Trafo DOTEK 630H/20	
S [kVA]	630
ΔP_0 [W]	600
ΔP_k [W]	6500
u_k [%]	4
i_k [%]	0,4

Převod transformátoru:

$$p_{tr} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{0,4}{22} = 0,01818 \text{ (-)} \quad (0.1)$$

1.13 Vedení

FVE je dále připojena 5 kilometrovým vedením složený z kabelů 22-AXEKVCEY společnosti NKT cables o průměru 240 mm^2 . Základní parametry uváděné výrobcem jsem sepsal v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Hlavní parametry kabelu vedení

22-AXEKVCEY	
L [km]	5
S [mm ²]	3x240
R _k [Ω/km]	0,125
l _k [mH/km]	0,57
C _k [μF/km]	0,3

Přepočty na délku vedení:

$$R_v = R_k \cdot L = 0,125 \cdot 5 = 0,625 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.2)$$

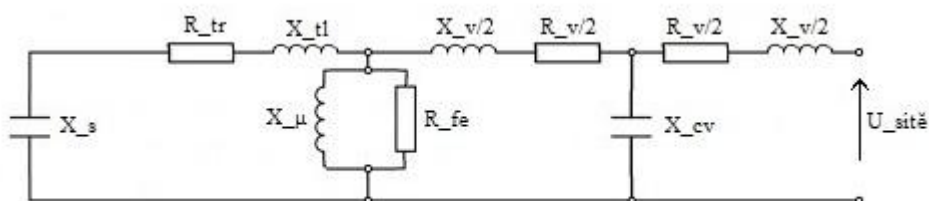
$$L_v = l_k \cdot L = 0,57 \cdot 5 = 2,85 \text{ (mH)} \quad (0.3)$$

$$C_v = C_k \cdot L = 0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ (}\mu\text{F)} \quad (0.4)$$

$$X_{lv} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_v = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot i = 0,9i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.5)$$

$$X_{cv} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot C_v} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot i} = -2123,14i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.6)$$

1.14 Odběr ze sítě



Obr. 5.3 Náhradní schéma ze sítě

Nejprve jsem vypočítal impedanci střídače X_s :

$$Z_a = X_s = \frac{U^2}{Q_s} = \frac{3 \cdot 230^2}{12000} = -13,225i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.7)$$

Dále jsem se přesunul k transformátoru, který jsem nahradil Γ -článkem. Zde jsem vypočetl celkovou podélnou impedanci obvodu, R_{tr} a X_{tl} :

$$R_{tr} = \Delta P_k \cdot \left(\frac{U_N^2}{S_N^2} \right) = 6500 \cdot \frac{400^2}{630000^2} = 0,00262 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.8)$$

$$X_{tl} = \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100}\right)^2 - R_{tr}^2} = \sqrt{\left(\frac{4}{100}\right)^2 - 0,00262^2} = 0,0399i (\Omega) \quad (0.9)$$

$$Z_b = R_{tr} + X_{tl} = 0,00262 + 0,0399i (\Omega) \quad (0.10)$$

V dalším kroku jsem sériově sečetl impedanci na střídači Z_a a impedanci podélné větve transformátoru Z_b :

$$Z_{ab} = Z_a + Z_b = 0,00262 + 13,185i (\Omega) \quad (0.11)$$

Následně jsem vypočítal parametry příčné větve transformátoru G_{fe} a B_m :

$$R_{fe} = \frac{U_N^2}{\Delta P_0} = \frac{400^2}{600} = 266,67 (\Omega) \rightarrow G_{fe} = \frac{1}{R_{fe}} = 0,00375 (\Omega) \quad (0.12)$$

$$Z_{tr} = \frac{100}{i_k \%} \cdot \left(\frac{U_N^2}{S_N}\right) = \frac{100}{3,637} \cdot \frac{400^2}{630000} = 63,49 (\Omega) \quad (0.13)$$

$$B_m = \frac{S_N}{400^2} \sqrt{\left(\frac{i_k}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_N}\right)^2} = 0,01529i (\Omega) \quad (0.14)$$

Přes hodnoty G_{fe} a B_m jsem zjistil celkovou impedanci magnetického obvodu transformátoru:

$$Z_{fe} = \frac{1}{G_{fe} + B_m} = \frac{1}{0,00375 + 0,01529i} = 15,117 - 61,666i (\Omega) \quad (0.15)$$

Paralelním sečtením hodnot Z_{fe} a Z_{ab} jsem zjistil impedanci obvodu skládajícího se ze střídače a transformátoru 22/04 kV:

$$Z_c = \frac{Z_{ab} \cdot Z_{fe}}{Z_{ab} + Z_{fe}} = 0,4525 - 10,9534i (\Omega) \quad (0.16)$$

Dále jsem sériově sečetl impedanci Z_c a impedanci vedení $R_{v/2}$ a $X_{v/2}$ s převodem transformátoru:

$$\begin{aligned} Z_d &= Z_c + Z_{v/2} = Z_c + (R_{v/2} \cdot p_{tr}^2) + (X_{lv/2} \cdot p_{tr}^2) = \\ &= 0,4525 - 10,9534i + 0,00103 + 0,00015i = 0,4525 - 10,9532i \text{ } (\Omega) \end{aligned} \quad (0.17)$$

Následně jsem paralelně připočetl kapacitní reaktanci vedení X_{cv} :

$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{Z_d \cdot X_{cv}}{Z_d + X_{cv}} = \frac{(0,4525 - 10,9532i) \cdot (-2123,14i)}{(0,4525 - 10,9532i) + (-2123,14i)} = \\ &= 0,4479 - 10,8971i \text{ } (\Omega) \end{aligned} \quad (0.18)$$

Nyní, pro zjištění celkové impedance, stačilo sériově sečíst impedanci Z_e , $R_{v/2}$ a $X_{v/2}$ opět s převodem transformátoru:

$$\begin{aligned} Z_{celk1} &= Z_e + Z_{v/2} = 0,4479 - 10,8971i + 0,00103 + 0,00015i = \\ &= 0,7605 - 10,4497i \text{ } (\Omega) \end{aligned} \quad (0.19)$$

Z celkové impedance obvodu jsem vypočítal dodávaný proud ze sítě I_{1a} :

$$I_{1a} = \frac{230}{Z_{celk1}} = \frac{230}{0,7605 - 10,4497i} = 1,5933 + 21,8943i \text{ } (A) \quad (0.20)$$

Z tohoto proudu jsem vypočítal napětí na kapacitní reaktanci vedení U_{ck1} :

$$\begin{aligned} U_{ck1} &= 230 - (I_{1a} \cdot Z_{v/2}) = \\ &= 230 - [(1,5933 + 21,8943i) \cdot (0,00103 + 0,00015i)] = \\ &= 230,003 - 0,0025i \text{ } (V) \end{aligned} \quad (0.21)$$

Následně jsem vypočítal proud přivedený na sekundární vinutí transformátoru I_{tr2} :

$$I_{tr2} = \frac{U_{ck1}}{Z_d} = \frac{230,003 - 0,0025i}{0,4525 - 10,9532i} = 0,8664 + 20,9628i \text{ } (A) \quad (0.22)$$

Ze součinu zjištěného proudu I_{tr2} a známé impedance vedení $Z_{v/2}$ jsem zjistil úbytek napětí na vedení. Úbytek napětí jsem odečetl ze známého napětí U_{ck1} a zjistil tak napětí na transformátoru:

$$\begin{aligned} U_{tr} &= U_{ck1} - (I_{tr2} \cdot Z_{v/2}) = \\ &= 230 - 0,0025i - [(0,8664 + 20,9628i) \cdot (0,00103 + 0,00015i)] = \\ &= 230,006 - 0,0048i \text{ } (V) \end{aligned} \quad (0.23)$$

Díky známé velikosti napětí transformátoru jsem vypočetl proud na primární straně:

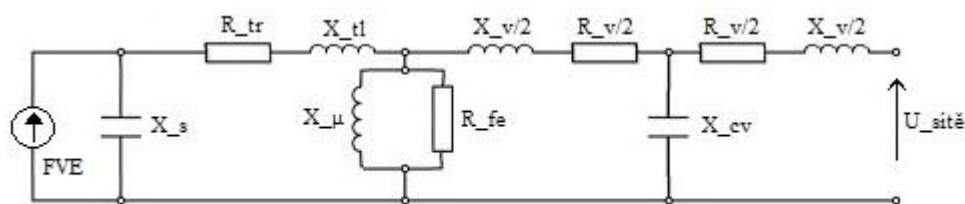
$$I_{tr1} = \frac{U_{tr}}{Z_{ab}} = \frac{230,006 - 0,0048i}{0,00262 + 13,185i} = 0,0038 + 17,4444i \text{ (A)} \quad (0.24)$$

Napětí na střídači jsem vypočetl součinem proudu z transformátoru a impedancí střídače:

$$\begin{aligned} U_{zdr1} &= I_{tr1} \cdot Z_a = 0,0038 + 17,4444i - 13,225i = \\ &= 230,702 - 0,0507i \text{ (V)} \end{aligned} \quad (0.25)$$

1.15 Dodávka ze zdroje

Pro výpočet jsem fotovoltaickou elektrárnu nahradil proudovým zdrojem, jak jsem znázornil na obrázku 5.3. Pro výpočet impedance obvodu jsem použil metodu superpozice.



Obr. 5.4 Náhradní schéma ze zdroje

V Prvním kroku jsem provedl výpočet paralelní kombinace $Z_{v/2}$ a X_{cv} :

$$Z_{v/2} = \frac{[(R_{v/2} \cdot p_{tr}^2) + (X_{lv/2} \cdot p_{tr}^2)] \cdot X_{cv}}{[(R_{v/2} \cdot p_{tr}^2) + (X_{lv/2} \cdot p_{tr}^2)] + X_{cv}} = 0,0001 + 0,00015i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.26)$$

Následně jsem sériově sečetl impedanci $Z_{v/2}$, $R_{v/2}$ a $X_{v/2}$:

$$Z_{vcelk} = Z_{v/2} + (R_{v/2} \cdot p_{tr}^2) + (X_{lv/2} \cdot p_{tr}^2) = 0,0002 + 0,0003i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.27)$$

Tímto výpočtem jsem zjistil impedanci celého vedení. Výpočtem přes obrácené hodnoty R_{fe} a X_{μ} , jsem vypočetl impedanci příčné větve transformátoru:

$$Z_{tr0} = \frac{1}{G_{fe} + B_m} = \frac{1}{0,00375 + 0,01529i} = 15,117 - 61,666i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.28)$$

Dále jsem impedanci Z_{tr0} paralelně sečetl s impedancí vedení Z_{vcelk} :

$$Z_{tv} = \frac{Z_{vcelk} \cdot Z_{tr0}}{Z_{vcelk} + Z_{tr0}} = \frac{(0,0002 + 0,0003i) \cdot (15,117 - 61,666i)}{(0,0002 + 0,0003i) + (15,117 - 61,666i)} =$$

$$= 0,0002 + 0,0003i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.29)$$

K této hodnotě impedance jsem sériově přičetl hodnoty transformátoru R_{tr} a X_{tl} :

$$Z_{tv12} = Z_{tv} + R_{tr} + X_{tl} = 0,0002 + 0,0003i + 0,00262 + 0,0399i =$$

$$= 0,0028 + 0,0402i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.30)$$

Nakonec pro zjištění celkové impedance obvodu jsem paralelně sečetl impedanci střídače a Z_{tv12} :

$$Z = \frac{Z_{tv12} \cdot Z_a}{Z_{tv12} + Z_a} = \frac{(0,0028 + 0,0402i) \cdot (-13,225i)}{(0,0028 + 0,0402i) + (-13,225i)} =$$

$$= 0,0028 + 0,0403i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (0.31)$$

Nyní, když znám celkovou impedanci obvodu, mohu vypočítat napětí zdroje pro konkrétní proud dodávaný fotovoltaickou elektrárnou do obvodu. Následující ukázkový výpočet jsem provedl pro proud $I_{FVE} = 833 \text{ A}$, který odpovídá výkonu cca 600 kWp. Proud zadávám s účinníkem roven 1 (úhlem $-7,882^\circ$):

$$U_{zdr2} = Z \cdot I_{FVE} = (0,0028 + 0,0403i) \cdot (825,13 - 114,232i) =$$

$$= 6,954 + 32,954i \text{ (V)} \quad (0.32)$$

Následně jsem vypočetl proud I_{tv12} :

$$I_{tv12} = \frac{U_{zdr2}}{Z_{tv12}} = \frac{6,954 + 32,954i}{0,0028 + 0,0402i} = 827,622 - 114,7579i \text{ (A)} \quad (0.33)$$

Dále jsem provedl výpočet napětí na transformátoru:

$$U_{ztv} = U_{zdr2} - (R_{tr} + X_{tl}) \cdot I_{tv12} = 0,2049 + 0,2211i \text{ (V)} \quad (0.34)$$

Z napětí U_{ztv} jsem vypočítal proud procházející vedením:

$$I_V = \frac{U_{ztv}}{Z_{vcelk}} = \frac{0,2049 + 0,2211i}{0,0002 + 0,0003i} = 827,625 - 114,7619i \text{ (A)} \quad (0.35)$$

Napětí na kapacitní reaktanci vedení jsem vypočetl:

$$U_{ck2} = U_{ztv} - \left(I_v \cdot Z_v \right) = 0,1025 + 0,1106i \text{ (V)} \quad (0.36)$$

Nakonec jsem vypočetl proud do sítě:

$$I_{1b} = \frac{U_{ck2}}{Z_{v/2}} = \frac{0,1025 + 0,1106i}{0,0001 + 0,00015i} = 827,625 - 114,7619i \text{ (A)} \quad (0.37)$$

1.16 Napětí a výkony v síti

Pro vyhodnocení obvodu jsem následně zhotovil výpočty, kde jsem provedl součet výsledných napětí a rozdíl proudů na jednotlivých prvcích obvodu odebírané ze sítě a vypočtených hodnot dodávaných ze zdroje. Hodnoty napětí a proudu na vedení jsou přepočtené na hladinu nízkého napětí. Pro ukázkou výpočtů znázorním vztahy pro maximální výkon z FVE 600 kWp odpovídající proudu 833 A.

$$I_{zdroj} = 825,1303 - 114,232i \text{ (A)} \quad (0.38)$$

Následně jsem pro výpočet napětí na zdroji odečetl napětí zdroje U_{zdr2} od napětí U_{zdr1} vypočteném pro odběr ze sítě:

$$U_{zdroj} = U_{zdr1} + U_{zdr2} = 237,656 + 32,903i \text{ (V)} \quad (0.39)$$

Proud v síti jsem vypočetl rozdílem I_{1a} odebíraném ze sítě a I_{1b} ze zdroje:

$$I_{sít} = I_{1b} - I_{1a} = 826,031 - 136,656i \text{ (A)} \quad (0.40)$$

Napětí v síti je 230 V, jelikož veškerá vn napětí jsem přepočítal na hladinu nízkého napětí:

$$U_{sít} = 230 \text{ (V)} \quad (0.41)$$

Výpočet napětí a proudu ve vedení:

$$I_{vedeni} = I_v - I_{tr2} = 826,7583 - 135,7247i \text{ (A)} \quad (0.42)$$

$$U_{vedeni} = U_{ck1} + U_{ck2} = 230,1055 + 0,1081i \text{ (V)} \quad (0.43)$$

Výpočet napětí a proudu na transformátoru:

$$I_{trafo} = I_{tv12} - I_{tr1} = 827,6183 - 132,2023i \text{ (A)} \quad (0.44)$$

$$U_{trafo} = U_{tr} + U_{ztv} = 230,211 + 0,21633i \text{ (V)} \quad (0.45)$$

Nyní z těchto výsledných napětí a proudů v jednotlivých částech sítě jsem vypočítal výkonovou bilanci v síti. Uváděný výpočet je pro maximální výkon FVE.

$$\begin{aligned} S_{FVE} &= 3 \cdot U_{zdroj} \cdot I_{zdroj}^* = \\ &= 3 \cdot (237,656 + 32,903i) \cdot (825,130 + 114,232i) = 576,300 \text{ (kVA)} \end{aligned} \quad (0.46)$$

$$P_{FVE} = S_{FVE} = 576,300 \text{ (kW)} \quad (0.47)$$

Výpočet výkonů v síti:

$$\begin{aligned} S_{sít} &= 3 \cdot U_{sít} \cdot I_{sít}^* = 3 \cdot 230 \cdot (826,031 + 136,656i) = \\ &= 569,316 - 68,600i \text{ (kVA)} \end{aligned} \quad (0.48)$$

Činný výkon jsem zjistil jako reálnou část a jalový výkon jako imaginární část zdánlivého výkonu:

$$P_{sít} = 569,316 \text{ (kW)} \quad (0.49)$$

$$Q_{sít} = -68,600 \text{ (kVAr)} \quad (0.50)$$

Tab. 5.3 Výkony v síti

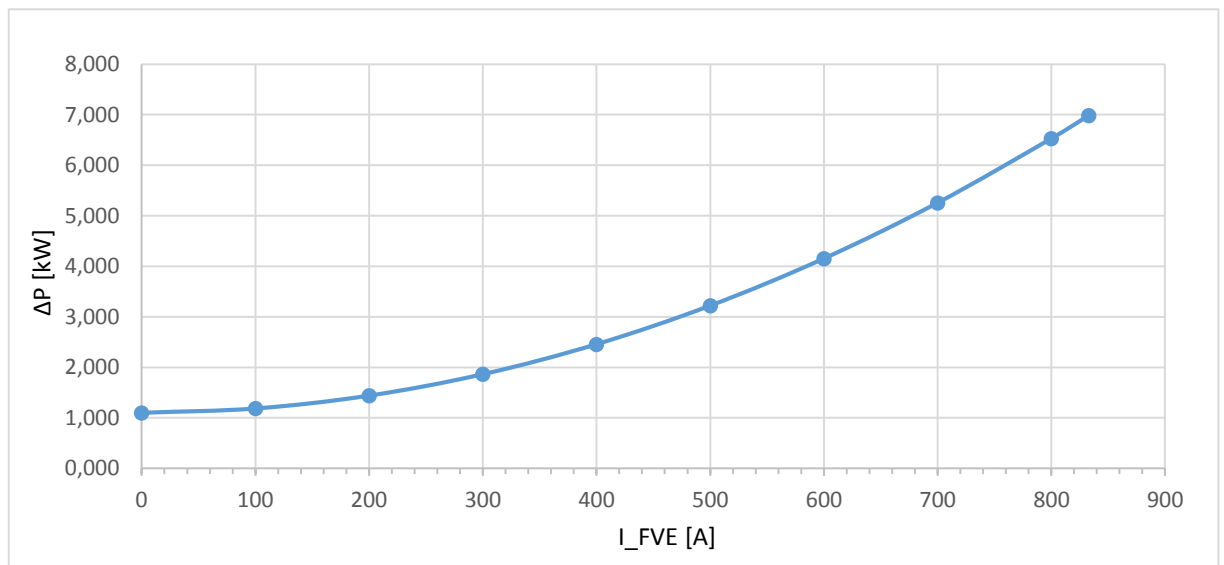
FVE				Sít		
I [A]	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]
0	0	0	0	15,147	-1,099	15,107
100	69,285	69,285	0	69,511	68,101	13,928
200	138,678	138,678	0	137,628	137,239	10,328
300	208,114	208,114	0	206,297	206,252	4,308
400	277,530	277,530	0	275,105	275,074	-4,132
500	346,862	346,862	0	343,970	343,643	-14,991
600	416,045	416,045	0	412,862	411,893	-28,271
700	485,015	485,015	0	481,771	479,760	-43,970
800	553,705	553,705	0	550,690	547,178	-62,090
833	576,300	576,300	0	573,435	569,316	-68,600

Tabulka 5.3 ukazuje vliv reaktance na změnu charakteru dodávky výkonu do sítě. Pokud bude zdroj dodávat pouze činný výkon ($\cos(\varphi) = 1$) bude se podle velikosti dodávaného výkonu měnit jalový výkon od +15 kVAr do -68 kVAr. Z tabulky je zřejmé, že pro dodržení předepsaného účinníku v předávacím místě je nutné řídit i velikost a charakter jalového výkonu zdroje.

Ztráty jsou závislé na velikosti proudu, na kterém mají kvadratickou závislost. Část ztrát je způsobena například transformátorem, nabíjecím proudem kapacit nebo dekompenzačními tlumivkami. Proto jsou zde ztráty i při nulovém dodávaném výkonu ze zdroje.

1.17 Výstupy pro konkrétní síť

Na obrázku 5.5 jsem zobrazil celkové ztráty v síti, kde je vidět vzrůstající tendence ztrát při vzrůstajícím proudu generovaným FVE, díky reaktancím vedení a transformátoru.



Obr. 5.5 Závislost ztrát na výkonu FVE

Pro maximální výkon FVE:

$$\Delta P = P_{FVE} - P_{sítě} = 6,983 \text{ (kW)} \quad (0.51)$$

V tabulce 5.4 si můžeme všimnout ztrát naprázdno, kde dosahují hodnoty 1,099 kW. Tyto ztráty jsou složeny ze ztrát transformátoru $\Delta P_0 = 600\text{W}$, ztrát na vedení a na střídači.

Tab. 5.4 Ztráty v síti

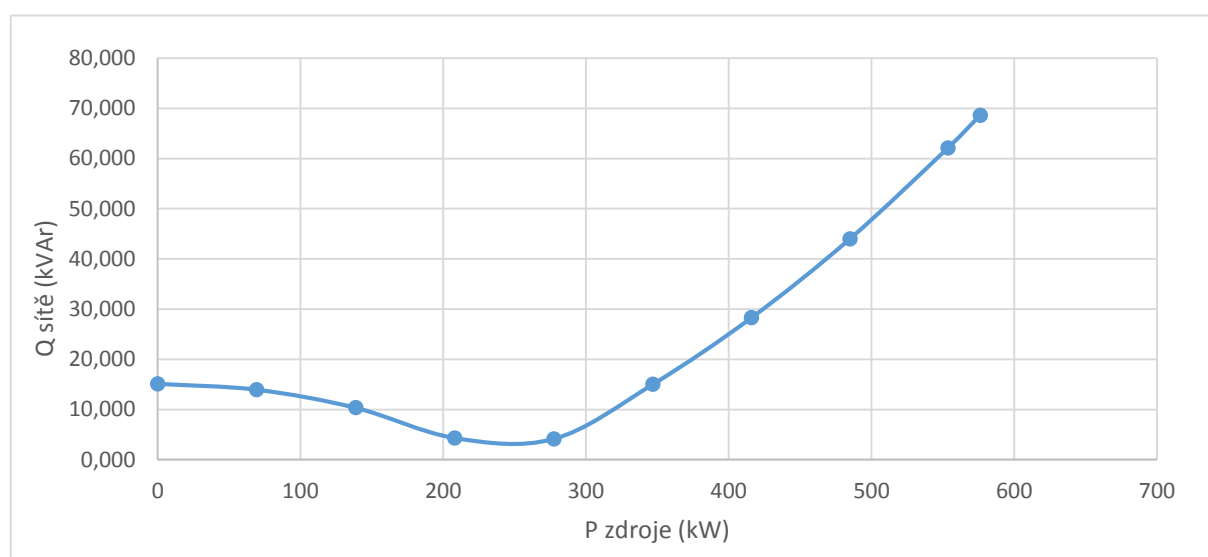
I_FVE [A]	ΔP [kW]
0	1,099
100	1,184
200	1,439
300	1,863
400	2,456
500	3,219
600	4,152
700	5,255
800	6,527
833	6,983

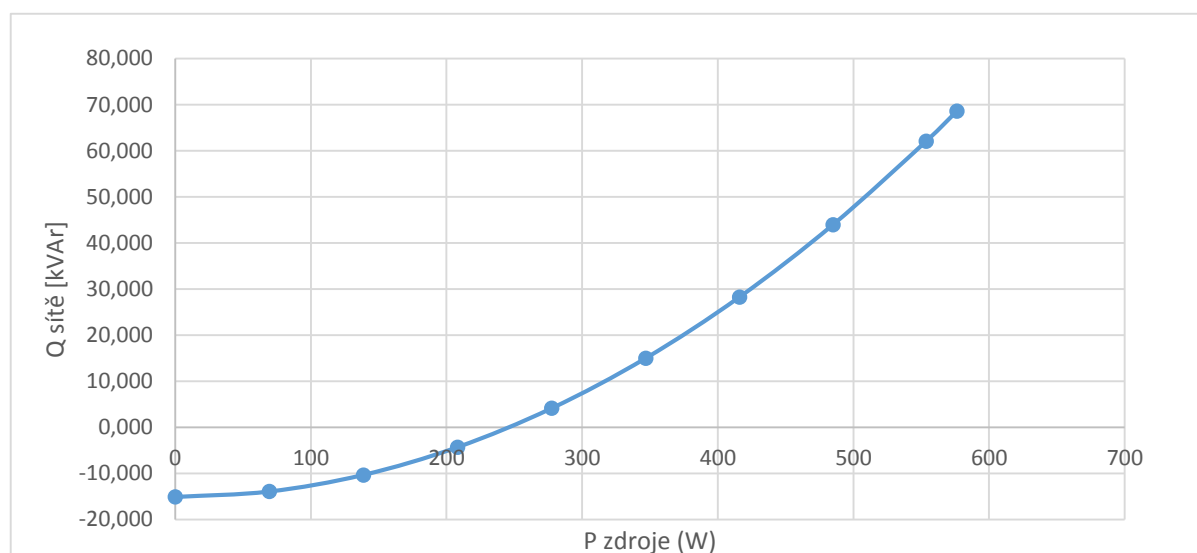
Při eliminaci nabíjecího proudu střídače připojením dekompenzační tlumivky o výkonu 15 kVAr jsme schopni snížit ztráty až o 400W. Při přepočtení ztrát na celý rok nám vyjde hodnota 1752 kWh a to už není zanedbatelná hodnota.

$$\Delta P_{tlum} = 12 \cdot 0,4 = 4,8 \text{ (kWh)} \quad (5.52)$$

$$\Delta P_{tlum} = 4,8 \cdot 365 = 1752 \text{ (kWh/rok)} \quad (5.53)$$

Na následujícím obrázku (5.6) jsem zobrazil závislost jalového výkonu na činném výkonu při účinníku $\cos(\varphi) = 1$. Pokud bude zdroj dodávat pouze činný výkon, bude na podélné induktivní reaktanci vedení a transformátoru vznikat jalový výkon induktivního charakteru.

Obr. 5.6 Q (fceP) při $\cos(\varphi)=1$ (absolutní hodnoty)

Obr. 5.6 $Q(fceP)$ při $\cos(\varphi)=1$

Tento výkon bude postupně eliminovat nabíjecí kapacitní proudy. Proto nejprve dochází k poklesu toku jalového výkonu a od hodnoty cca 250 kW dodávaného výkonu převládá induktivní jalový výkon vzniklý na podélné reaktanci nad nabíjecím kapacitním výkonem uvažovaného obvodu.

V tabulce 5.5 je znázorněna možnost regulace zdrojem (střídačem) s účinnkem 0,95 kapacitního a induktivního charakteru.

Tab. 5.5

I_FVE [A]	cos (f _i) 0,95	cos (f _i) -0,95
0	0	0
50	17,71	-18,65
100	17,22	-19,10
200	16,23	-19,99
300	15,22	-20,85
400	14,22	-21,69
500	13,20	-22,50
600	12,18	-23,28
700	11,16	-24,02
800	10,15	-24,75
833	9,82	-24,99

V tabulce 5.6 je vidět nutnost dekompenzace použitím tlumivky do 25 kW výkonu FVE. To odpovídá 36,5A. Zdroj je schopen eliminovat nabíjecí jalový výkon kapacit až od výkonu 25 kW. Při požadavku neutrálního účinnku v předávacím místě i pro menší dodávku výkonu je nutné instalovat dekompenzační tlumivku o výkonu 15 kVAr.

Tab. 5.6

I [A]	úhel	Q síť [kVAr]
0	36,86	-15
5	36,86	-13
10	36,86	-11
15	36,86	-9
20	36,86	-7
25	36,86	-5
30	36,86	-3
36,5	36,86	0
40	36,86	1
50	36,86	6
60	36,86	10
100	36,86	26
500	36,86	192
750	36,86	296
833	36,86	331

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval problematikou připojování a provozu obnovitelných zdrojů z hlediska řízení jalových výkonů v distribuční síti. Z důvodu zvyšujícímu se podílu obnovitelných zdrojů elektrické energie v elektrizační síti, kterou zapříčinila směrnice 2001/77/EC Evropské unie v rámci své energetické politiky o podpoře výroby elektřiny obnovitelných zdrojů, dochází ke zhoršení podmínek v elektrizační síti, jelikož výroba obnovitelných zdrojů jde převážně proti spotřebě. V České republice nárůst obnovitelných zdrojů vyvrcholil v roce 2010, neadekvátním nastavením podpory fotovoltaických elektráren, díky kterému došlo k masivním výstavbám elektráren větších výkonů. Větší počet nepředvídatelných zdrojů elektrické energie v distribuční síti komplikuje udržování nutné úrovně kvality dodávané elektřiny koncovým zákazníkům a z tohoto důvodu jsou u obnovitelných zdrojů navyšovány investiční a provozní náklady na opatření zajišťující kvalitu dodávky elektřiny. Mezi hlavní parametry určující kvalitu dodávané elektřiny připojovaných zdrojů patří udržení zadaných hodnot jalového výkonu, napětí a udržení účinníku v závislosti na činném výkonu.

V práci jsem řešil konkrétní případ připojené fotovoltaické elektrárny (FVE) o výkonu 600 kWp k distribuční síti. Nejprve jsem provedl výpočet impedance celého obvodu, která se skládala ze střídače, transformátoru 22/0,4 kV a 5 kilometrového vedení. Následně jsem vypočítal proudy a napětí na jednotlivých prvcích obvodu pro odběr ze sítě. Stejný postup výpočtu jsem následně aplikoval na dodávaný výkon z FVE. Z těchto výstupů jsem vypočítal jednotlivé výkony a ty následně od sebe odečetl. Z výsledků je patrné, že v konkrétním případě připojené FVE lze připojit dekompenzační tlumivku o výkonu 15kVAr a eliminovat nabíjecí proud kapacity střídače. Díky této eliminaci nám poklesnou ztráty o 400W. Při přepočtu na celý rok se nám ztráty vyšplhají na 1752 kWh. Z výstupů je také patrná možnost řízení zdrojem (střídačem) pro $\cos(\varphi)=1$ v předávacím místě od výkonu FVE 25kW. Proto v tomto konkrétním případě připojené FVE bych navrhoval použití dekompenzační tlumivky při požadavku udržení neutrálního účinníku a pro dodávku malých výkonů a po dosažení dodávaného výkonu FVE (25 kW) tlumivku vypnout a začít řídit zdrojem (střídačem), jelikož na tlumivce vznikají vlastní ztráty pohybující se v rozmezí 0,5-4%. Výsledné tabulky jsou v příloze.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SCHEJBAL, Konstantin a MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektroenergetika II. 1. část*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 124 s. ISBN 80-7082-451-4.
- [2] SCHEJBAL, Konstantin a MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektroenergetika II. 2. část*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. s. 125-223. ISBN 80-7082-451-4.
- [3] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednáška - Elektrizační soustava* [online]. [cit. 2.3.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18339524-Elektrizacni-soustava-cr.html>
- [5] *Mapa rozmístění územně příslušných distribučních společností* [online]. 2017 [cit. 2.3.2017]. Dostupné z: <http://www.centralenergy.cz/editor/filestore/File/mapa520.jpg>
- [6] ČEZ DISTRIBUCE. *Pravidla provozování distribuční soustavy* [online]. 2016 [cit. 5.3.2017]. Dostupné z: http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds_2016.pdf
- [7] ČEZ DISTRIBUCE. *Pravidla provozování distribuční soustavy* [online]. 2016 [cit. 5.3.2017]. Dostupné z: http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds-priloha-4_2016.pdf
- [8] JAKUBES, Jaroslav. *Potenciál solární energetiky v České republice* [online]. 2015 [cit. 23.3.2017]. Dostupné z: <http://www.alies.cz/wp-content/uploads/Potencial-solarni-energetiky-v-CR.pdf>
- [9] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Kompenzace účinníku v průmyslových sítích* [online]. 2000 [cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap7.pdf>
- [10] VOBOŘIL, David. *Fotovoltaické elektrárny – princip funkce a součásti, elektrárny v ČR* [online]. 2016 [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti/>
- [11] HABRYCH, Richard. *Automatická sekundární regulace napětí*. Časopis Energetika 5/2015 [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf

Přílohy

Příloha A – Tabulky výpočtů proudů a napětí

FVE		U zdroje [V]	I zdrojů [A]	U sítě [V]	I sítě [A]
I [A]	uhel_I cos(φ)		0		
0	1,0	230,702352880368-0,0506538269998522j		230	-1,59332951611643-21,894293850277j
100	0,989	230,917114755662+3,9868482076073j	99,9851027351326+1,72604491395376j	230	98,6974498288286-20,1849098428738j
200	1,991	230,990600869681+8,03062666972862j	199,879259337941+6,94850246571597j	230	198,897772265405-14,9684171803919j
300	2,994	230,922488490033+12,0769777800448j	299,590530314076+15,6688910306586j	230	298,915417900967-6,2432726847295j
400	3,997	230,712625906088+16,122182038906j	399,026885872437+27,884482260664j	230	398,658075339108+5,9878071515295j
500	5,002	230,360715479336+20,1625081584401j	498,095751498904+43,5961275659008j	230	498,032887581948+21,7256966439185j
600	6,009	229,866420275571+24,1941981835107j	596,70382638877+62,805601446052j	230	596,946269326423+40,9721961757788j
700	7,017	229,229598103149+28,213470343943j	694,757561001625+85,5098323648981j	230	695,304384710907+63,7242453518129j
800	8,027	228,44985880726+32,2164993224953j	792,161900010227+111,711790658766j	230	793,011888813949+89,984844427614j
833	8,361	228,161127205705+33,5332762748983j	824,14649227215+121,126212173545j	230	825,096208958788+99,420996593258j

FVE		U tratio [V]	I tratio [A]	U vedení [V]	I vedení [A]
I [A]	uhel_I cos(φ)				
0	1,0	230,00608520259-0,00479122742475544j	-0,003838015705102852-17,4444123160959j	230,003073945887-0,00249748830419764j	-0,866426268247158-20,9628108990725j
100	0,989	230,026300744303+0,0252314453409648j	100,286565737598-15,7346064853402j	230,013181717461+0,0125138483556685j	99,4243530766968-19,2534268916694j
200	1,991	230,045460072078+0,0559519670896247j	200,486490088014-10,517705539553j	230,022761382056+0,027874109532007j	199,624675513274-14,0369342291875j
300	2,994	230,063543675691+0,0873433748139441j	300,503723340923-1,7921667001568j	230,031803184559+0,0435698137209457j	299,642321148836-5,311789733525j
400	3,997	230,08053328617+0,119377798339345j	400,245954457609+10,4392931562338j	230,040297990484+0,0595870258349321j	399,384978586978+6,9192901027338j
500	5,002	230,096409459533+0,152027947985945j	499,620326784985+26,1775479455349j	230,048236077839+0,0759121010337868j	498,759790829816+22,657179595123j
600	6,009	230,11115327354+0,185266509952245j	598,533255362945+45,4243976444962j	230,055607512411+0,0925313824165257j	597,673172574293+41,9036791269828j
700	7,017	230,124743407429+0,219065092019646j	696,890904694925+68,1767814686293j	230,062403053096+0,109430673873579j	696,031287958778+64,6557283030188j
800	8,027	230,137162112813+0,253396107737947j	794,597930204742+94,4376992555701j	230,068612406422+0,126596182179618j	793,738792061819+90,9163273788185j
833	8,361	230,140999563644+0,26483738183864j	826,682089722044+103,873953027555j	230,070531132044+0,132316819377561j	825,823112206656+100,35247954446j

Příloha B – Tabulka výpočtů výkonů

I [A]	FVE		S_ZDROJE			S_SITE			Trafo			Vedení			
	uhel [°]	cos(φ)	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	
0	0	1,0	0	0	0	-1099,397	36612034+15107,062	7566911j	-2,392	13784696	164+12036,963	0115087j	-597,685	052007799+14464,539	3276675j
100	0,989	1,0	69285,458	7636502+0,156	34847432	39777j	68101,240	3818917+13927,587	7915829j	69204,452	1723196+10865,711	0954759j	68606,012	5707204+13289,358	478784j
200	1,991	1,0	138678,093	135221+0,350	853194	04152j	137239,462	63129+10328,207	8544704j	138361,255	092657+7292,304	0697333j	137753,483	503554+9703,136	19841968j
300	2,994	1,0	208114,270	910971-0,453	392891	726253j	206251,638	351667+4307,858	15246335j	207404,384	836993+1315,677	69370918j	206781,096	031753+3704,807	791916605j
400	3,997	1,0	277530,298	8037478-0,354	095808	96885j	275074,071	983984-4131,586	9345535j	276270,146	601216-7062,292	96703867j	275625,155	360969-4703,752	18223503j
500	5,002	1,0	346862,102	910687+0,073	545215	0802303j	343642,692	431544-14990,730	6843038j	344894,469	015363-17842,210	6130075j	344221,590	183173-15523,146	8901714j
600	6,009	1,0	416045,111	115428-0,384	443544	7405849j	411892,925	535232-28270,815	3612874j	413212,778	152284-31025,316	9553186j	412505,826	647421-28754,618	5010148j
700	7,017	1,0	485014,576	821207+0,412	01002	8856457j	479760,025	450526-43969,729	2927509j	481160,327	33639-46609,499	6149441j	480413,118	03568-44396,051	549865j
800	8,027	1,0	553704,711	1137+0,421	535654	357285j	547178,203	281625-62089,542	6550537j	548671,328	470348-64596,828	2412291j	547877,676	488269-62449,526	69532296j
833	8,361	1,0	576299,854	189167+0,116	738030	803391j	569316,384	181564-68600,487	649348j	570842,856	46726-71060,157	1744257j	570032,521	102239-68936,633	39449075j

I [A]	FVE			Síť			Trafo			Vedení		
	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	P [kW]	Q [kvar]
0	0	0	0	15,147	-1,099	15,107	12,037	-0,002	12,037	14,477	-0,598	14,465
100	69,285	69,285	0	69,511	68,101	13,928	70,052	69,204	10,866	69,881	68,606	13,289
200	138,678	138,678	0	137,628	137,239	10,328	138,553	138,361	7,292	138,095	137,753	9,703
300	208,114	208,114	0	206,297	206,252	4,308	207,409	207,404	1,316	206,814	206,781	3,705
400	277,530	277,530	0	275,105	275,074	-4,132	276,360	276,270	-7,062	275,665	275,625	-4,704
500	346,862	346,862	0	343,970	343,643	-14,991	345,356	344,894	-17,842	344,571	344,222	-15,523
600	416,045	416,045	0	412,862	411,893	-28,271	414,376	413,213	-31,025	413,507	412,506	-28,755
700	485,015	485,015	0	481,771	479,760	-43,970	483,413	481,160	-46,609	482,460	480,413	-44,396
800	553,705	553,705	0	550,690	547,178	-62,090	552,461	548,671	-64,597	551,425	547,878	-62,450
833	576,300	576,300	0	573,435	569,316	-68,600	575,249	570,843	-71,060	574,186	570,033	-68,937