

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav RYCHETSKÝ**
Osobní číslo: **E12B0055P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Řízení jalového výkonu v malých zdrojích připojených do distribuční sítě**
Zadávající 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 malých zdrojích připojených do distribuční sítě" bude zaměřena na tyto body:

1. Proveďte rozbor zákona o řízení P, Q u zdrojů nad 200 kW.
2. Zhodnoťte stávající stav 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.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Literatura uváděná k předmětům Elektroenergetika I, II.
3. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P,Q u zdrojů nad 200 kW.
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popis problematiky s řízením jalového výkonu v elektrizační soustavě. Důsledkem přenášení jalového výkonu současně s činným výkonem klesá napětí v síti a vznikají ztráty na vedení, proto je třeba ho řídit a vhodně regulovat. Dále je zde proveden stručný popis několika FACTS zařízení, které jsou schopny řídit činný i jalový výkon protékající elektrizační soustavou. Na konkrétním případě je zde proveden výpočet připojené fotovoltaické elektrárny k závodu v distribuční soustavě a vliv jalového výkonu na ztráty a úbytky napětí na vedení.

Klíčová slova

Elektrizační soustava, kompenzace, FACTS zařízení, primární regulace, sekundární regulace, terciální regulace, pilotní uzel

Abstract

The aim of this bachelor thesis is a description of the problems with the control of reactive power in the power system. The consequence of transferring the reactive power at the same time as the active power is a voltage drops in the network and the losses in power lines, therefore, it is necessary to control and appropriately regulate it. Next, there is a brief description of a few FACTS devices that are able to control the active and reactive power flowing through the power system. In the specific case there is a calculation of photovoltaic power connected to the company and the influence of reactive power on the voltage drops and on the losses in power lines.

Key words

Power system, compensation, FACTS devices, primary control, secondary control, tertiary control, pilot knot

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 práce, je legální.

.....
podpis

Poděkování

Děkuji své vedoucí práce paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a za cenné rady, které mi poskytla při jejím zpracování. Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Ing. Františkovi Žákovi za věnovaný čas a ochotu. Zároveň děkuji své rodině za psychickou a finanční podporu během celého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR	11
1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	12
1.1.1 Přenosová soustava	12
1.1.2 Distribuční soustava	12
1.2 VÝKONY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	13
2 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU	16
2.1 DRUHY KOMPENZACE.....	18
2.1.1 Individuální kompenzace.....	18
2.1.2 Skupinová kompenzace	18
2.1.3 Centrální kompenzace.....	18
2.2 ZAŘÍZENÍ FACTS	18
2.2.1 SVC	18
2.2.2 TCSC.....	19
2.2.3 PST.....	20
2.2.4 STATCOM.....	20
2.2.5 SSSC.....	21
2.2.6 UPFC.....	21
3 PŘIPOJOVÁNÍ ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	22
3.1 PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	22
3.2 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DS	22
3.3 POŽADAVKY NA ZDROJE	23
3.3.1 Přihlašovací zařízení	23
4 ŘÍZENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	24
4.1.1 Metoda pilotních uzlů.....	26
4.2 TERCIÁLNÍ REGULACE NAPĚTÍ A JALOVÝCH VÝKONŮ	27
4.3 SEKUNDÁRNÍ REGULACE NAPĚTÍ (ASRU)	27
4.4 PRIMÁRNÍ REGULACE NAPĚTÍ.....	28
5 PŘÍPADOVÁ STUDIE PRŮMYSLOVÉHO ZÁVODU S PŘIPOJENOU FVE	29
5.1 ZÁVOD PŘIPOJENÝ K DISTRIBUČNÍ SÍTĚ, BEZ PŘIPOJENÉ FVE	31
5.2 PROVEDENÍ KOMPENZACE NA ÚČINÍK $\cos \Phi=1$	33
5.3 PŘIPOJENÍ FVE K PRŮMYSLOVÉMU ZÁVODU	37
5.3.1 Ekonomika provozu.....	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44
SEZNAM PŘÍLOH	46

Seznam symbolů a zkratek

ES	Elektrizační soustava
DS.....	Distribuční soustava
PS	Přenosová soustava
VVN.....	velmi vysoké napětí
VN.....	vysoké napětí
NN.....	nízké napětí
ENTSOE	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav
PPDS.....	Pravidla provozování distribučních soustav
R (Ω)	činný odpor
L (H).....	indukčnost
C (F).....	kapacita
X (Ω).....	reaktance
Z (Ω).....	impedance
P (W).....	činný výkon
Q (VAr).....	jalový výkon
S (VA).....	zdánlivý výkon
U (V).....	elektrické napětí
I (A).....	elektrický proud
cos φ (-).....	účinník
f (Hz).....	frekvence
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO.....	Hromadné dálkové ovládání
ČR	Česká republika
TRN	terciální regulace napětí
ASRU.....	automatická sekundární regulace napětí
PRN.....	primární regulace napětí

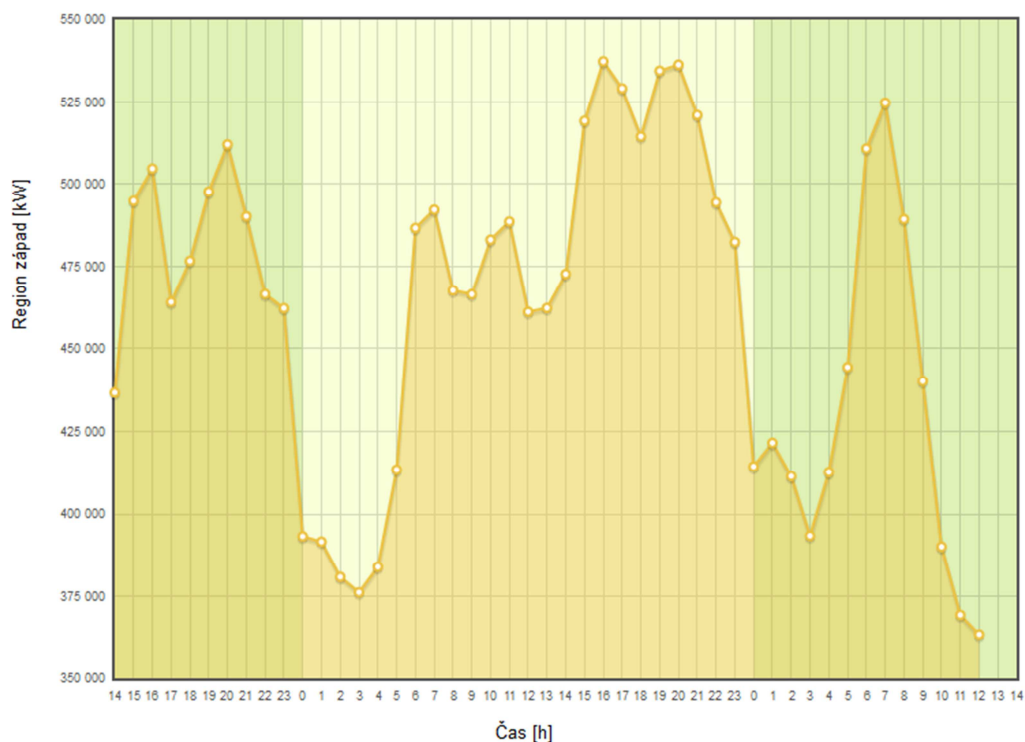
Úvod

Téma řízení jalového výkonu v malých zdrojích připojených do distribuční sítě jsem si vybral, protože mě toto téma zajímá a myslím si, že je to do budoucna velmi perspektivní téma. Malé zdroje, a to především obnovitelné zdroje energie, velice rozšiřují a dle všech předpokladů se budou i dále v budoucnu rozšiřovat. Avšak s připojováním zdrojů do elektrizační soustavy jsou spojeny určité problémy a také jsou na ně z hlediska provozovatelů těchto soustav kladeny určité požadavky, které jsou popsány v této bakalářské práci.

Tato bakalářská práce je rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole jsem popsal elektrizační soustavu České republiky, která je dále rozdělena na přenosovou a distribuční soustavu. Také jsem zde stručně popsal výkony, které tyto soustavy přenáší a s nimi spojené problémy. Ve druhé části jsem popsal kompenzaci jalového výkonu, její druhy a důvody proč se kompenzace provádí. Dále jsem provedl rozbor několika používaných zařízení FACTS, které jsou používány k řízení výkonových toků v elektrizační soustavě. Ve třetí kapitole jsem stručně popsal pravidla pro připojení zdrojů k distribuční síti dle platných pokynů Energetického regulačního úřadu - vyhlášky č. 401/2010 Sb. Ve čtvrté kapitole jsem popsal řízení elektrizační soustavy České republiky z hlediska primární, sekundární a terciální regulace. Jsou zde popsány také pilotní uzly a jejich funkce v soustavě. V páté kapitole jsem po konzultaci s panem Ing. Františkem Žákem provedl výpočet, na kterém jsem názorně předvedl vliv jalového výkonu na ztráty ve vedení a na napětí.

1 Elektrizační soustava ČR

Úkolem elektrizační soustavy je zásobování spotřebitelů elektrickou energií. Pod elektrizační soustavu spadají všechna zařízení potřebná pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny. Jelikož se ale spotřeba i další parametry sítě neustále mění (obr. 1.1), je potřeba je sledovat a soustavu řídit. Úkolem řízení je tedy dodržování kvality vyráběné elektrické energie. Při dodávání elektrické energie musíme dodržovat parametry garantované normou ČSN EN 50160, jakými jsou - velikost napětí, frekvence, sinusový průběh a symetrie mezi jednotlivými fázemi v třífázové soustavě. Norma ČSN IEC 38 udává normalizovaná jmenovitá napětí. Pro nízkonapěťové čtyř-vodičové sítě je napětí mezi středním a fázovým vodičem 230V. Mezi dvěma fázovými vodiči pak 400V. Velikost napětí však v síti kolísá, to je způsobeno připojováním a odpojováním různých zátěží a také regulací na zdrojích elektrické energie. Norma nařizuje, že se napětí v síti smí lišit maximálně o 10% od jmenovité hodnoty, ale pro napětí 400 kV se smí lišit jen o 5%. Jmenovitá frekvence sítě je 50Hz, ale i ta se běžně může nacházet v intervalu 49,5 až 50,5 Hz. Symetrie mezi fázemi v třífázové soustavě znamená, že je v každé fázi stejná velikost napětí a fázový posun pro napětí v každé fázi je o 120°. Velice důležitá je i optimalizace toků v elektrizační soustavě pro efektivní provoz a maximální využití přenosových schopností. Bezpečnost celé soustavy pak bývá narušena neplánovanými přetoky elektrické energie, které jsou způsobeny náhlými změnami ve výrobě, nebo při spotřebě elektrické energie.[1][2]



Obr. 1.1. – Denní diagram zatížení západního regionu distribuční soustavy ČR [3]

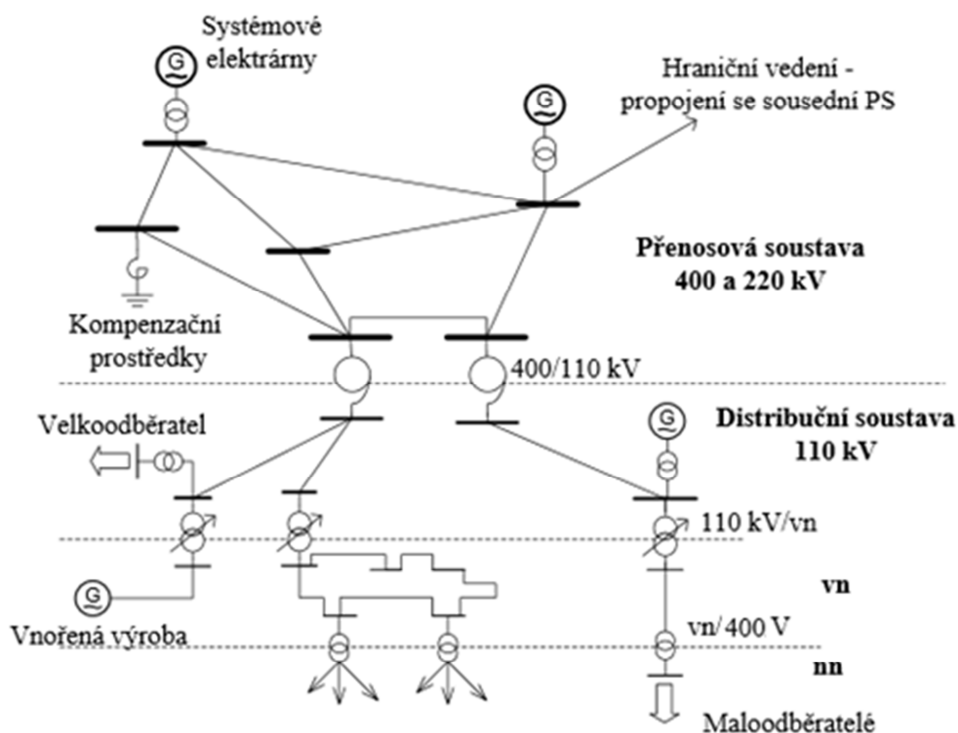
1.1 Rozdělení elektrizační soustavy

1.1.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava tvoří páteř elektrizační soustavy, slouží k přenosu velkých výkonů od velkých elektráren k velkým rozvodnám. Propojuje všechny velké elektrárny tak, aby bylo možné efektivně řídit přenos elektrické energie v závislosti na její spotřebě. Síť tvoří přes 3500 km vedení na napěťové hladině 400 kV, dále pak přibližně 2000 km s napětím 220 kV a pár vybraných sítí na napěťové hladině 110 kV. Mezinárodně je propojena se sítěmi dalších členů „ENTSO-E” (Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny). Přenosovou soustavu v České republice provozuje společnost ČEPS, a.s. a zajišťuje také její regulaci například dálkovým ovládáním výkonu dobře regulovatelných zdrojů.

1.1.2 Distribuční soustava

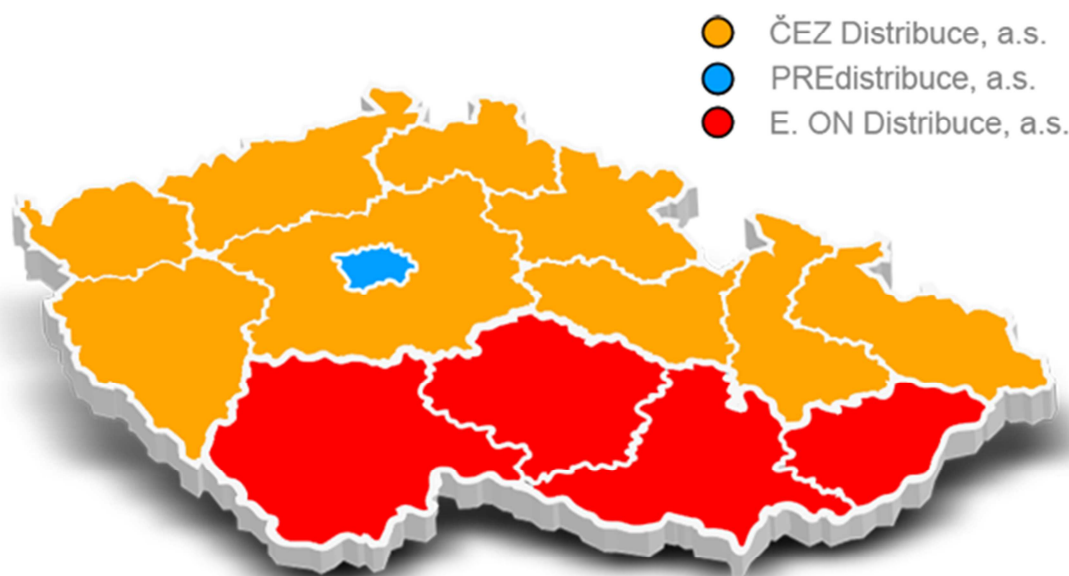
Distribuční soustava navazuje na přenosovou soustavu. Jejím hlavním úkolem je rozvod elektrické energie z přenosové soustavy ke koncovým uživatelům. V transformačních stanicích se transformuje velmi vysoké napětí z přenosové soustavy na napěťovou hladinu 110 kV a dále se pak napětí průběžně transformuje, až na nízké napětí. Současně slouží i pro připojování elektráren o malých výkonech, řádově do výkonu desítek MW. Distribuce elektřiny i její cena je řízena Energetickým regulačním úřadem.



Obr. 1.2. – Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy [4]

1.1.2.1 Provozovatel distribuční soustavy

Provozovatelem je právnická osoba, která zajišťuje chod distribuční soustavy, musí řešit všechny poruchy a havárie v distribuční soustavě. V České republice existuje přibližně 300 distributorů elektrické energie s licenci od Energetického regulačního úřadu. Většinou se však jedná o provozovatele lokálních distribučních soustav, to znamená, že napájí méně než 90 000 odběrných míst a jsou připojeny k regionální distribuční soustavě. V České republice existují 3 provozovatelé regionální distribuční soustavy a to – PRE Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a ČEZ Distribuce, a.s.

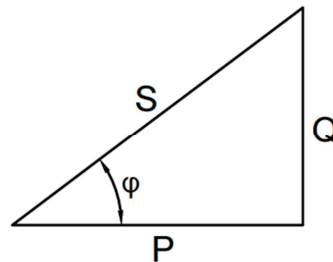


Obr. 1.3. – Rozdělení území regionálních distributorů v ČR [5]

1.2 Výkony v elektrizační soustavě

Ve všech střídavých elektrizačních soustavách jsou přenášeny dva základní typy elektrických výkonů a to výkon činný a jalový. Jejich vektorový součet se pak nazývá výkonem zdánlivým. Činný výkon je ta část elektrické energie, která se později přeměňuje na jiný druh energie, např. na mechanickou či tepelnou. Část tohoto výkonu je také spotřebována jako tepelné ztráty na vedení, které jsou způsobeny činným odporem vedení a procházejícím proudem.

Jalový výkon popisuje výměnu energie mezi prvky sítě. U kondenzátorů ve střídavé soustavě vytváří elektrické pole, u cívek vytváří pole magnetické. Vlivem působení střídavého napětí se pak tato pole mění. Oproti činnému výkonu přímo nespotřebovává energii, ale proud vytvářející tento výkon také způsobuje ve vodičích ztráty. Není pro nás výhodné ho přenášet, protože ho lze vyrobit na svorkách spotřebiče.



Obr. 1.4. – Trojúhelník výkonů

Jednotkou činného výkonu je Watt (W), značí se písmenem P a je definován podle vztahu:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = R \cdot I^2 \quad (1.1.)$$

Jednotkou jalového výkonu je Volt-Ampér reaktanční (VAr), značí se písmenem Q a je definován podle vztahu:

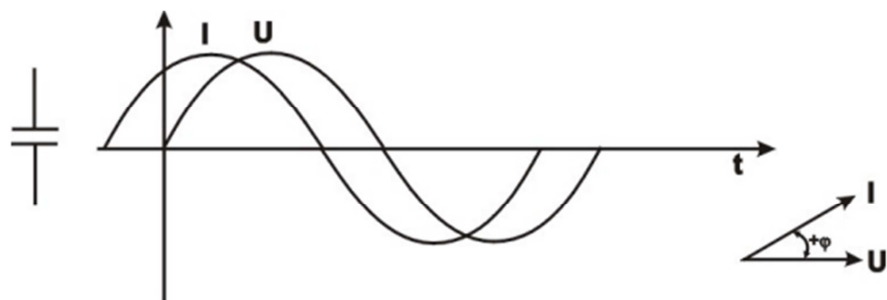
$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \approx U^2 \quad (1.2.)$$

Vektorový součet činného a jalového výkonu se nazývá výkonem zdánlivým. Jeho jednotkou je Volt-Ampér (VA) a je definován podle vztahu:

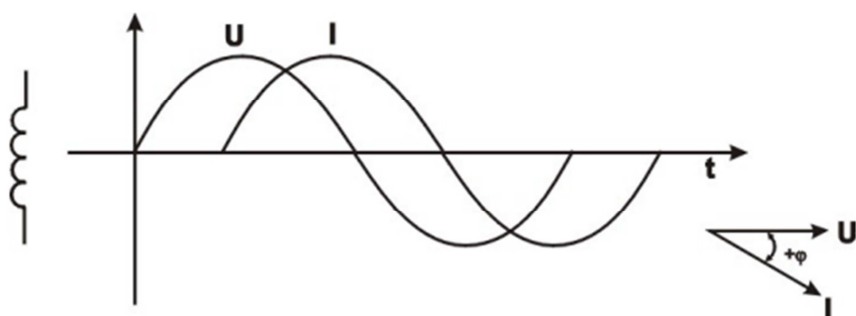
$$S = U \cdot I = P + jQ \quad (1.3.)$$

Úhel φ je úhel, který svírá činný výkon se zdánlivým výkonem, také je to úhel mezi napětím a proudem. Pokud je zátěž kapacitního charakteru tak úhel mezi napětím a proudem je obvykle brán jako záporný (obr. 1.5.), v případě induktivního charakteru zátěže je úhel brán jako kladný (obr. 1.6.). U ohmické zátěže je tento úhel nulový a říkáme, že je napětí a proud ve fázi. $\cos \varphi$ pak udává poměr činného a zdánlivého výkonu a nazýváme ho účinníkem.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (1.4.)$$



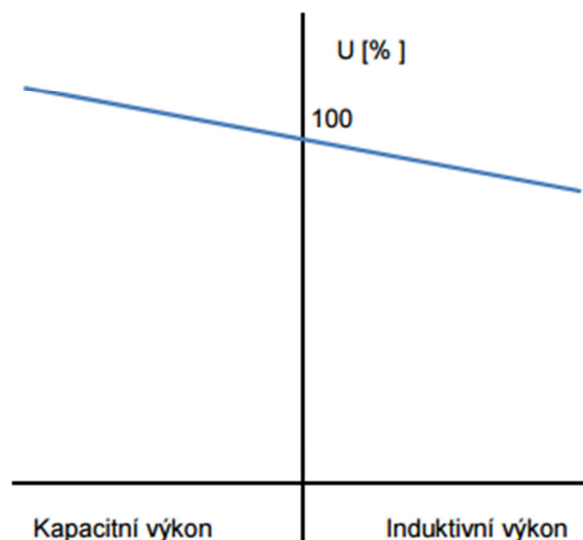
Obr. 1.5. – Posuv napětí a proudu kapacitních spotřebičů [6]



Obr. 1.6. – Posuv napětí a proudu induktivních spotřebičů [6]

2 Kompenzace jalového výkonu

V současné době potřebuje většina spotřebičů ke svému chodu činný i jalový výkon pro vytvoření elektromagnetického či elektrického pole. Spotřebič (např. motor), pracující naprázdno (nezatížený), nekoná žádnou práci a odebírá ze sítě jen jalový výkon (proud) a zatěžuje síť indukčně. Při přenosu jalového výkonu vznikají na přenosovém vedení úbytky napětí a činného výkonu, aniž by spotřebič konal činnou práci. Pokud zatížíme tento motor na hřídeli, začne konat činnou práci a bude ze sítě odebírat činný proud, který je ve fázi s napětím. Současně ze sítě odebírá i proud jalový, který potřebuje k buzení magnetizačního pole. Jelikož i tento proud způsobuje v síti ztráty, je výhodné do sítě přidávat další zařízení, kterými se sníží induktivní jalový výkon (proud), tím se sníží také výsledná impedance a sníží se tak ztráty. Toto snížení ztrát se nazývá kompenzací jalového výkonu. Jedná se o snížení zdánlivého výkonu tak, aby byl přenos činného výkonu co nejpříznivější. Kompenzace se nejčastěji provádí, dle energetického zákona č. 458/2000 Sb., na požadovanou hodnotu $\cos \varphi$ 0,95. Čím je toto číslo bližší 1, tím je lepší poměr využitého výkonu. Pokud se $\cos \varphi$ rovná 1, znamená to, že se jedná o čistě činný výkon. Důležitá je také hodnota $\tan \varphi$, která udává poměr mezi jalovým a činným výkonem, který se používá pro výpočet velikosti kompenzačního výkonu.



Obr. 2.1 – Závislost napětí na charakteru jalového výkonu [18]

Na obr. 2.1. je znázorněna závislost napětí na charakteru jalového výkonu, ze kterého je vidět, že pokud překompenzujeme síť, zvýší se tak napětí v síti. V tom případě je nutné provést dekompenzaci jalového výkonu, která vykompenzuje jalový výkon kapacitního charakteru. Spotřebiče jsou navrhovány na jmenovitou hodnu napětí. Každá větší odchylka od jejich jmenovité hodnoty na ně většinou nepříznivě působí. Například u žárovek snížené napětí sníží jejich svítivost, zvýšené napětí pak podstatně snižuje jejich životnost. U asynchronních motorů změna napětí ovlivňuje jejich otáčky, mění se činný i jalový výkon a také nepříznivě působí na jejich životnost.

Hlavními spotřebiči jalového výkonu jsou:

- asynchronní motory, generátory,
- transformátory,
- elektrické obloukové pece,
- výkonové polovodičové měniče,
- venkovní a kabelová vedení,
- výbojková a zářivková svítidla.

Pokud se neprovede kompenzace, tak se elektrizační soustavou přenáší činný i jalový výkon, tedy zdánlivý výkon, který je podstatně větší než užitečný činný výkon. Tento zdánlivý výkon pak způsobuje:

- větší požadavky na prvky elektrizační soustavy – vedení, transformátory, rozvodny apod. musí být dimenzovány na větší výkony a protékající proudy,
- snížení využití generátorů,
- zvýšení tepelných ztrát,
- zvýšení úbytku napětí v síti,
- zhoršení zkratových poměrů v síti.

2.1 Druhy kompenzace

2.1.1 Individuální kompenzace

Při tomto druhu kompenzace je kompenzační zařízení umístěno přímo na svorkách spotřebiče, nebo je s ním připínán k síti samostatným stykačem. Velice běžná je kompenzace zářivkových svítidel, jejichž účinník bývá okolo hodnoty 0,52, na požadovanou hodnotu 0,95. Dále se kompenzují spotřebiče větších výkonů, které jsou často v provozu – např. kompresory, odsávání, sušárny. [8]

2.1.2 Skupinová kompenzace

Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnicích rozváděče skupiny spotřebičů. Jelikož všechny spotřebiče vždy nepoběží současně, je kompenzační výkon menší, než by byl u provedení individuální kompenzace. [8]

2.1.3 Centrální kompenzace

Jedná se o nejčastější způsob kompenzace. Kompenzační zařízení je umístěno blízko hlavní rozvodny nebo blízko transformátoru. Má ze všech tří kompenzací největší využití a nejmenší kompenzační výkon. Přívody spotřebičů musí být provedeny větším průřezem, protože přívodní vedení od spotřebičů není kompenzováno. Někdy se využívá i smíšená kompenzace, což je kombinace s ostatními druhy kompenzací.[8]

2.2 Zařízení FACTS

FACTS (Flexible AC Transmission System) je zkratka pro zařízení, která jsou založena na výkonové elektronice za účelem efektivnějšího přenosu střídavého napětí. Používají se k řízení výkonových toků (P a Q), zvýšení přenosových kapacit linek, pro filtraci harmonických proudů, pro zvýšení bezpečnosti a pro regulaci napětí. Zařízení FACTS rozdělujeme do tří kategorií: sériový regulátor, paralelní regulátor a kombinovaný sérioparalelní regulátor. Mezi hlavní výhody patří rychlá odezva na požadavek, častá změna výstupu a plynule nastavitelný výstup.

2.2.1 SVC

Statické kompenzátory jsou často využívány pro řízení jalového toku v přenosových sítích, především za účelem regulace napětí. Oproti dříve používaným synchronním rotačním

kompenzátorům neobsahují rotační části a jsou tak méně náchylné k poruchám a vyžadují menší údržbu. V průběhu let bylo navrženo několik typů statických jalových kompenzátorů, mezi ty nejpoužívanější patří:

- tyristorově řízená tlumivka (TCR),
- tyristorově spínaný kondenzátor (TSC),
- mechanicky spínaný kondenzátor (MSC).

Základem statických kompenzátorů je obvod, který se skládá z tlumivky a do série je k ní připojena dvojice antiparalelně zapojených tyristorů. Frekvence proudu je proměnlivá při fázovém řízení tyristoru. TSC obsahuje kondenzátor v sérii s obousměrným tyristorem a tlumivkou. Funkcí tyristorového spínače je připojit nebo odpojit kondenzátor pro celočíselný počet půlperiod svorkového napětí. Kondenzátor není fázově říditelný, je snadné ho vypnout či zapnout. Tlumivka v TSC obvodu slouží pro omezení proudu a pro optimalizaci obvodu na požadovanou frekvenci. Impedance tlumivky a kondenzátoru udává řídicí rozsah SVC. TSR je TCR bez fázového řízení proudu. Výhoda tohoto zařízení oproti TCR spočívá v tom, že zde nevzniká žádný harmonický proud. MSC je laděný odpor zahrnující baterie kondenzátorů a tlumivek. Je navrhnutý tak, aby byl komutovaný jen několikrát denně, přepínání je vykonávané jističem. Účelem MSC je splnit požadavky na jalový výkon ustáleného stavu.[9]

2.2.2 TCSC

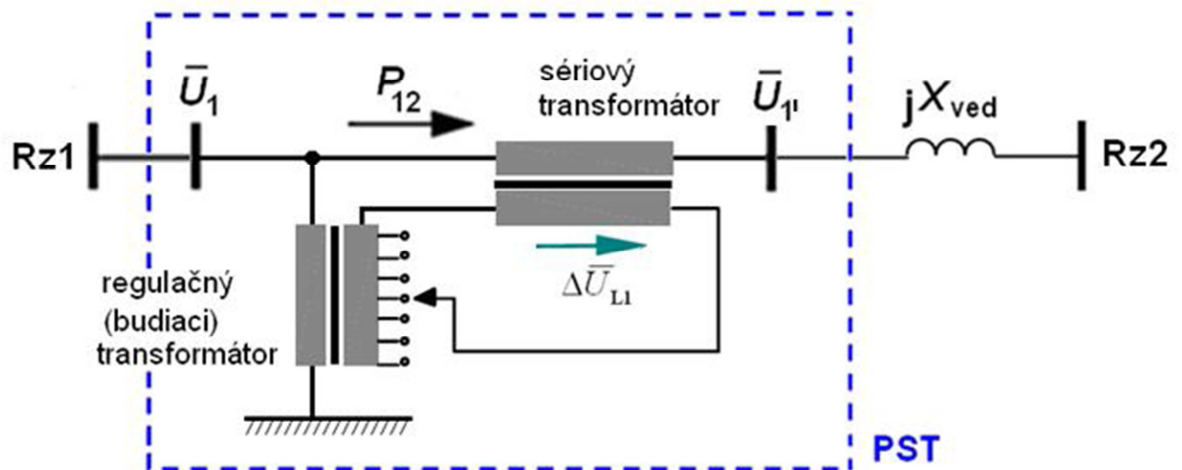
TCSC je složen z kondenzátoru, který je připojen sériově na vedení, k němu jsou paralelně připojené tlumivky, které jsou řízené tyristorem. Často se vyskytuje i paralelně připojený regulovatelný odpor, který chrání kondenzátor proti přepětí. Tato kombinace umožňuje plynulé řízení základní frekvence kapacitní reaktance ve velkém rozsahu. TCSC se často využívá pro dlouhá přenosová vedení díky dobrému poměru ekonomické náročnosti a zvýšení přenosové schopnosti vedení, je schopné rychlého řízení činného výkonu. Možné řízení přenášeného výkonu poukazuje na to, že zařízení může být použito na tlumení elektromechanických oscilací ve výkonovém systému. Funkce tohoto tlumícího efektu jsou:

- efektivita TCSC pro regulaci kolísání výkonu s většími hodnotami výkonového převodu,
- tlumící efekt TCSC neovlivňuje umístění TCSC,
- tlumící efekt není citlivý na charakter zátěže. [9][10]

2.2.3 PST

PST je transformátor s regulací napětí a fáze využívaný k řízení výkonových toků na vedení. Je složený ze sériové a regulační jednotky. Vinutí sériové jednotky je umístěno přímo na napětí sítě. Na tomto vinutí dochází k výslednému fázovému posunu – k vstupnímu/výstupnímu napětí se přidává fázově posunuté regulační napětí. Regulační transformátor s přepínačem odboček je napájen z odbočky sériového vinutí a umožňuje regulaci. [10]

V elektrizační soustavě ENTSO-E se PST transformátory hojně využívají k přerozdělování toku výkonů mezi přenosovými vedeními tak, aby nepřetěžovaly některé přenosové profily. V současné době je v České republice ve výstavbě do budoucna velmi významný PST transformátor v Hradci u Kadaně a do provozu by měl být uveden do konce roku 2016. Bude sloužit k omezení výkonových toků, přitékajících z Německa, které jsou způsobeny proměnnou dodávkou elektrické energie ze solárních a větrných zdrojů. V praxi by tyto transformátory měli omezit přetok nad 1000 MVA, což by řešilo kritické situace, které jsou s vysokými přetoky očekávány.



Obr. 2.2. – Schéma transformátoru s úhlovou regulací (PST) [6]

2.2.4 STATCOM

STATCOM – statický synchronní kompenzátor, pracuje na principu podobné SVC, ale díky trojfázovému měniči a stejnosměrné větvi má lepší provozní charakteristiky a nepotřebuje velké indukční či kapacitní prvky, proto může mít podstatně menší rozměry. Vyrábí tři sinusová napětí se základní frekvencí a možností regulace amplitudy i fázového posunu. Díky své konfiguraci může být zdrojem i spotřebičem jalového výkonu. Mezi výhody

STATCOMU patří dynamické řízení napětí a jeho stabilizace v elektrizačních sítích, zlepšování parametrů elektrické energie, možnost řízení činného i jalového výkonu. [12]

2.2.5 SSSC

Napěťový měnič může být použitý v sériovém zapojení ve výkonovém přenosovém systému. Takovýto přístroj je označován jako statický synchronní sériový kompenzátor – SSSC. Při připojení ke zdroji, dokáže řídit činný i jalový výkon, podobně jako zařízení STATCOM. Působí jako do série připojený kondenzátor nebo cívka v závislosti na regulačním napětí, kterým ovlivňuje vedení. Svými vlastnostmi dokáže měnit reaktanci a tak snižovat či zvyšovat přenosovou schopnost vedení. Jejich typickou funkcí je regulace a stabilizace napětí v síti, řízení toků výkonu a omezení vlivů harmonických pomocí filtrace. [12]

2.2.6 UPFC

UPFC (Univerzální regulátor výkonu) regulátor je kombinací dvou zařízení – kombinuje funkce příčně zapojeného zařízení STATCOM se sériově zapojeným SSSC. Skládá se z dvou trojfázových měničů, které jsou vzájemně propojeny stejnosměrným obvodem. K vedení jsou poté připojeny pomocí přidavných transformátorů. Umožňuje regulaci všech parametrů – uzlového napětí, impedance vedení, fázového posunu. Dokáže také dodávat i spotřebovávat jalový výkon. Regulace činného výkonu je dosaženo pomocí sériově připojeného měniče, který přes transformátor ovlivňuje napětí na přenosovém vedení. [12]

3 Připojování zdrojů do distribuční soustavy

Pro připojování zdrojů do distribuční soustavy platí „Pravidla provozování distribučních soustav“ (PPDS). Tyto pravidla musí být vytvořena každým provozovatelem distribuční soustavy podle pokynů Energetického regulačního úřadu (vyhláška č.401/2010 Sb., která popisuje obsahové náležitosti těchto pravidel).

3.1 Pravidla provozování distribuční soustavy

Navazují na Pravidla provozování přenosové soustavy, aby byl zajištěn spolehlivý provoz celé elektrizační soustavy. Vznikly pro zjednodušení orientace zákazníků a výrobců v oblasti distribuce elektrické energie. Stanovují technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatelů k distribuční soustavě a pro její užívání. Vycházejí ze zákona 458/2000 Sb. a musí být schváleny Energetickým regulačním úřadem. Jejich účelem je zajistit, aby se provozovatel i každý uživatel podíleli na udržování sítě v dobrých provozních podmínkách a aby byli schopni zabránit vzniku poruchy, případně jejímu šíření.

3.2 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele DS

Jedná se o přílohu č. 4 k PPDS . Platí pro plánování, zřizování, provoz a úpravy zdrojů elektřiny připojených k sítím nn, vn či vvn. Mezi tyto zdroje patří – vodní, větrné, geotermální, solární elektrárny, generátory poháněné tepelnými stroji. Projektování, výstavbu a připojení výroby k síti je nutné zadat odborné firmě a je zapotřebí souhlas provozovatele distribuční soustavy. Zdroje musí být schopny dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí $\cos \varphi = 0,85$ až 1 (dodávka jalového výkonu) a $\cos \varphi = 1$ až 0,95 (odběr jalového výkonu). Zdroje musí být provozovatelné i se sníženým činným výkonem. Provozovatel distribuční sítě má právo vyžadovat omezení dodávaného činného výkonu, nebo jeho úplné odpojení. Nezasahuje však do vlastní výroby, pouze zadá požadovanou hodnotu v přípojném bodě sítě (např. na 60, 30, nebo 0% instalovaného výkonu) a dodávaný výkon musí být snížen na tuto hodnotu neprodleně, maximálně v průběhu jedné minuty. Musí být technicky možné snížit i na hodnotu 0% instalovaného výkonu, bez jeho odpojení, a to z důvodu napájení její vlastní spotřeby.

3.3 Požadavky na zdroje

Zdroje elektřiny s instalovaným výkonem 100 kW a výše musí být vybaveny zařízeními, která umožňují jejich dispečerské řízení. Jalový výkon musí být využitelný během několika minut a to libovolně často. Při dodávání činného výkonu do sítě je jalový výkon zadáván provozovatelem distribuční soustavy na stálou hodnotu, nebo na dálkově nastavitelnou požadovanou hodnotu. [13]

Požadavky pro zdroje připojované do sítí VN nebo 110 kV:

- udržování pevné hodnoty zadaného účinníku $\cos \varphi$,
- udržování hodnoty účinníku $\cos \varphi = f(P)$,
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu,
- udržování zadané hodnoty napětí,
- charakteristika $Q(U)$.

Další požadavky pro zdroje s výkonem nad 15 MW:

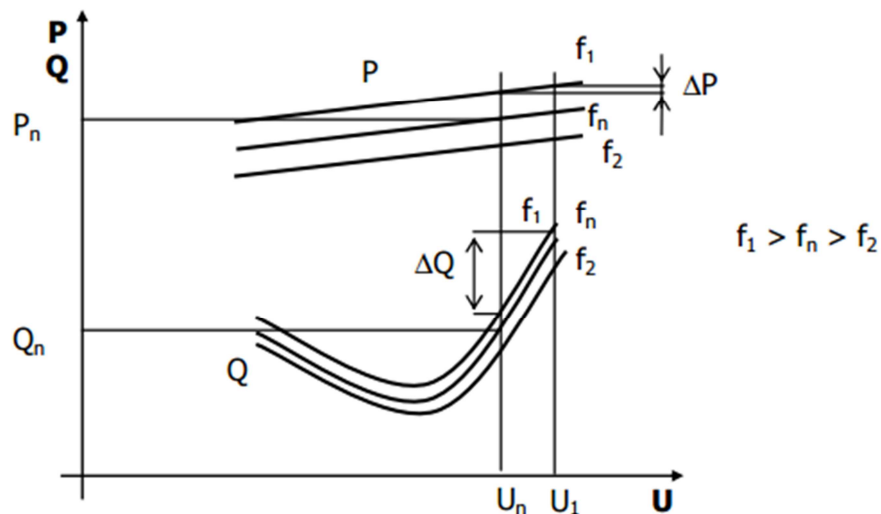
- nesmí dojít k odpojení elektrárny od sítě,
- musí udržovat napětí při jeho poklesech.

3.3.1 Přihlašovací zařízení

Pro přihlášení je třeba podat žádost o připojení, katastrální mapu s vyznačením pozemku, výpis z katastru nemovitostí, údaje o zkratové odolnosti, popis ochran s doplňujícími údaji, příspěvek vlastní výroby k počátečnímu zkratovému proudu v místě připojení k síti, u střídačů a měničů impedance pro frekvence HDO (183-283 Hz) a především dotazník s technickými údaji o zařízení, jehož vzor se nachází také v příloze č. 4 PPDS.

4 Řízení elektrizační soustavy

Pro zabezpečení stability celé elektrizační soustavy je nutné sledovat jeden z jejích hlavních parametrů a tím je napětí. V České republice se používá k regulaci napětí tříступňová hierarchie, kterou detailněji rozeberu dále v podkapitolách. V současné době se elektrizační soustava, zejména její distribuční síť, začala mohutně rozrůstat o další zdroje elektrické energie, kterými jsou většinou dopředu nepředvídatelné zdroje energie, které mají vliv na regulační systém napětí v elektrizační soustavě. Za tyto nepředvídatelné zdroje energie jsou považovány hlavně fotovoltaické a větrné elektrárny. Jednou z možností, jak regulovat napětí v uzlech sítě je regulace toků jalového výkonu. Regulace jalového a činného výkonu je prováděna dispečerským řízením provozovatelem distribuční soustavy, které je dáno novelou energetického zákona č. 211/2011 Sb. platnou od 18. srpna 2011. Hlavním úkolem řízení elektrizační soustavy je tedy hospodárně dodávat činný a jalový výkon.



Obr. 4.1. – Statické charakteristiky zátěže [6]

Z obr. 4.1. vyplývá, že charakteristiky pro činné výkony P leží daleko od sebe, to znamená, že při změně frekvence f se značně změní i činný výkon, naopak při změně napětí U se činný výkon mění jen nepatrně. Charakteristiky pro jalový výkon Q , leží podstatně blíže, to tedy znamená, že při změně frekvence f se jalový výkon příliš nemění, ale při změně napětí U se jalový výkon mění rychleji. Klíčovými parametry jsou tedy frekvence – globální parametr, a velikost napětí – lokální parametr. Frekvenci v elektrizační soustavě charakterizuje vyrovnanost činných výkonů v celé soustavě a napětí charakterizuje vyrovnanost jalových výkonů jen v dané oblasti. Mezi další parametry patří obsah vyšších harmonických a případná

nesymetrie napětí. Přenos jalového výkonu v ES způsobuje v úbytky napětí a jalové ztráty z důvodu velké reaktance vedení a transformátorů. Jestliže je generovaný velký jalový výkon v jednom uzlu ES, ještě neznamena, že bude potřebné napětí i v ostatních uzlech. V tomto případě je nutné dodržet bilanci jalových výkonů v každém uzlu soustavy zvlášť. Tyto uzly se nazývají pilotními a jsou blíže popsány v kapitole 4.1.1.

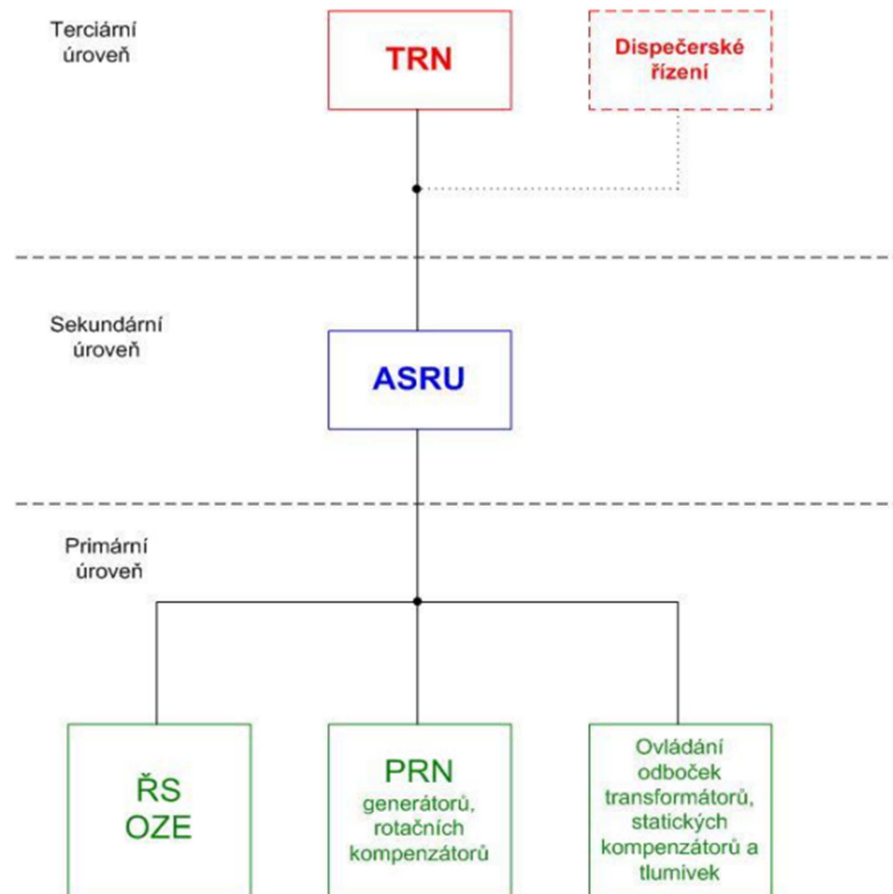
Hladinu napětí v místě elektrizační soustavy lze měnit změnou jalového výkonu a to buď na straně odběru pomocí kompenzace, nebo na straně dodávky – výroba, regulační prostředky soustavy. Napětí v uzlech přenosové soustavy se musí držet v povoleném rozsahu. Pro hladinu 400 kV \pm 5%, pro 220 kV \pm 10% a pro hladinu 110 kV \pm 10%. Jalové výkony by neměli protékat do dalších ES. Regulací by se měli snížit ztráty přenosem elektřiny ke spotřebitelům.

V České republice se v elektrizační soustavě používá třístupňová hierarchie pro řízení napětí:

- primární regulace napětí – na úrovni jednoho bloku výroby (elektrárny, teplárny nebo závodní elektrárny).
- sekundární regulace napětí – na úrovni jednoho uzlu soustavy.
- terciální regulace napětí – na úrovni celé regulované soustavy.

Je výhodné mít jalový výkon a napětí pod dispečerskou kontrolou a to především pro:

- snížení technických ztrát – zvýšení hospodárnosti provozu,
- snížení fluktuace napětí – zlepšení kvality dodávky elektřiny konečnému odběrateli,
- zvýšení bezpečnosti provozu elektrizační soustavy – vyšší odolnost vůči napět'ovému kolapsu,
- eliminaci negativních zpětných vlivů na elektrizační soustavu,
- snížení počtu regulací transformátorů,
- snížení nákladů na kompenzační prostředky. [14]



Obr. 4.2. – Hierarchická struktura Systému regulace U a Q v DS 110kV [14]

4.1.1 Metoda pilotních uzlů

Pilotní uzel je základním bodem napěťové stability v regulované soustavě, je v něm možné bezpečně měnit napětí (stabilizovat na požadované hodnotě) změnou dodávky jalového výkonu, bez nutnosti sledování napěťových poměrů v blízkých uzlech. Soustava mu není schopna dlouhodobě vnútit jiné napětí, než na jaké je nastaven, protože je schopen rychle vyrovnávat bilanci jalového výkonu změnou dodávky jalového výkonu připojených akčních členů. Tím se eliminují odchylky od požadované hodnoty napětí. Musí disponovat dostatkem regulačního výkonu na akčních členech připojených do uzlu, při vyčerpání těchto zásob jalového výkonu ztrácí schopnost pilotního uzlu.[17]

V České republice je v současné době zřízeno deset pilotních uzlů, které používají systém ASRU, patří mezi ně rozvodny: Týnec, Výškov, Krasíkov, Mělník, Hradec u Kadaně, Slavětice, Kočín, Chotějovice, Milín a Vítkov.

4.2 Terciální regulace napětí a jalových výkonů

Terciální regulace je centralizovaná služba, která v reálném čase koordinuje toky jalových výkonů a velikosti napětí pro bezpečný a ekonomický provoz elektrizační soustavy. Musí pracovat automaticky, protože dispečer není schopen určovat zadaná napětí v pilotních uzlech a optimalizovat koordinaci regulačních prostředků, která se provádí nastavením odboček transformátorů a použitím kompenzačních prostředků. Základním kritériem této regulace je minimalizace technických ztrát v regulované soustavě. Proto jsou stanoveny podmínky, které musí být v pilotních uzlech dodržovány:

- tolerance napětí v uzlech – minimální a maximální hodnoty,
- toky jalového výkonu nesmí téct v případě přenosové soustavy přes hraniční vedení, nebo přes transformátory PS/110 kV,
- při regulaci se respektují aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu pro jednotlivé pilotní uzly,
- další omezovací podmínky podle konkrétních místních podmínek.

4.3 Sekundární regulace napětí (ASRU)

Systém ASRU se postupně zavedl v přenosové a částečně i distribuční soustavě České republiky během posledních dvaceti let. Přenos jalového výkonu způsobuje velké úbytky napětí a jalové ztráty, hlavní příčinou jsou velké reaktance vedení a transformátorů. Systém má za úkol průběžně vyrovnávat bilanci jalového výkonu ve vybraných uzlech soustavy na požadované hodnotě napětí. Tyto uzly se nazývají pilotní a jsou do nich přivedeny výkony větších elektráren různých typů, případně i kompenzační prostředky. Tím je docíleno řízení dodávky jalového výkonu a stabilizování napěťových poměrů. Regulační proces by měl být aperiodický, maximálně s jedním překmitem a doba regulace by měla trvat méně než 120 sekund. Sekundární regulace napětí se dále dělí na:

- automatické regulátory napětí (ARN), které reagují na odchylku napětí U od zadané hodnoty v pilotním uzlu elektrizační soustavy a určují potřebný jalový výkon Q pro vyrovnání odchylky. Akční veličinou je změna zadané hodnoty vyráběného jalového výkonu (pomocí sekundárního regulátoru jalového výkonu SQR) nebo změna napětí primárních regulátorů (PRN),

- automatické regulátory odboček síťových transformátorů: hladinová regulace transformátorů: hladinová regulace transformátoru (HRT) s cílem udržet hladinu napětí sekundární strany na zadané hodnotě. [18]

Základní rovnice regulace U a Q:

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (4.1.)$$

- ΔU_i ... změna napětí v uzlu i,
- a_{ij} konstanta citlivosti změny napětí na změnu jalového výkonu v uzlu j,
- ΔQ_j ... změna jalového výkonu v uzlu j. [14]

Ze vztahu (4.1.) vyplývá, že pro změnu napětí v libovolném uzlu soustavy je potřeba provést změnu jalového výkonu v některém z pilotních uzlů v této soustavě. Tato změna napětí závisí kromě změny velikosti jalového výkonu také na velikosti citlivostní konstanty mezi těmito dvěma uzly soustavy.

4.4 Primární regulace napětí

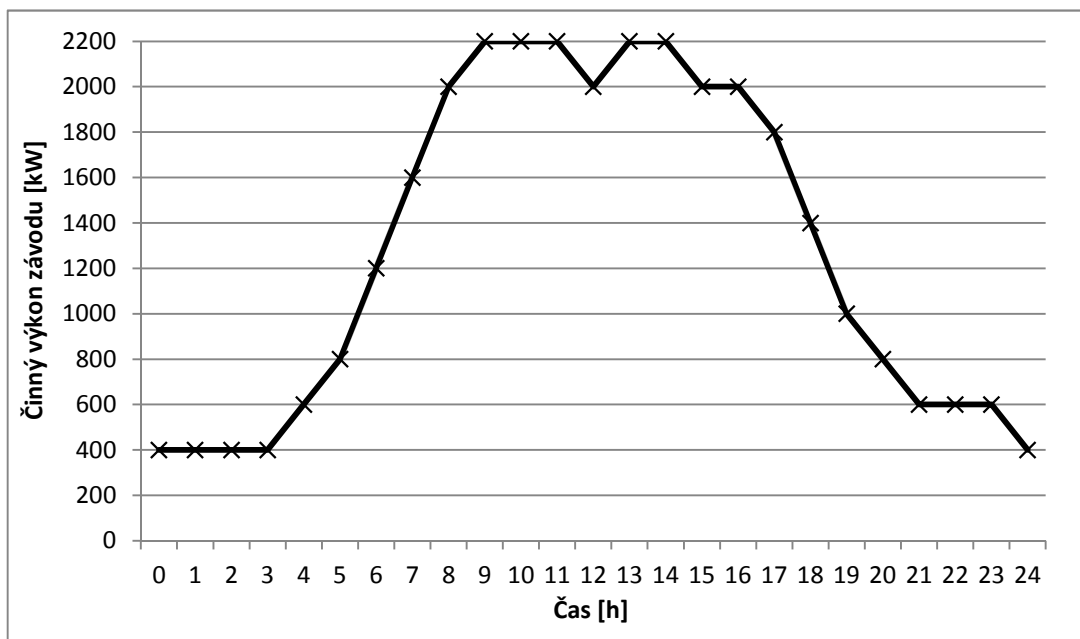
Primární regulace napětí je součástí budících obvodů generátorů. Jejím úkolem je udržovat svorkové napětí generátorů změnou jejich buzení. Umožňuje regulaci jalového výkonu a účinníku s dálkově nebo místně zadávanou hodnotou. Regulace musí reagovat v čase 1-2 sekundy na změnu zátěže, přechodové jevy a topologii systému. Působí jen lokálně a ovlivňuje stabilitu celého systému a to nastavením mezí pro maximální proud statoru, rotoru nebo buzení. Blokované transformátory sloužící pro vyvedení výkonu do pilotního uzlu jsou v elektrizační soustavě České republiky většinou bez možnosti regulace odboček pod zatížením. V těchto případech působí z hlediska ASRU jako pasivní prvky, s tím, že ovlivňují velikost použitelných součástek.

Všechny elektrárny s instalovaným výkonem nad 100 MW mají zapojeny automatické regulátory buzení. Tyto regulátory pak zajišťují:

- zadanou hodnotu napětí na svorkách generátoru
- rychlou změnou buzení zvyšovat stabilitu strojů v průběhu přechodného děje,
- tlumit kývání v elektrizační soustavě,
- udržování pracovního bodu v dovolené oblasti P-Q diagramu. [19]

5 Případová studie průmyslového závodu s připojenou FVE

Zadání konkrétní situace jsem konzultoval s panem Ing. Žákem. Navrhl jsem průmyslový závod se stálým výkonem od 0,4 MW do 2,2 MW, který je závislý na čase (obr. 5.1.). Výkon se v průběhu dne mění z důvodu zapínání a vypínání velkých strojů a zařízení, pracuje s účinníkem 0,8 induktivním a v celém závodu je nataženo 15 km kabelu s průřezem 120 mm². Závod je připojen k distribuční síti přes transformátor 110/22 kW třífázovým vedením o délce 5 km a průřezu 240 mm². Závod se rozhodl pořídit a připojit fotovoltaickou elektrárnu, aby tak snížil odebíraný výkon ze sítě. Fotovoltaická elektrárna dodává proud v závislosti na tom, kolik je zrovna aktivních panelů. Výpočty a grafy jsem zpracoval v tabulkovém editoru MS Excel. Soubor s těmito výpočty se nachází na přiloženém CD a celé tabulky s výpočty jsou přiloženy v přílohách.



Obr. 5.1. – Denní diagram zatížení závodu

Vedení, kterým je závod připojen k distribuční síti jsem nahradil T-článkem a parametry kabelu 22-AXEKVCEY jsem našel na internetových stránkách firmy NKT cables. Po závodu je rozvedeno dalších 15 km kabelu, jehož kapacitu C_k nelze zanedbat.

V tabulce č.1 uvádím parametry kabelu, který je použit na vedení elektřiny od transformátoru do závodu a vypočtené hodnoty, které jsem přepočítal na délku kabelu. Dále v tabulce č.2 jsou uvedeny parametry kabelu, který je rozveden po závodě.

Tab. 1 – Parametry kabelu vedení

Kabel - vedení 22-AXEKVCEY			
I	5 km		
S	3x240 mm ²		
R _K	0,125 Ω/km		
L _K	0,57 mH/km		
C _K	0,3 μF/km		
R _V	0,625 Ω		R _{V/2} 0,3125 Ω
L _V	2,85 mH	X _{LV} 0,9i Ω	X _{LV/2} 0,45i Ω
C _V	1,5 μF	X _{CV} -2122,07i Ω	

$$R_V = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 5 = 0,625 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.1.)$$

$$L_V = L_k \cdot l = 0,57 \cdot 5 = 2,85 \text{ (mH)} \quad (5.2.)$$

$$C_V = C_k \cdot l = 0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ (}\mu\text{F)} \quad (5.3.)$$

$$X_{LV} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_V = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot i = 0,9i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.4.)$$

$$X_{CV} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_V} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot i} = -2122,07i \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.5.)$$

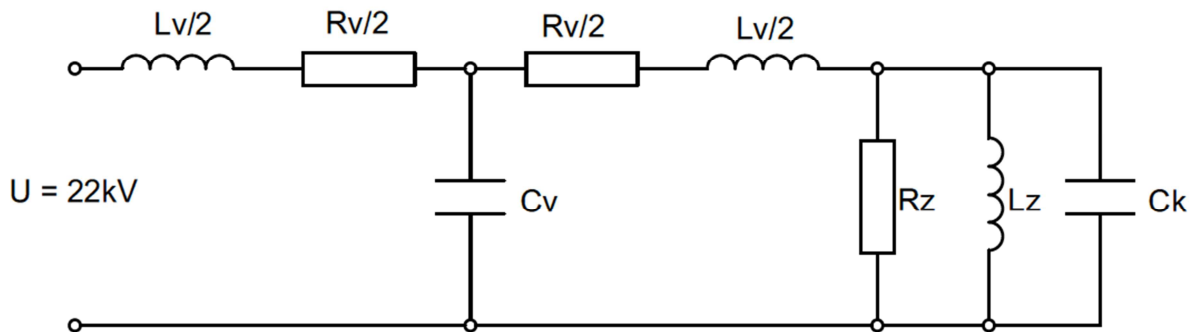
Tab. 2 – Parametry kabelu rozvedeného po závodě

Kabel -závod 22-AXEKVCEY			
I	15 km		
S	3x120 mm ²		
R _K	0,253 Ω/km		
L _K	0,64 mH/km		
C _K	0,23 μF/km		
R	3,795 Ω		
L	9,6 mH		
C	3,45 μF	X _{CK} -922,64i Ω	

Pro výpočet hodnot kabelu – R,L,C,X_{CK}, který je natažen po celém závodě jsem použil vztahy (5.1), (5.2), (5.3) a (5.5), do kterých jsem dosadil parametry tohoto kabelu.

5.1 Závod připojený k distribuční síti, bez připojené FVE

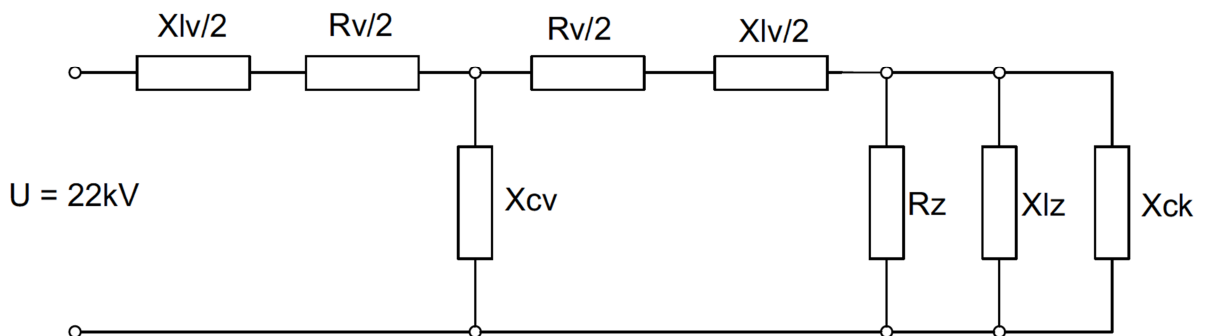
Odběr závodu jsem nahradil odporem R_z a indukčností L_z (X_{Lz}), které jsem přepočítal dle vztahů (5.6.) a (5.7.). Následuje vzorový výpočet pro maximální odebíraný výkon 2 200 kW, ostatní výpočty jsou provedeny v příloženém souboru MS Excel a tabulky jsou uvedeny na konci v přílohách.



Obr. 5.2. – Náhradní schéma závodu a připojeného vedení

$$R_z = \frac{U^2}{P} = \frac{\left(\frac{22\,000}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{2\,200\,000}{3}} = \frac{(12701,71)^2}{\frac{2\,200\,000}{3}} = 220 \text{ } (\Omega) \quad (5.6.)$$

$$X_{Lz} = \frac{U^2}{Q} \cdot i = \frac{\left(\frac{22\,000}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{1\,650\,000}{3}} \cdot i = \frac{(12701,71)^2}{\frac{1\,650\,000}{3}} \cdot i = 293,33i \text{ } (\Omega) \quad (5.7.)$$



Obr. 5.3. – Náhradní schéma s přepočtenými parametry

Dále jsem provedl výpočet celkové impedance tohoto obvodu, nejdříve provedu paralelní kombinací R_Z , X_{LZ} a X_{CK} , tuto impedanci jsem nazval Z_Z :

$$Z_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{X_{LZ}} + \frac{1}{X_{CK}}} = \frac{1}{\frac{1}{220} + \frac{1}{293,33i} + \frac{1}{-922,64i}} = (174,37 + 89,2i) (\Omega) \quad (5.8.)$$

K této impedanci Z_Z je sériově připojena kombinace $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$, výslednou impedanci jsem nazval $Z_{Z_LR_pul}$:

$$Z_{ZLRpul} = Z_Z + \frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} = (174,37 + 89,2i) + 0,3125 + 0,45i = (174,68 + 89,65i) (\Omega) \quad (5.9.)$$

Nakonec jsem k této impedanci $Z_{Z_LR_pul}$ udělal paralelní kombinaci s reaktancí X_{CV} a následně sériovou kombinaci a prvky vedení $X_{LV/2}$ a $R_{V/2}$, výslednou impedanci jsem nazval $Z_{celkova}$:

$$Z_{celkova} = \frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} + \frac{Z_{ZLRpul} \cdot X_{CV}}{Z_{ZLRpul} + X_{CV}} = 0,3125 + 0,45i + \frac{(174,68 + 89,65i) \cdot (-2122,07i)}{(174,68 + 89,65i) + (-2122,07i)} = (189,35 + 77,8i) (\Omega) \quad (5.10.)$$

Nyní, když znám impedanci celého obvodu, mohu vypočítat proud přitékající do obvodu ze sítě:

$$I_s = \frac{U}{Z_{celkova}} = \frac{12701,71}{(189,35 + 77,8i)} = (57,39 - 23,58i) (A) = 62,05 (A) \quad (5.11.)$$

Z toho jsem zjistil napětí na $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$, toto napětí jsem označil U_{V1} :

$$U_{V1} = I_s \cdot \left(\frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (57,39 - 23,58i) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (28,54 + 18,46i) (V) \quad (5.12.)$$

Rozdíl napětí sítě a tohoto napětí určuje napětí na reaktanci X_{CV} :

$$U_{XCV} = U - U_{V1} = 12701,71 - (28,54 + 18,46i) = (12673,16 - 18,46i) (V) \quad (5.13.)$$

Dále jsem spočetl proud I_Z , který přitéká do uzlu:

$$I_Z = \frac{U_{XCV}}{Z_{ZLRpul}} = \frac{12673,16 - 18,46i}{174,68 + 89,65i} = (57,38 - 29,56i) (A) = 64,54 (A) \quad (5.14.)$$

Tento proud způsobuje napětí na prvcích vedení $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$:

$$U_{V2} = I_Z \cdot \left(\frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (57,38 - 29,56i) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (31,23 + 16,59i) \text{ (V)} \quad (5.15.)$$

Výsledné napětí na zátěži je:

$$U_Z = I_Z \cdot Z_Z = (57,38 - 29,56i) \cdot (174,37 + 89,2i) = (12641,93 - 35,04i) \text{ (V)} = 12641,98 \text{ (V)} \quad (5.16.)$$

Dále jsem spočítal odebíraný činný a jalový výkon odebíraný ze sítě:

$$\varphi_s = \arctg \left(\frac{IM_{Z_{celkova}}}{RE_{Z_{celkova}}} \right) = \arctg \left(\frac{77,8}{189,35} \right) = 22,34^\circ \rightarrow \cos \varphi = 0,92 \text{ (-)} \quad (5.17.)$$

$$P_s = 3 \cdot U \cdot I_s \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 12701,71 \cdot 62,05 \cdot \cos 22,34^\circ = 2186,87 \text{ (kW)} \quad (5.18.)$$

$$Q_s = 3 \cdot U \cdot I_s \cdot \sin \varphi = 3 \cdot 12701,71 \cdot 62,05 \cdot \sin 22,34^\circ = 898,64 \text{ (kVAr)} \quad (5.19.)$$

Následně jsem provedl výpočet ztrát na vedení:

$$P_z = 3 \cdot \left(\frac{R_V}{2} \cdot I_S^2 + \frac{R_V}{2} \cdot I_Z^2 \right) = 3 \cdot (0,3125 \cdot 62,05^2 + 0,3125 \cdot 64,54^2) = 7,52 \text{ (kW)} \quad (5.20.)$$

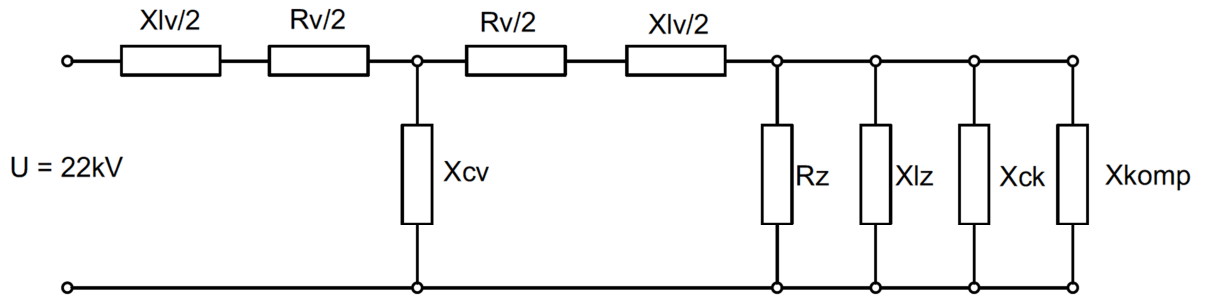
Úbytek napětí jsem vypočetl jako rozdíl absolutních hodnot U a U_Z :

$$\Delta U = U - U_Z = 12701,71 - 12641,98 = 59,73 \text{ (V)} \quad (5.21.)$$

V příloze č. 1. uvádím grafy ztrát a úbytku napětí na vedení v závislosti na odebíraném výkonu.

5.2 Provedení kompenzace na účinník $\cos \varphi=1$

K závodu nyní připojím paralelně kompenzační zařízení (obr.5.4.) takové velikosti, aby byl odebíraný účinník $\cos \varphi = 1$, to znamená, že ze sítě bude odebírán jen činný výkon. Ze sítě je odebírán jalový výkon $Q_s=898,64$ kVAr, proto musím připojit takové zařízení, aby tento výkon vykompenzovalo.



Obr. 5.4. – Náhradní schéma s připojeným kompenzačním zařízením

$$X_{KOMP} = \frac{U_z^2}{\left(\frac{Q_s}{3}\right) \cdot i} = \frac{12641^2}{\left(\frac{898,64 \cdot 10^3}{3}\right) \cdot i} = -535,32i \quad (5.22.)$$

Dále probíhá výpočet velmi podobně jako v případě bez kompenzace. Nejdříve jsem vypočítal celkovou impedanci obvodu a to tak, že nejdříve paralelní kombinací R_z , X_{Lz} , X_{Ck} a nově připojeného kompenzačního zařízení X_{KOMP} :

$$Z_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_z} + \frac{1}{X_{Lz}} + \frac{1}{X_{Ck}} + \frac{1}{X_{KOMP}}} = \frac{1}{\frac{1}{220} + \frac{1}{293,33i} + \frac{1}{-922,64i} + \frac{1}{-535,32i}} = (217,79 + 21,9i) (\Omega) \quad (5.23.)$$

K této impedanci Z_z je sériově připojena kombinace $R_{v/2}$ a $X_{Lv/2}$:

$$Z_{ZLR_{pul}} = Z_z + \frac{R_v}{2} + \frac{X_{LV}}{2} = (217,79 + 21,9i) + 0,3125 + 0,45i = (218,1 + 22,36i) (\Omega) \quad (5.24.)$$

Nakonec jsem k této impedanci udělal paralelní kombinaci s reaktancí X_{Cv} a následně sériovou kombinaci a prvky vedení $X_{Lv/2}$ a $R_{v/2}$, výslednou impedanci jsem nazval $Z_{celkova}$:

$$Z_{celkova} = \frac{R_v}{2} + \frac{X_{LV}}{2} + \frac{Z_{ZLR_{pul}} \cdot X_{Cv}}{Z_{ZLR_{pul}} + X_{Cv}} = 0,3125 + 0,45i + \frac{(218,1 + 22,36i) \cdot (-2122,07i)}{(218,1 + 22,36i) + (-2122,07i)} = (220,71 + 0,15i) (\Omega) \quad (5.25.)$$

Nyní, když znám impedanci celého obvodu, mohu vypočítat proud přitékající do obvodu ze sítě:

$$I_s = \frac{U}{Z_{celkova}} = \frac{12701,71}{(220,71 + 0,15i)} = (57,55 - 0,04i) (A) = 57,55 (A) \quad (5.26.)$$

Z toho jsem zjistil napětí na $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$, toto napětí jsem označil U_{V1} :

$$U_{V1} = I_s \cdot \left(\frac{R_v}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (57,55 - 0,04i) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (18 + 25,88i) \text{ (V)} \quad (5.27.)$$

Rozdíl napětí sítě a tohoto napětí určuje napětí na reaktanci X_{CV} :

$$U_{X_{CV}} = U - U_{V1} = 12701,71 - (18 + 25,88i) = (12683,7 - 25,88i) \text{ (V)} \quad (5.28.)$$

Dále jsem vypočítal proud I_Z , který přitéká do uzlu:

$$I_Z = \frac{U_{X_{CV}}}{Z_{ZLR_{pul}}} = \frac{12683,7 - 25,88i}{218,1 + 22,36i} = (57,53 - 6,02i) \text{ (A)} = 57,85 \text{ (A)} \quad (5.29.)$$

Tento proud způsobuje napětí na prvcích vedení $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$:

$$U_{V2} = I_Z \cdot \left(\frac{R_v}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (57,53 - 6,02i) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (20,69 + 24,01i) \text{ (V)} \quad (5.30.)$$

Výsledné napětí na zátěži je:

$$U_Z = I_Z \cdot Z_Z = (57,53 - 6,02i) \cdot (217,79 + 21,9i) = (12663,02 - 49,89i) \text{ (V)} = 12663,11 \text{ (V)} \quad (5.31.)$$

Dále jsem vypočítal činný a jalový výkon odebíraný ze sítě:

$$\varphi_s = \arctg \left(\frac{I_{M_{z_{celkova}}}}{I_{R_{z_{celkova}}}} \right) = \arctg \left(\frac{0,15}{220,71} \right) = 0,04^\circ \rightarrow \cos \varphi \cong 1 \text{ (-)} \quad (5.32.)$$

$$P_s = 3 \cdot U \cdot I_s \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 12701,71 \cdot 57,55 \cdot \cos 0,04^\circ = 2192,9 \text{ (kW)} \quad (5.33.)$$

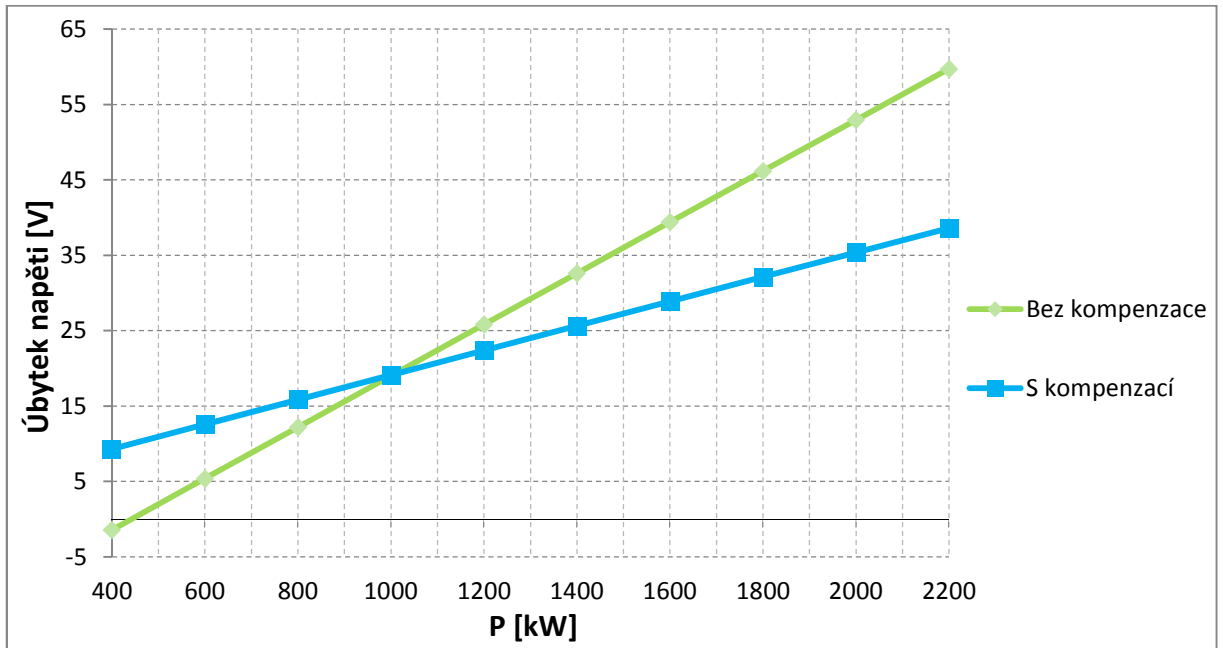
$$Q_s = 3 \cdot U \cdot I_s \cdot \sin \varphi = 3 \cdot 12701,71 \cdot 57,55 \cdot \sin 0,04^\circ = 1,52 \text{ (kVAr)} \quad (5.34.)$$

Následně jsem provedl výpočet ztrát na vedení:

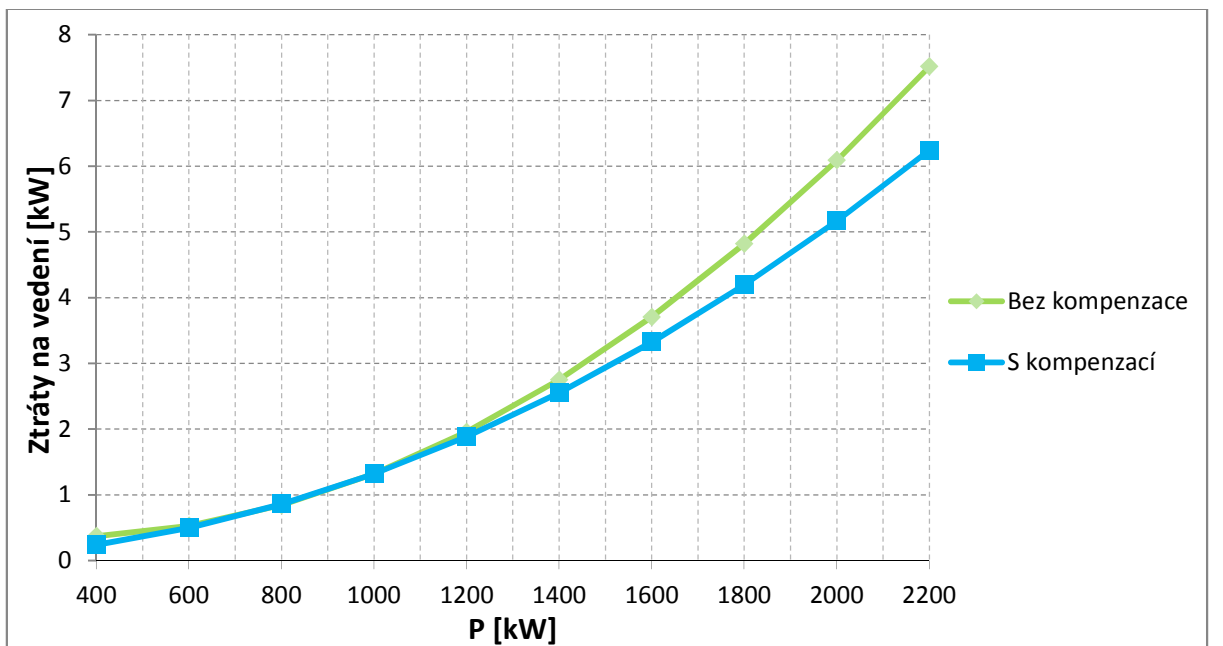
$$P_z = 3 \cdot \left(\frac{R_v}{2} \cdot I_s^2 + \frac{R_v}{2} \cdot I_z^2 \right) = 3 \cdot (0,3125 \cdot 57,55^2 + 0,3125 \cdot 57,85^2) = 6,24 \text{ (kW)} \quad (5.35.)$$

Úbytek napětí jsem vypočetl jako rozdíl absolutních hodnot U a U_Z :

$$\Delta U = U - U_Z = 12701,71 - 12663,11 = 38,59 \text{ (V)} \quad (5.36.)$$



Obr. 5.5. Závislost úbytku napětí na odebíraném výkonu



Obr. 5.6. Závislost ztrát na odebíraném výkonu

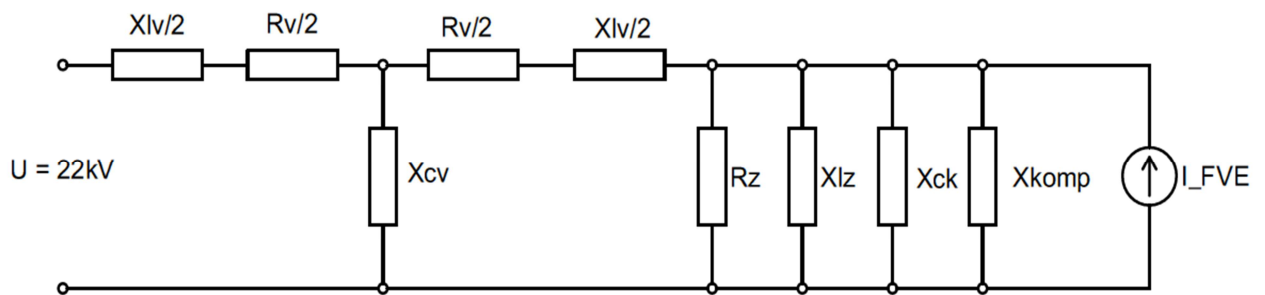
Z obrázku 5.5. je při plném zatížení 2200 kW patrný rozdíl úbytku napětí při provedení kompenzace na $\cos \varphi=1$ a bez této kompenzace přibližně o 35%., Tento rozdíl se při snižujícím výkonu zmenšuje a při výkonu 1000 kW je již ze sítě odebrán kapacitní jalový výkon, protože vlivem kapacit vedení a kabelu rozvedeném po závodě dojde k překompenzování. Při odebíraném výkonu 400 kW bez použití kompenzačního zařízení

dojde k Ferrantiho jevu, to znamená, že napětí na konci vedení je vyšší, než na jeho počátku. Odebíraný kapacitní jalový výkon je vyšší než výkon činný.

Ztráty na vedení jsou úměrné druhé mocnině protékajícího proudu. Z obrázku 5.6. vyplývá, že ztráty na vedení jsou při plném zatížení, v provedení bez kompenzace o 17% vyšší, než při vykompenzování na $\cos \varphi=1$. Tento rozdíl se při zmenšujícím zatížení snižuje z důvodu menšího proudu protékajícího obvodem.

5.3 Připojení FVE k průmyslovému závodu

Fotovoltaickou elektrárnu jsem nahradil proudovým zdrojem, který je závislý na tom, kolik je aktivních panelů. Pro výpočet jsem zvolil, že FVE dodává proud 30 A, tento proud jsem označil I_{FVE} , to odpovídá výkonu FVE přibližně 1100 kW.



Obr. 5.7. – Náhradní schéma s připojenou FVE

Jako první je třeba vypočítat metodou superpozice impedanci obvodu k proudovému zdroji, zdroj napětí nahradím zkratem a nejprve provedu sériovou kombinaci $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$, k tomu pak paralelně reaktanci X_{CV} :

$$Z_{XR/2} = \frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} + \frac{\left(\frac{X_{LV}}{2} + \frac{R_V}{2}\right) \cdot X_{CV}}{\left(\frac{X_{LV}}{2} + \frac{R_V}{2}\right) + X_{CV}} = 0,3125 + 0,45i + \frac{(0,3125 + 0,45i) \cdot (-2122,07i)}{(0,3125 + 0,45i) + (-2122,07i)} =$$

$$(0,625 + 0,9i) \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.37.)$$

K této impedanci jsou sériově připojeny prvky vedení $R_{V/2}$ a $X_{LV/2}$:

$$Z_V = Z_{XR/2} + \frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} = (0,625 + 0,9i) + 0,3125 + 0,45i = (0,938 + 1,35i) \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.38.)$$

Dále provedu postupně paralelní kombinace, pro výpočet výsledné impedance obvodu nazvané Z_{Z4} :

$$Z_{Z1} = \frac{Z_V \cdot R_Z}{Z_V + R_Z} = \frac{(0,938 + 1,35i) \cdot 224}{(0,938 + 1,35i) + 224} = (0,942 + 1,339i) (\Omega) \quad (5.39.)$$

$$Z_{Z2} = \frac{Z_{Z1} \cdot X_{LZ}}{Z_{Z1} + X_{LZ}} = \frac{(0,942 + 1,339i) \cdot 298,7i}{(0,942 + 1,339i) + 298,7i} = (0,933 + 1,336i) (\Omega) \quad (5.40.)$$

$$Z_{Z3} = \frac{Z_{Z2} \cdot X_{CK}}{Z_{Z2} + X_{CK}} = \frac{(0,933 + 1,336i) \cdot (-922,64i)}{(0,933 + 1,336i) + (-922,64i)} = (0,936 + 1,337i) (\Omega) \quad (5.41.)$$

$$Z_{Z4} = \frac{Z_{Z3} \cdot X_{KOMP}}{Z_{Z3} + X_{KOMP}} = \frac{(0,936 + 1,337i) \cdot (-535,32i)}{(0,936 + 1,337i) + (-535,32i)} = (0,94 + 1,338i) (\Omega) \quad (5.42.)$$

Dále spočítám přes proudový dělič proud, který dodává FVE do sítě:

$$I_1 = I_{FVE} \cdot \frac{X_{KOMP}}{X_{KOMP} + Z_{Z3}} = 30 \cdot \frac{(-535,32i)}{(-535,32i) + (0,936 + 1,337i)} = (30,07 - 0,05i) (A) \quad (5.43.)$$

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{X_{CK}}{X_{CK} + Z_{Z2}} = (30,07 - 0,05i) \cdot \frac{(-922,64i)}{(-922,64i) + (0,933 + 1,336i)} = (30,11 - 0,08i) (A) \quad (5.44.)$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{LZ}}{X_{LZ} + Z_{Z1}} = (30,11 - 0,08i) \cdot \frac{298,7i}{(298,7i) + (0,942 + 1,339i)} = (29,98 + 0,01i) (A) \quad (5.45.)$$

$$I_4 = I_3 \cdot \frac{R_Z}{R_Z + Z_V} = (29,98 + 0,01i) \cdot \frac{224}{(224) + (0,938 + 1,35i)} = (29,86 - 0,17i) (A) \quad (5.46.)$$

$$I_{SIT} = I_4 \cdot \frac{X_{CV}}{X_{CV} + (0,625 + 0,9i)} = (29,86 - 0,17i) \cdot \frac{(-2122,07i)}{(-2122,07i) + (0,938 + 1,35i)} = (29,86 - 0,17i) (A) \quad (5.47.)$$

Nyní, když mám vypočítané proudy z FVE, mohu je podle jejich orientace sečíst s proudy, které jsou odebírané ze sítě.

$$I_{VED1} = I_S - I_{SIT} = (57,55 - 0,04i) - (29,86 - 0,17i) = (26,66 + 0,93i) (A) = 26,67 (A) \quad (5.48.)$$

$$I_{VED2} = I_Z - I_4 = (57,53 - 6,02i) - (29,86 - 0,17i) = (26,65 - 5,05i) (A) = 27,13 (A) \quad (5.49.)$$

Z těchto proudů vypočítám napětí na vedení:

$$U_{V1} = I_{VED1} \cdot \left(\frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (26,66 + 0,93i) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (7,91 + 12,29i) (V) \quad (5.50.)$$

$$U_{V2} = I_{VED2} \cdot \left(\frac{R_V}{2} + \frac{X_{LV}}{2} \right) = (26,65 - 5,05) \cdot (0,3125 + 0,45i) = (10,6 + 10,42i) \text{ (V)} \quad (5.51.)$$

Výsledné napětí na zátěži je tedy:

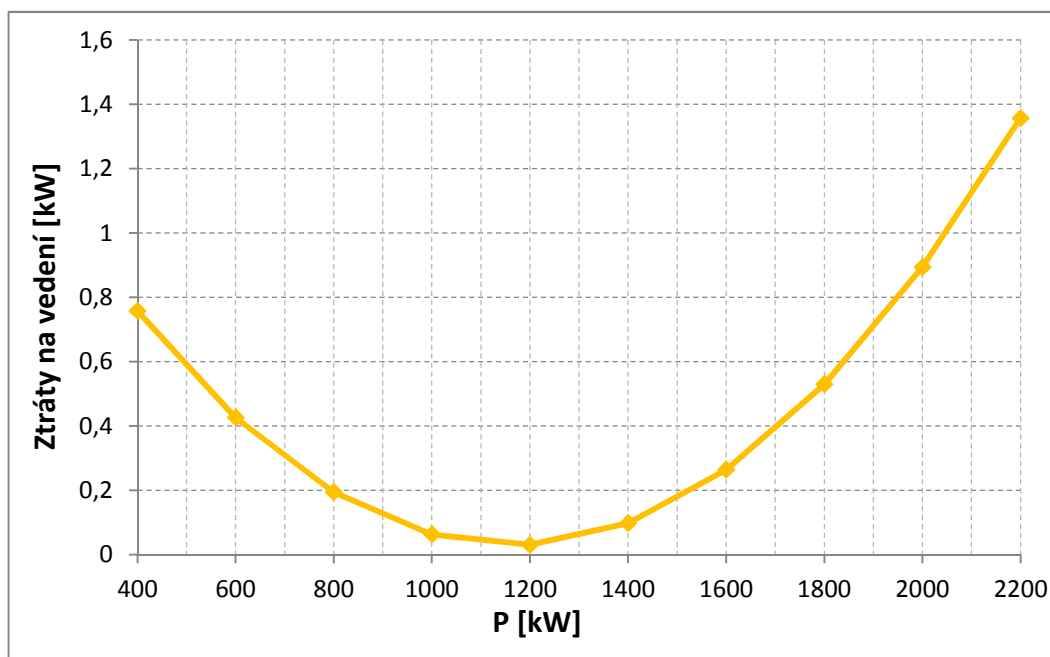
$$U_Z = U - (U_{V1} + U_{V2}) = 12701,71 - (7,91 + 12,29i + 10,6 + 10,42i) = (12683,19 - 22,7i) \text{ (V)} = 12683,2 \text{ (V)} \quad (5.52.)$$

Následně jsem provedl výpočet ztrát na vedení:

$$P_z = 3 \cdot \left(\frac{R_V}{2} \cdot I_{VED1}^2 + \frac{R_V}{2} \cdot I_{VED2}^2 \right) = 3 \cdot (0,3125 \cdot 26,67^2 + 0,3125 \cdot 27,13^2) = 1,36 \text{ (kW)} \quad (5.53.)$$

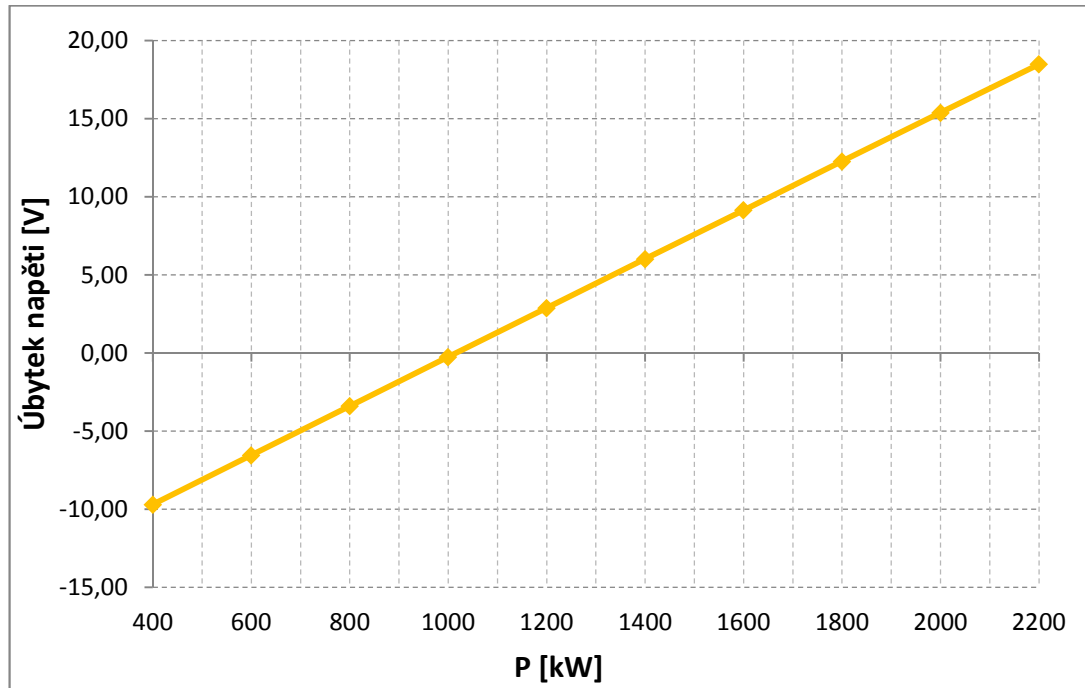
Úbytek napětí jsem vypočetl jako rozdíl absolutních hodnot U a U_Z:

$$\Delta U = U - U_Z = 12701,71 - 12683,2 = 18,5 \text{ (V)} \quad (5.54.)$$



Obr. 5.8. – Závislost ztrát na odebíraném výkonu s připojenou FVE

Obrázek 5.8. znázorňuje ztráty na vedení v závislosti na odebíraném výkonu s připojenou FVE. Tyto ztráty se zmenšily o 78% při plném výkonu 2200 kW oproti stavu bez připojené FVE, z důvodu menšího proudu protékajícího vedením. Při výkonu 1000 kW již dodávaný proud z FVE pokryje odběr závodu a navíc dodává proud do sítě.



Obr. 5.9. – Závislost úbytku napětí na odebraném výkonu s připojenou FVE

Obrázek 5.9. popisuje úbytek napětí v závislosti na odebraném výkonu s připojenou FVE. Při výkonu 2200 kW je úbytek napětí menší o 52% s připojenou FVE, než bez ní, z důvodu menšího proudu, který je odebírán ze sítě. Při odebraném výkonu 1000 kW a méně již dodává FVE větší proud, než je odebírán ze závodu, proto je tento proud dodáván do sítě. Ve vedení se tedy obrací směr proudu a to způsobuje, že se úbytek napětí zdá být záporný i když je to ve skutečnosti kladná hodnota.

5.3.1 Ekonomika provozu

Při nevykompenzování jalového výkonu je ze sítě odebírán větší proud, který způsobuje ztráty na vedení. Jelikož jsou tyto ztráty úměrné rezistivitě vedení a druhé mocnině proudu, dají se snížit buďto použitím kvalitnějšího kabelu s nižší rezistivitou, nebo snížením protékajícího proudu, v tom případě ztráty klesají s druhou mocninou. To je také jedním z důvodů, proč provádět kompenzaci, sníží se tak absolutní hodnota protékajícího proudu. Tyto ztráty je výhodné mít co nejmenší, neboť se také počítají jako odběr výkonu ze sítě a proto je třeba je zaplatit. Na internetu jsem našel cenu za elektřinu pro VN v distribučním území ČEZ, tato cena se skládá ze silové elektřiny a dalších poplatků za KVET+OZE, použití sítě atd. Celková cena je přibližně 1300 Kč/MWh, což je 1,3 Kč/kWh. Při maximálním odebraném výkonu činí rozdíl ztrát před a po kompenzaci 1,28 kW. To znamená, že za každou hodinu odebraného výkonu zaplatí závod o 1,6 Kč méně, což se nezdá tolik. Po

stanovení průměrného hodinového odběru 1333 kW a průměrných ztrát 0,57 kW vychází ušetřené náklady za rok přibližně 365 463 Kč, což již není zanedbatelná částka. Při připojení FVE dochází k zásadnímu snížení ztrát na vedení, kterým protéká proud ze sítě, jelikož je závod napájen z FVE. Ta ale bohužel nevyrábí elektřinu celoročně a je obtížné dopředu odhadnout, kdy bude vyrábět elektřinu. Proto nelze jednoznačně vypočítat ušetřené náklady.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval řízením jalového výkonu v malých zdrojích připojených do distribuční sítě. Řízení výkonů je důležité a to jak u velkých i malých elektráren, tak i v síti samotné. Hlavními důvody pro řízení jsou: stabilita celého systému, snížení technických ztrát a zajištění kvalitní dodávky elektřiny odběratelům. Za malé zdroje bývají nejčastěji považovány obnovitelné zdroje energie, které se v dnešní době mohutně rozrůstají a to hlavně větrné a fotovoltaické elektrárny (ale i spalovny biomasy a bioplynu) které jsou nejčastěji připojovány do distribuční soustavy. Tyto obnovitelné zdroje energie pracují spíše jako doplněk větších elektráren, ale jejich zastoupení se rapidně zvyšuje. Například v roce 2004 se podílely obnovitelné zdroje na celkové výrobě elektřiny z 3,8%, v roce 2010 už to bylo 8,3% a v roce 2014 už 13,1%. Z největší části se na výrobě této elektřiny podílely vodní elektrárny a bioplyn, následně až sluneční a větrné elektrárny. Pro připojení zdroje do distribuční sítě je potřeba zajistit, aby byly schopny dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí $\cos \varphi = 0,85$ až 1 (dodávka jalového výkonu) a $\cos \varphi = 1$ až 0,95 (odběr jalového výkonu). Dále je třeba zajistit, aby zdroje udržovaly pevnou hodnotu $\cos \varphi$ v závislosti na činném výkonu P , aby udržovaly zadanou hodnotu jalového výkonu a zadanou hodnotu napětí. Příloha č.4 Pravidel provozování distribuční soustavy určuje Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele DS. V této příloze jsou pokyny pro plánování, zřizování, provoz a úpravu zdrojů připojených k DS. Tyto pravidla vytvářejí samotní provozovatelé distribučních soustav. Provozovatel distribuční sítě má právo vyžadovat omezení dodávaného činného výkonu, nebo jeho úplné odpojení. Zdroje s instalovaným výkonem nad 100 kW musí být vybaveny dispečerským řízením.

Hladinu napětí v místě elektrizační soustavy lze měnit změnou jalového výkonu. V České republice se používá třístupňová hierarchie pro řízení napětí – primární, sekundární a terciální. Primární regulace pracuje na úrovni bloků elektráren, sekundární regulace pracuje na úrovni jednoho uzlu soustavy a terciální pracuje na úrovni celé regulované soustavy. V České republice je zřízeno deset pilotních uzlů se systémem automatické sekundární regulace. Úkolem těchto uzlů je stabilizace napětí na požadované hodnotě změnou dodávky jalového výkonu. Tyto uzly musí disponovat dostatkem regulačního výkonu na aktivních členech připojených do uzlu, při vyčerpání těchto zásob jalového výkonu ztrácí schopnost pilotního uzlu.

Pro určení vlivu jalového výkonu na parametry vedení jsem po konzultaci s panem Ing. Žákem zpracoval případovou studii připojeného průmyslového závodu k distribuční síti s připojenou fotovoltaickou elektrárnou (FVE). Nejprve jsem vypočítal ztráty vznikající na vedení k tomuto závodu a úbytek napětí na vedení. Poté jsem provedl připojení kompenzačního zařízení takové velikosti, aby byl $\cos \varphi = 1$. V tom případě je ze sítě odebírán jen činný výkon. Takto provedená kompenzace působí příznivě na ztráty i na úbytek napětí na vedení. Výsledky jsem zpracoval do grafů, které jsou přiloženy v příloze. Při plném zatížení, tzn. odběr výkonu 2200 kW, se ztráty na vedení snížily o 17% oproti stavu bez kompenzace. Úbytek napětí se po kompenzaci také snížil o 35%. Následně jsem k průmyslovému závodu připojil FVE, kterou jsem nahradil proudovým zdrojem dodávajícím 30 A, to odpovídá přibližně výkonu 1100 kW. FVE přispěla ke snížení proudu, odebíraného ze sítě, tím se snížili ztráty i úbytek napětí na vedení. Při výkonu závodu 1200 kW byl stále ze sítě odebírán relativně malý proud, při výkonu 1000 kW už byl ale do sítě dodáván. To znamená, že FVE pokryla celý odběr závodu a začala dodávat elektřinu do sítě. Ztráty na vedení způsobují to, že se ze sítě odebírá vyšší výkon, než je potřeba a tento rozdíl, tedy ztráty, je také třeba zaplatit distributorovi elektrické energie. Vypočítal jsem tedy průměrný hodinový odběr závodu - 1333 kW, z toho jsem určil roční ušetřenou částku na ztrátách při provedení kompenzace na $\cos \varphi = 1$. Tato částka činí přibližně 365 463 Kč.

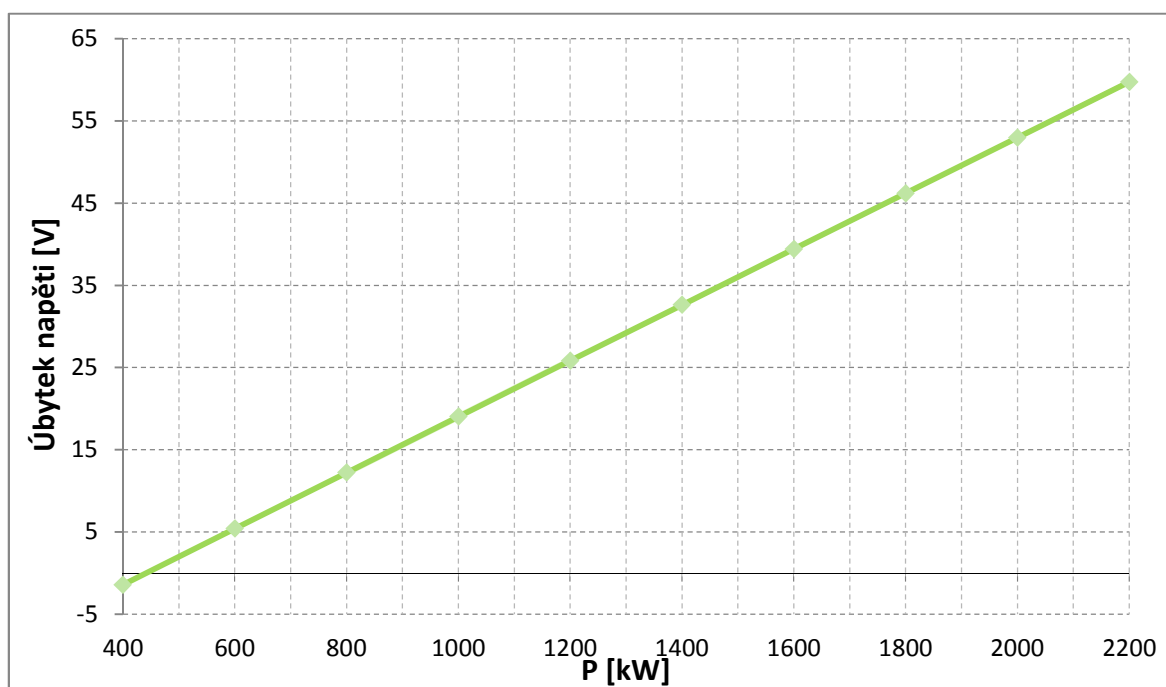
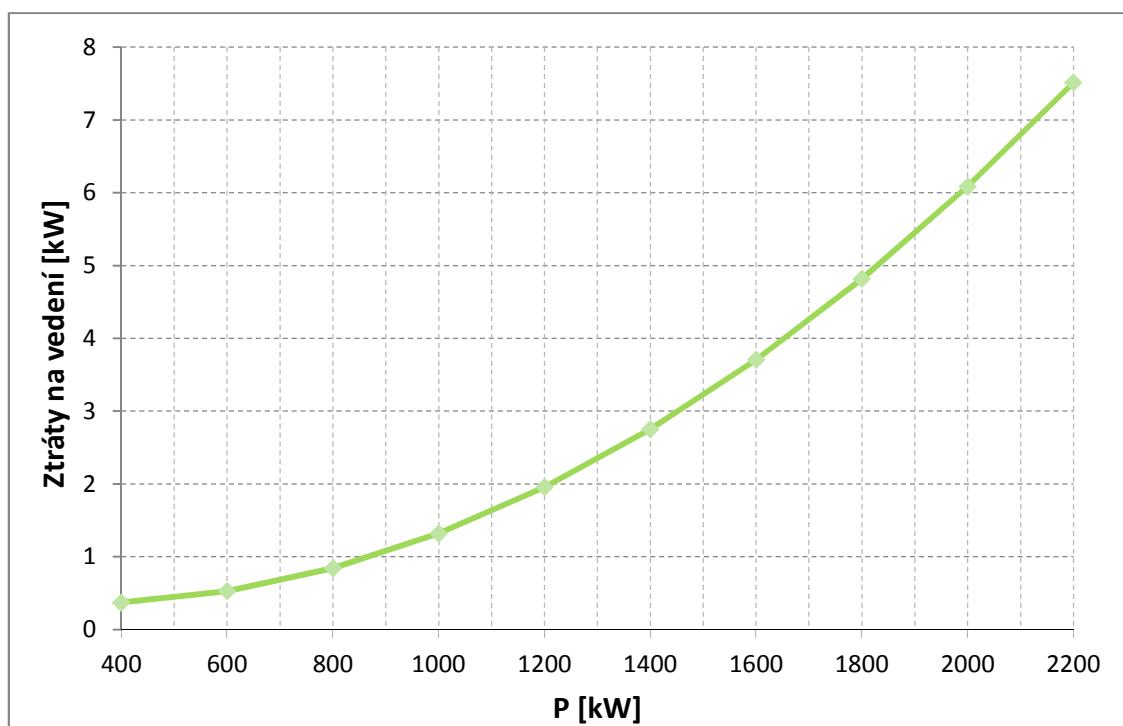
Seznam literatury a informačních zdrojů

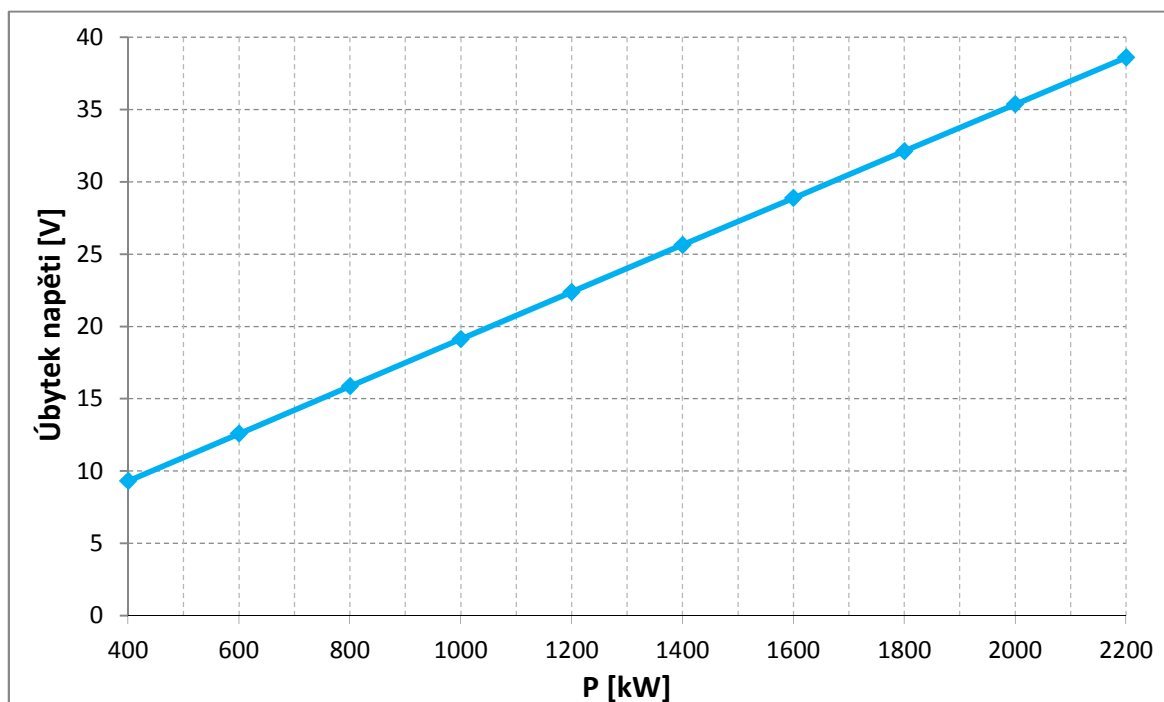
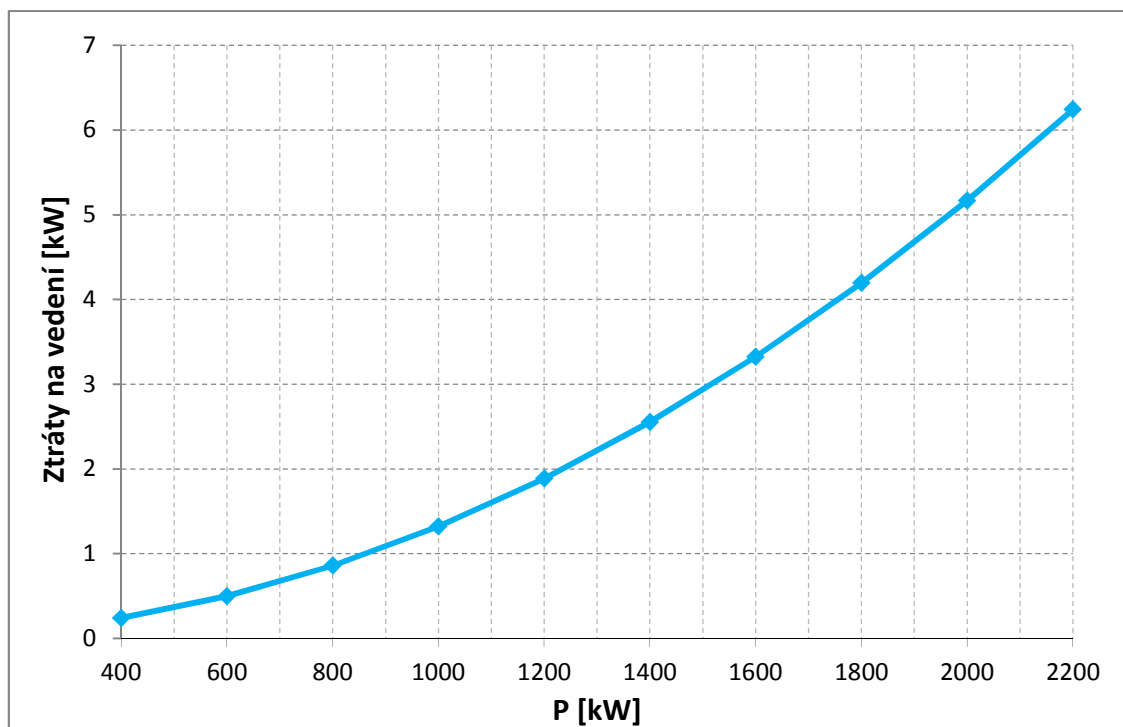
- [1] Studijní materiály z předmětu KEE/EE1, KEE/EE2
- [2] Čermák, Jiří, *Kvalita elektrické energie* [online]. 2015 [cit. 10.4.2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/kvalita-elektricke-energie/>
- [3] ČEZ DISTRIBUCE. 2016 [cit. 21.4.2016] Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/prehled-zatizeni-soustavy.html>
- [4] Ing. Karel Máslo, CSc., ČEPS, a.s. *Přednáška - Řízení frekvence* [online]. [cit. 21.4.2016]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/res/Prednaska_Rizeni_frekvence3_Maslo.pdf
- [5] *Distribuce elektřiny – kdo je kdo?* [online]. 2014 [cit. 25.4.2016]. Dostupné z : <http://www.elektrina.cz/data/images/article/76-map.png>
- [6] Doc. Ing. Emil Dvorský Csc. *Přednášky z předmětu Měření a regulace, ZČU.* [cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/>
- [7] MOLNÁR, Miloš. *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků* [online]. [cit.30.4.2016]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>
- [8] Majda, František. *Individuální kompenzace jalového výkonu.* [cit. 6.5.2016]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/individualni-kompenzace-jaloveho-vykonu--11095>
- [9] Blažek, Štefan. *Optimalizácia umiestneia pružných prenosových zariadení (FACTS) v elektrizačnej sústave Slovenska.* 2007 [cit. 6.5.2016]. Diplomová práce – Žilinská univerzita v Žilíně.
- [10] Budín, Jan. *Stavba ochranných PST transformátorů proti přetokům z Německa zahájena.* 3.6.2015 [cit. 6.5.2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/stavba-ochrannych-pst-transformatoru-proti-pretokum-z-nemecka-zahajena/>
- [11] Vybíralník, František. *Fázové transformátory – obrana elektrizační soustavy České republiky.* 7.2. 2014 [cit. 15.5. 2016]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/234-fazove-transformatory-obrana-elektrizacni-soustavy-ceske-republiky>
- [12] Majling, Eduard. *Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách.* 13.6.2015 [cit. 15.5.2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach>

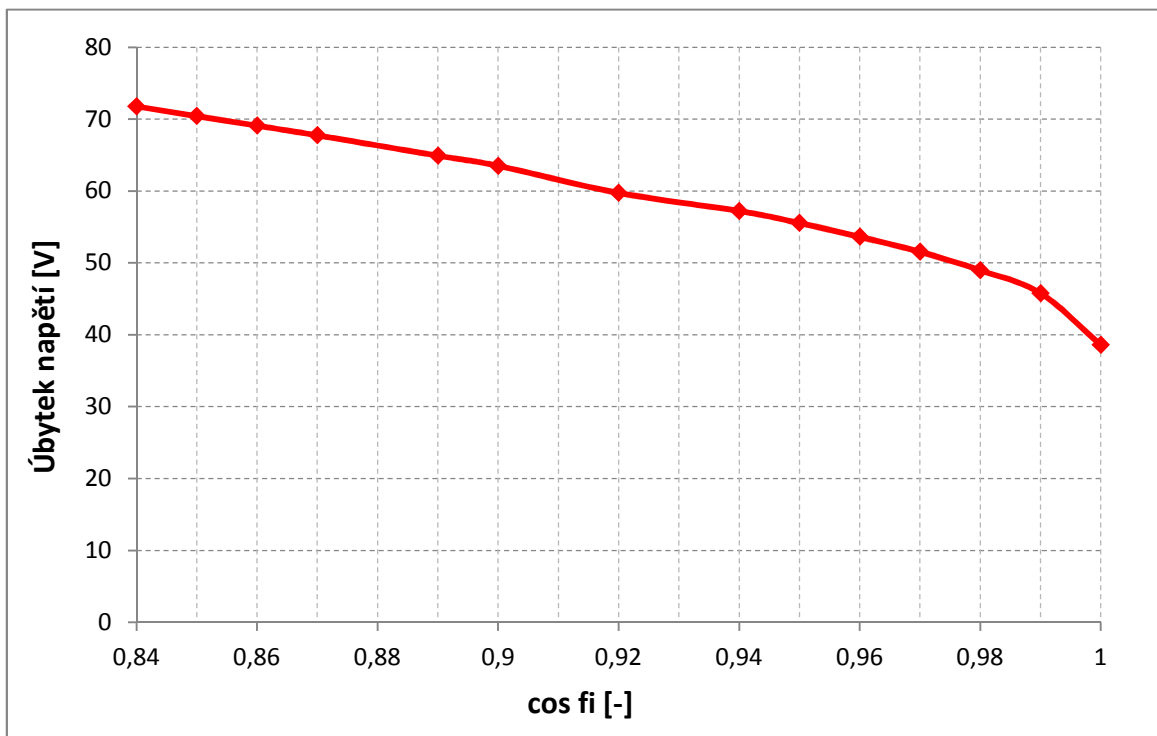
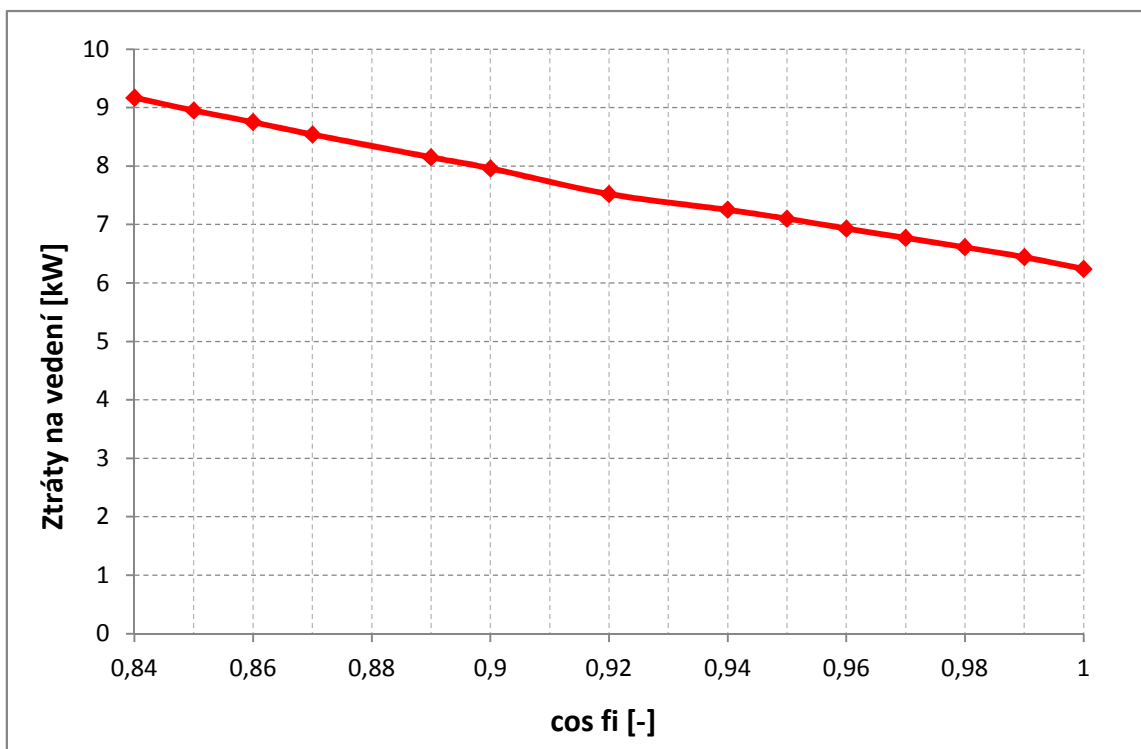
- [13] Ing. Petr Čech. *Dispečerské řízení větrných elektráren*. [cit. 20.5.2016]. Dostupné z: <http://www.egu-prg.cz/dispecerske-rizeni-vetrnych-elektren>
- [14] Ing. Richard Habrych, Ph.D. *Regulace napětí a jalových výkonů v distribuční soustavě 110 kV*. Konference PV GRID, červen 2013. [cit. 21.5.2016]. Dostupné z: http://www.pvgrid.eu/uploads/media/PV_Grid_Habrych.pdf
- [15] Ing. Vladimír Korenc, ELCOM, a.s. Dr. Ing. Tomáš Bůbela, ELCOM, a.s. *PROBLEMATIKA REGULACE JALOVÉHO VÝKONU U FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN. 2012* [cit. 21.5.2016]. Dostupné z : <http://www.elcom.cz/cz/ke-stazeni/energeticke-systemy/powersystems-cz/vylepseni-kvality-elektřiny/problematika-regulace-jaloveho-vykonu-u-fotovoltaickych-elektren/stahnout>
- [17] Ing. Richard Habrych, Ph.D. , *Automatická sekundární regulace napětí*. Časopis ENERGETIKA 5/2015 [cit. 21.5.2016]. Dostupné z: http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf
- [18] Dolezal, Jaroslav. Witner, Karel. Časopis Automa. *Regulace napětí a jalového výkonu – současnost a trendy*. 2001 [cit. 27.5.2016]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au040118.pdf>
- [19] ČEPS, a.s. *Kodex přenosové soustavy, část V – Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS*. Leden 2014 [cit. 27.5.2016]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/479698/CV_k_prip.pdf/2f28f90c-30aa-4040-85a6-053fd4fe3048

Seznam příloh

- Příloha č. 1: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na odebíraném výkonu
- Příloha č. 2: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na odebíraném výkonu při kompenzaci na $\cos \varphi=1$
- Příloha č. 3: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na $\cos \varphi$
- Příloha č. 4: Tabulky stavů před a po kompenzaci
- Příloha č. 5: Tabulky výpočtů s připojenou FVE

Příloha č. 1: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na odebíraném výkonu*Obr. 6.1. - Graf závislosti úbytku napětí na odebíraném výkonu**Obr. 6.2. - Graf ztrát na vedení v závislosti na odebíraném výkonu*

Příloha č. 2: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na odebíraném výkonu při kompenzaci na $\cos \varphi=1$ Obr. 6.3. - Graf závislosti úbytku napětí na odebíraném výkonu při $\cos \varphi=1$ Obr. 6.4. - Graf ztrát na vedení v závislosti na odebíraném výkonu při $\cos \varphi=1$

Příloha č. 3: Grafy úbytku napětí a ztrát v závislosti na $\cos \varphi$ Obr. 6.5. - Graf závislosti úbytku napětí na změně $\cos \varphi$ Obr. 6.6. - Graf ztrát na vedení v závislosti na změně $\cos \varphi$

Příloha č. 4: Tabulky stavů před a po kompenzaci

Stav před kompenzací										
P [kW]	Q [kVAr]	cos fi [-]	R _z	X _{Lz}	U _{z_ abs}	P _{sit} [kW]	Q _{sit} [kVAr]	cos _{fi_sit}	Ubytek _{napeti} [V]	Ztraty _{na_vedeni} [kW]
2200	1650	0,8	220,0	293,33i	12641,98	2186,87	898,64	0,92	59,73	7,52
2000	1500	0,8	242,0	322,67i	12648,74	1989,44	748,88	0,94	52,96	6,09
1800	1350	0,8	268,9	358,52i	12655,52	1791,75	599,06	0,95	46,19	4,82
1600	1200	0,8	302,5	403,33i	12662,30	1593,79	449,16	0,96	39,41	3,71
1400	1050	0,8	345,7	460,95i	12669,09	1395,57	299,15	0,98	32,62	2,75
1200	900	0,8	403,3	537,78i	12675,88	1197,08	149,04	0,99	25,82	1,96
1000	750	0,8	484,0	645,33i	12682,69	998,33	-1,14	1,00	19,02	1,32
800	600	0,8	605,0	806,67i	12689,50	799,31	-151,42	0,98	12,21	0,84
600	450	0,8	806,7	1075,56i	12696,31	600,02	-301,79	0,89	5,39	0,53
400	300	0,8	1210,0	1613,33i	12703,14	400,46	-452,25	0,66	-1,43	0,37

Kompenzační zařízení
-535,323255804396i
-643,501975446355i
-806,103836151117i
-1078,09185751907i
-1625,92848576401i
-3300,63376219312i
116627,531295641i
3128,23107189136i
1586,62113585433i
1063,39198936377i

Stav po kompenzaci na cos fi = 1											
P [kW]	Q [kVAr]	cos fi [-]	X _{komp}	R _z	X _{Lz}	U _{z_ abs}	P _{sit} [kW]	Q _{sit} [kVAr]	cos _{fi_sit}	Ubytek _{napeti} [V]	Ztraty _{na_vedeni} [kW]
2200	1650	0,8	-535,323255804396i	220,0	293,33i	12663,11	2192,89	1,52	1,00	38,59	6,24
2000	1500	0,8	-643,501975446355i	242,0	322,67i	12666,35	1994,05	1,98	1,00	35,36	5,17
1800	1350	0,8	-806,103836151117i	268,9	358,52i	12669,58	1795,10	2,35	1,00	32,12	4,19
1600	1200	0,8	-1078,09185751907i	302,5	403,33i	12672,83	1596,06	2,63	1,00	28,88	3,32
1400	1050	0,8	-1625,92848576401i	345,7	460,95i	12676,08	1396,91	2,84	1,00	25,63	2,55
1200	900	0,8	-3300,63376219312i	403,3	537,78i	12679,33	1197,66	2,96	1,00	22,38	1,89
1000	750	0,8	116627,531295641i	484,0	645,33i	12682,59	998,31	3,00	1,00	19,12	1,32
800	600	0,8	3128,23107189136i	605,0	806,67i	12685,85	798,86	2,96	1,00	15,85	0,86
600	450	0,8	1586,62113585433i	806,7	1075,56i	12689,12	599,31	2,83	1,00	12,58	0,50
400	300	0,8	1063,39198936377i	1210,0	1613,33i	12692,40	399,65	2,61	1,00	9,31	0,24

Příloha č. 5: Tabulky výpočtů s přípojenou FVE

FVE	P [kW]	Q [kVAr]	cos fi [-]	X_komp	R_z	X_Lz	I_FVE
	2200	1650	0,8	-535,32i	224,0	298,69i	30
	2000	1500	0,8	-643,5i	246,4	328,56i	30
	1800	1350	0,8	-806,1i	273,8	365,07i	30
	1600	1200	0,8	-1078,09i	308,0	410,7i	30
	1400	1050	0,8	-1625,92i	352,0	469,37i	30
	1200	900	0,8	-3300,63i	410,7	547,6i	30
	1000	750	0,8	116627,53i	492,8	657,12i	30
	800	600	0,8	3128,23i	616,1	821,4i	30
	600	450	0,8	1586,62i	821,4	1095,2i	30
400	300	0,8	1063,39i	1232,1	1642,8i	30	

I1	I2	I3	I4	I SIT
30,0750062566113-0,0527214127861599i	30,1185252339904-0,0833106205949338i	29,9840970666962+0,0111780689918857i	29,8581125306928-0,168058941875883i	29,8644200911644-0,172493410726258i
30,0624440544897-0,0438400017538191i	30,1059959805541-0,0744164358219093i	29,9836964034171+0,0114462410973218i	29,8692128341915-0,151619861752018i	29,8755251706963-0,15605247954108i
30,0498860866941-0,0349823324265369i	30,0934709892393-0,0655459955768786i	29,9833190334932+0,0116974321740494i	29,8803268561045-0,135173183181077i	29,8866439726713-0,139603950318401i
30,0373286287131-0,0261457446481982i	30,0809465309603-0,056696267341432i	29,9829586533629+0,0119361121209244i	29,8914483348895-0,118714391342343i	29,8977702348844-0,123143306357522i
30,0247700319945-0,017329060579928i	30,0684209580553-0,0478671536369347i	29,9826163893339+0,0121615362625402i	29,9025783797377-0,102244207161396i	29,9089050666558-0,106671268900327i
30,0122111785575-0,00853287412729053i	30,0558951531112-0,0390581714596834i	29,9822929210401+0,0123732754555083i	29,9137176584865-0,0857630339725526i	29,920049135905-0,0901882414650618i
29,9996541545732+0,000241384265637i	30,0433712033527-0,0302711132221232i	29,9819895715564+0,0125704540442925i	29,9248674818679-0,0692717216841023i	29,9312037535169-0,0736950743333662i
29,987096333812+0,00899557664370507i	30,0308464808676-0,0215041119933988i	29,9817039976933+0,012754754240029i	29,9360255093821-0,0527685566590149i	29,9423665787477-0,0571900531599693i
29,9745394631721+0,0177285107124817i	30,0183227339408-0,0127583635468586i	29,9814379668282+0,012924990787179i	29,9471934943828-0,0362546986964771i	29,9535393651521-0,0406743382483399i
29,9619831092537+0,026440516298939i	30,0057995289306-0,00403353709905883i	29,9811910668837+0,0130814985882608i	29,9583710193006-0,0197297841410432i	29,9647216951257-0,0241475658043901i

Skutečný stav	Uz_abs	P_sit [kW]	Q_sit [kVAr]	cos_fi_sit	Ubytek_napeti [V]	Ztraty_na_vedeni [kW]
	12683,21	1015,92	35,33	1,00	18,50	1,36
	12686,32	820,15	31,55	1,00	15,38	0,89
	12689,43	624,30	27,35	1,00	12,28	0,53
	12692,55	428,35	23,69	1,00	9,16	0,26
	12695,68	232,31	20,28	1,00	6,02	0,10
	12698,81	36,17	16,68	0,91	2,89	0,03
	12701,95	-160,06	13,29	-1,00	-0,25	0,06
	12705,10	-356,38	9,98	-1,00	-3,39	0,19
	12708,24	-552,80	6,68	-1,00	-6,54	0,43
12711,40	-749,31	3,52	-1,00	-9,69	0,76	