

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Řízení jalového výkonu v obnovitelných zdrojích  
připojených k distribuční síti**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch PRAIS**

Osobní číslo: **E15B0166P**

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. Proveďte 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: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**

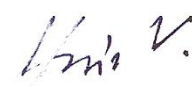
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na podmínky připojování nových obnovitelných zdrojů elektrické energie (OZE) k distribuční síti, zejména z pohledu regulace činného a jalového výkonu, a možnosti, jak lze u jednotlivých zdrojů dosáhnout splnění těchto podmínek. Krátce také popisují vývoj počtu a výkonu připojených OZE v ČR od roku 2008 do současnosti. Závěrečnou, praktickou kapitolu práce tvoří analýza vlivu kompenzace jalového výkonu na provozní náklady fiktivní sítě s fotovoltaickou elektrárnou.

## **Klíčová slova**

Činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, řízení, regulace, obnovitelné zdroje, elektrárna, efektivita přenosu

## **Abstract**

This bachelor thesis is aimed at describing the requirements for connecting new renewable power sources to the distribution grid, especially from the perspective of active and reactive power control, and the means of achieving the fulfillment of said requirements. I also shortly describe the development of the total amount and installed power of renewable sources in the Czech Republic and their development since 2008. The final chapter contains an analysis of the effects of reactive power compensation on the running costs of a fictional network with a photovoltaic plant.

## **Keywords**

Active power, apparent power, reactive power, control, regulation, renewable sources, power plant, transmission efficiency

## 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 26.6.2019

Vojtěch Prais

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí této bakalářské práce Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Františku Žákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady k této práci.

## OBSAH

ÚVOD .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	12
<b>1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA .....</b>	<b>13</b>
1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....	13
1.2 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA .....	14
1.3 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA .....	14
1.3.1 Řízení zdrojů v distribuční soustavě .....	15
1.3.2 Výkony v distribuční soustavě a jejich účinky na soustavu .....	16
1.3.3 Princip kompenzace .....	17
1.3.4 Statická a dynamická kompenzace .....	18
1.3.5 Ekonomie a ztráty .....	19
1.3.6 Rozdělení metod kompenzace podle zapojení kompenzačních zařízení .....	20
<b>2 REGULACE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....</b>	<b>22</b>
2.1 PRIMÁRNÍ REGULACE .....	23
2.2 SEKUNDÁRNÍ REGULACE .....	24
2.3 TERCIÁRNÍ REGULACE .....	24
<b>3 REGULACE VÝKONŮ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>25</b>
3.1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	25
3.1.1 Mechanická regulace výkonu .....	25
3.1.2 Kompenzace změn otáček rotoru .....	26
3.1.3 Regulace jalového výkonu elektrárny .....	27
3.2 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY (FVE) .....	29
3.2.1 Regulace činného a jalového výkonu .....	29
3.2.2 Sledování bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracking) .....	30
3.2.3 Udržování maximálního výkonu .....	30
3.3 SPALOVÁNÍ BIOMASY .....	31
3.4 SPALOVÁNÍ BIOPLYNU .....	31
3.5 VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	32
3.5.1 Regulace vodních elektráren .....	33
<b>4 OBNOVITELNÉ ZDROJE V ČR .....</b>	<b>34</b>
<b>5 PŘIPOJOVÁNÍ OZE DO SÍTĚ .....</b>	<b>35</b>
5.1.1 Podmínky připojení k OZE k síti podle PPDS .....	35
5.1.2 Všeobecné podmínky pro připojení .....	35
5.1.3 Požadavky na regulaci .....	36
5.1.4 Řízení jalového výkonu .....	39
5.1.5 Možnosti připojení výroby k síti .....	41
5.2 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....	41
5.2.1 Hierarchie kompenzace .....	41
5.2.2 Primární regulace .....	45
<b>6 VLIV JALOVÉHO VÝKONU NA SÍŤ .....</b>	<b>46</b>
6.1 VARIANTA 1: KOMPENZACE Q REAKTANCÍ .....	47
6.1.1 Parametry náhradního schématu vedení .....	47
6.1.2 Výpočet impedance zátěže .....	48



6.1.3	<i>Výpočet impedance střídače FVE</i> .....	49
6.1.4	<i>Celková impedance obvodu</i> .....	49
6.1.5	<i>Celkový odebíraný výkon</i> .....	50
6.1.6	<i>Celkový účinník</i> .....	50
6.2	KOMPENZACE ÚČINÍKU .....	50
6.2.1	<i>Síť po kompenzaci</i> .....	50
6.2.2	<i>Provozní náklady</i> .....	51
6.2.3	<i>Grafické znázornění výsledků pro <math>P_{FVE} = 100 \text{ kW}</math></i> .....	52
6.3	VARIANTA 2: ŘÍZENÍ Q STRÍDAČEM .....	53
6.4	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ PRO $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$ .....	55
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM ZDROJŮ</b> .....	<b>59</b>
	<b>PŘÍLOHY:</b> .....	<b>62</b>
	PŘÍLOHA A – VÝVOJ PODÍLU OZE V LETECH 2008 AŽ 2017.....	62
	PŘÍLOHA B – VSTUPNÍ HODNOTY .....	63
	PŘÍLOHA C: VÝSLEDKY PRO $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$ .....	64
	<i>Před kompenzací</i> .....	64
	<i>Po kompenzací</i> .....	67
	VÝSLEDKY PRO $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$ .....	68
	<i>Před kompenzací</i> .....	68
	<i>Po kompenzací</i> .....	71

## Úvod

Podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové dodávce stále roste a v zájmu snížení závislosti na fosilních palivech a emisí CO<sub>2</sub> se tento růst nejspíše nezastaví. S jejich připojováním do distribuční sítě jsou však spojeny určité problémy, na jejichž řešení jsou z hlediska provozovatele soustavy kladeny určité požadavky. Tato práce se zabývá jedním z těchto problémů a to řízením činného a jalového výkonu.

První kapitola tvoří obecný úvod do problematiky přenosových a distribučních sítí, dále pak do výkonů, důvodů a možností kompenzace jalového výkonu. Druhá kapitola popisuje regulační systémy v elektrizační soustavě a jejich hierarchii. Třetí kapitola tvoří přehled nejčastěji využívaných obnovitelných zdrojů energie a možností jejich regulace. Čtvrtá kapitola se věnuje podílům jednotlivých druhů zdrojů na celkovém výkonu v ČR a jejich vývoji od roku 2008. Pátá kapitola popisuje podmínky, které musí nový zdroj splnit, aby mohl být připojen k distribuční síti a dodávat do ní energii. Poslední, šestou kapitolu tvoří výpočet vlivu kompenzace jalového výkonu na ztráty a ekonomiku provozu fiktivní sítě s fotovoltaickou elektrárnou.

## Seznam symbolů a zkratk

ES .....	Elektrizační soustava
DS .....	Distribuční síť
PS.....	Přenosová síť
PPDS.....	Pravidla provozování distribuční soustavy
PPPS .....	Pravidla provozování přenosové soustavy
EZ .....	Energetický zákon
ERÚ .....	Energetický regulační úřad
FVE.....	Fotovoltaická elektrárna
VTE .....	Větrná elektrárna
VE.....	Vodní elektrárna
PRN .....	Primární regulace napětí
SRN/ASRU.....	(Automatická) sekundární regulace napětí
TRN .....	Terciární regulace napětí
MPP .....	Maximum power point
PFC .....	Power factor correction
DFIG.....	Doubly-fed induction generator
CVT .....	Continuously-variable transmission
OZE .....	Obnovitelný zdroj energie
PPS .....	Provozovatel přenosové soustavy
PDS.....	Provozovatel distribuční soustavy
P (W) .....	Činný výkon
Q (var) .....	Jalový výkon
S (VA) .....	Zdánlivý výkon
X ( $\Omega$ ).....	Reaktance
Z ( $\Omega$ ).....	Impedance
KPS.....	Kodex přenosové soustavy
C (F).....	Kapacita
L (H) .....	Indukčnost
R ( $\Omega$ ).....	Odpor (činný)

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY [1] .....	13
OBRÁZEK 1.2 DISTRIBUTOŘI ELEKTŘINY V ČR [4] .....	15
OBRÁZEK 1.3 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝKONŮ [8] .....	16
OBRÁZEK 1.4 FÁZOROVÝ DIAGRAM KOMPENZACE ÚČINÍKU .....	17
OBRÁZEK 2.1 ZÁVISLOST ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU NA NAPĚTÍ A FREKVENCI [7] .....	22
OBRÁZEK 2.2 HIERARCHIE REGULACE [12] .....	23
OBRÁZEK 3.1 DFIG [8] .....	27
OBRÁZEK 5.1 SNÍŽENÍ ČINNÉHO VÝKONU PŘI NADFREKVENCI.....	37
OBRÁZEK 5.2 SNÍŽENÍ ČINNÉHO VÝKONU PŘI PODFREKVENCI.....	37
OBRÁZEK 5.3 REGULACE ČINNÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ .....	38
OBRÁZEK 5.4 ZÁVISLOST DODÁVANÉHO JALOVÉHO VÝKONU NA NAPĚTÍ.....	40
OBRÁZEK 6.1 ČASOVÝ PRŮBĚH ODBĚRU ZÁVODU.....	46
OBRÁZEK 6.2 BLOKOVÉ SCHÉMA ŘEŠENÉ SÍTĚ .....	46
OBRÁZEK 6.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA VEDENÍ.....	47
OBRÁZEK 6.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA ZÁTĚŽE .....	48
OBRÁZEK 6.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA FVE .....	49
OBRÁZEK 6.6 PROUD V 1 FÁZI, $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$ .....	52
OBRÁZEK 6.7 ZTRÁTY VE VEDENÍ, $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$ .....	52
OBRÁZEK 6.8 ÚČINÍK, $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$ .....	53
OBRÁZEK 6.9 PROUD V 1 FÁZI, $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$ .....	55
OBRÁZEK 6.10 ZTRÁTY VE VEDENÍ, $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$ .....	56
OBRÁZEK 6.11 ÚČINÍK, $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$ .....	56

# 1 Elektrizační soustava

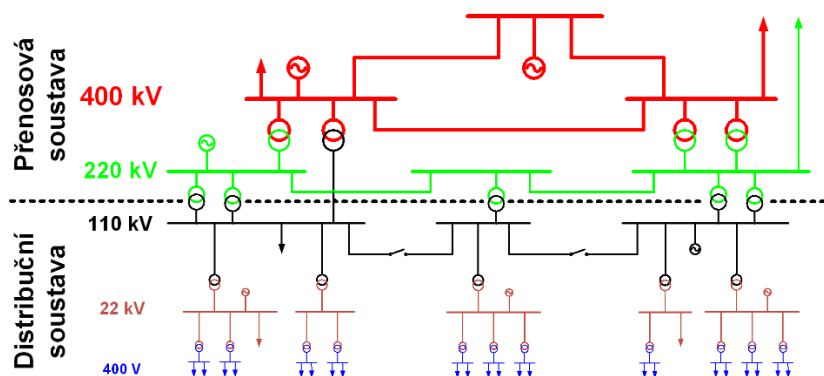
Elektrizační soustava (ES) zahrnuje všechna zařízení používaná pro výrobu, přenos, distribuci a spotřebu elektrické energie, včetně zařízení pro řízení, měření parametrů a ochranu jejích jednotlivých částí.

Základním účelem elektrizační soustavy je zajistit spotřebitelům dodávku elektrické energie s co nejmenší odchylkou od dohodnutých parametrů (napětí, frekvence). To vzhledem ke kolísající poptávce a stále velmi omezeným možnostem skladování elektrické energie znamená potřebu velmi kvalitní regulace, neboť dodávaný a odebíraný výkon musí být udržovány v rovnováze – každá odchylka způsobí změnu napětí a frekvence v celé síti, která je přímo úměrná velikosti této odchylky.

Z toho vyplývá, že na každou změnu zatížení sítě je nutné co nejdříve, ideálně okamžitě, reagovat odpovídající změnou dodávaného výkonu, aby odchylky napětí a frekvence nepřesáhly normou stanovenou maximální velikost. Požadavky na kvalitu této regulace stanovuje tzv. Kodex přenosové soustavy (KPS), který stanovuje minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro připojování a provoz přenosové soustavy.

## 1.1 Rozdělení elektrizační soustavy

Elektrizační soustava se skládá ze dvou hlavní částí, přenosové a distribuční. Přenosová soustava slouží k přenosu elektrické energie na dlouhé vzdálenosti včetně propojení s elektrizačními soustavami v zahraničí. Za tímto účelem využívá vyšších napěťových hladin (v ČR 220 a 400 kV). Distribuční soustava používá nižší napěťové hladiny (do 110 kV) a slouží především k propojení přenosové soustavy s odběrateli energie.



Obrázek 1.1 Rozdělení elektrizační soustavy [1]

## 1.2 Přenosová soustava

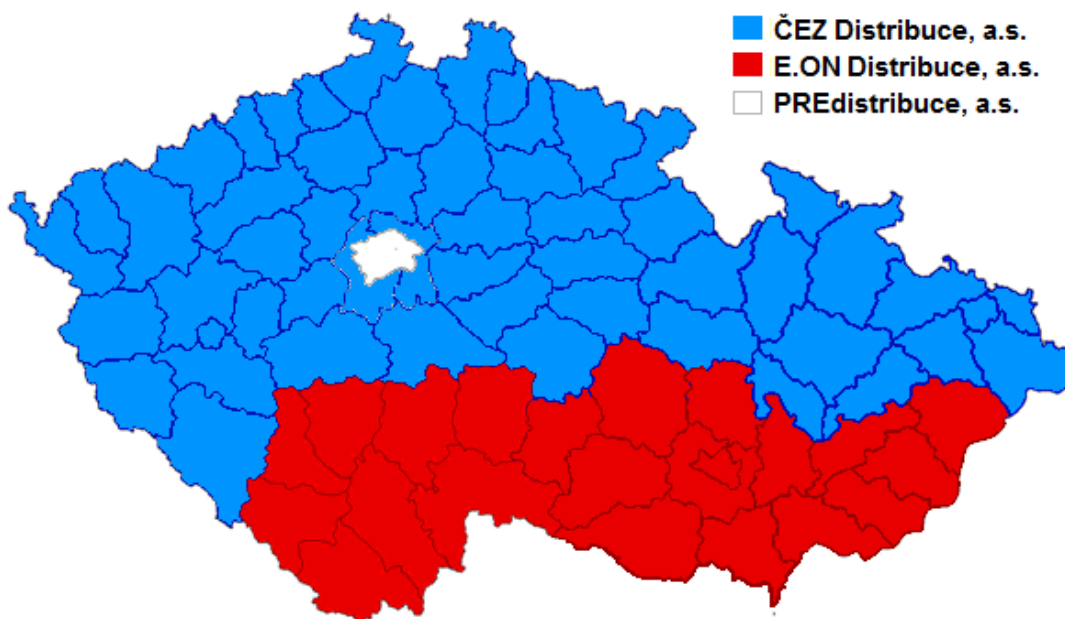
Přenosovou soustavu tvoří vedení 220 a 400 kV, která slouží k přenosu elektrické energie od elektráren do distribuční soustavy. Všechny prvky přenosové soustavy jsou vzájemně propojeny, což umožňuje převzetí dodávky ostatními prvky sítě, pokud u jednoho či více prvků dojde k výpadku.

V ČR přenosovou síť provozuje společnost ČEPS, a.s. (zkratka České elektroenergetické přenosové sítě). Ta také zajišťuje propojení české ES se sítěmi okolních zemí v rámci tzv. Evropské sítě provozovatelů přenosových soustav pro elektrickou energii (European Network of Transmission Operators for Electricity, ENTSO-E), do které je zapojeno 43 provozovatelů ze 36 evropských zemí [2]. Toto propojení umožňuje zvýšit stabilitu sítě v případě výpadku jedné nebo více elektráren a/nebo zvýšeného odběru využitím výkonu ze zahraničních sítí. To snižuje potřebnou výkonovou rezervu elektrizační sítě a s ní náklady potřebné na její stavbu, provoz a údržbu. Celkový výkon ES zapojených v ENTSO-E přesahuje 1 TW [3].

## 1.3 Distribuční soustava

Distribuční soustava zahrnuje vedení a zařízení s napětím do 110 kV (včetně malých elektráren) a slouží k dodávání (distribuci) energie spotřebitelům. Jednotlivé oblasti v distribuční síti nejsou vzájemně propojené – nemohou se tedy navzájem ovlivňovat, ale zároveň při poruše sítě může dojít k výpadku napájení, pokud není k dispozici záložní transformátor a není zajištěno napájení z jiné oblasti. Výjimkou jsou v ČR propojené oblasti mezi Vyškovem a Chotějovicemi a mezi Dasným a Kočínem, které tvoří paralelní cestu k vedením přenosové soustavy a jsou tak v podstatě jejími součástmi [1].

V České republice distribuční síť provozují společnosti ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s. Jednotlivé oblasti znázorňuje následující mapa:



Obrázek 1.2 Distributoři elektřiny v ČR [4]

### 1.3.1 Řízení zdrojů v distribuční soustavě

Všechny zdroje v distribuční soustavě se musí řídit tzv. Pravidly provozování distribuční soustavy (PPDS). PPDS navazují na Pravidla provozování přenosové soustavy (Kodex PS). Vytváří je jednotlivé energetické subjekty připojené do distribuční sítě podle zákona č. 458/2000 Sb. (Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, tzv. Energetický zákon) [6] a následně je schvaluje Energetický regulační úřad (ERÚ).

Hlavním účelem PPDS je umožnit uživatelům distribuční sítě snadný přístup k informacím o podmínkách jejího provozu, včetně informací ze souvisejících právních, technických a dalších podkladů. Z tohoto důvodu jsou součástí PPDS i definice použitých odborných pojmů a citace z Energetického zákona a vyhlášek ERÚ [7, p. 2]. Dodržování podmínek stanovených PPDS, a to jak ze strany jak provozovatele DS, tak i jejích uživatelů, je hlavním předpokladem spolehlivého provozu a údržby sítě a prevence vzniku poruch, případně omezení jejich šíření do zbytku soustavy.

PPDS zároveň stanovuje podmínky pro spolupráci s provozovateli jiných distribučních sítí.

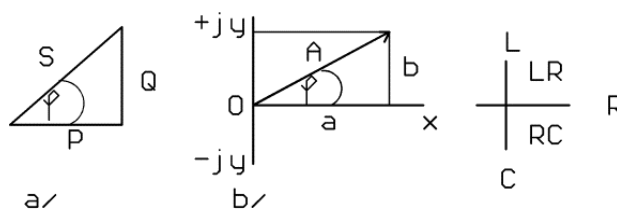
### 1.3.2 Výkony v distribuční soustavě a jejich účinky na soustavu

V každém obvodu se střídavým proudem jsou přenášeny dva základní druhy výkonů, činný (P) a jalový (Q). Vektorový součet těchto výkonů se nazývá výkonem zdánlivým (S). Jednotkou činného výkonu je watt (W), zdánlivého volt-ampér (VA) a jalového volt-ampér reaktanční (var).

Činný výkon je ta část zdánlivého výkonu, která se při provozu přenáší ze sítě do spotřebiče a koná tam práci, případně na činném odporu vodičů tvoří ztráty ve formě tepla.

Jalový výkon se naopak nespotebovává ve spotřebiči, během jedné periody střídavého proudu se pouze přenesse ze sítě do spotřebiče a následně zase zpět. Zajišťuje vytvoření magnetického, resp. elektrického pole u indukčností a kapacit. Způsobuje tedy ztráty ve vodičích, aniž by konal užitečnou práci. Z tohoto důvodu je jeho přenos velmi nevýhodný a v zájmu efektivity přenosu je třeba jeho velikost regulovat, není však možné jej zcela eliminovat.

Následující obrázek představuje grafické znázornění těchto veličin:



Obrázek 1.3 Grafické znázornění výkonů [8]

Zdánlivý výkon je definován vztahem

$$S = U \cdot I = P + jQ \quad (1.1)$$

Z obrázku je tedy zřejmé, že

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

a

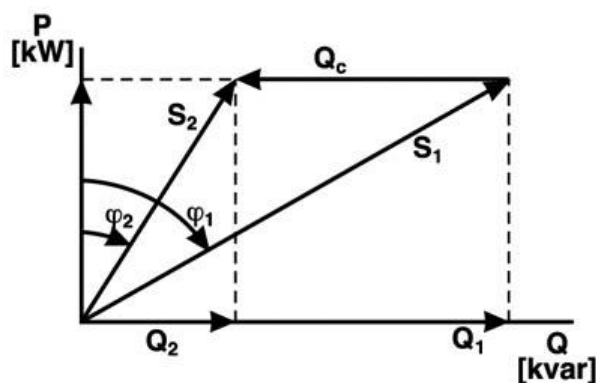


$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.3)$$

kde  $\varphi$  představuje úhel mezi napětím a proudem a zároveň mezi činným a zdánlivým výkonem.  $\cos \varphi$  pak odpovídá poměru mezi činným a zdánlivým výkonem, tzv. účinník. Kladný účinník tedy značí proud předbíhající napětí, tj. induktivní charakter zátěže, a naopak záporný účinník značí napětí zpožděné za proudem, tj. kapacitní charakter.

### 1.3.3 Princip kompenzace

Princip kompenzace účinníku lze asi nejjednodušeji vysvětlit fázorovým diagramem níže [23]:



Obrázek 1.4 Fázorový diagram kompenzace účinníku

Při připojení kondenzátoru do obvodu s cívkou se mění celková reaktance obvodu směrem ke kapacitní (a naopak), díky čemuž klesá fázový posuv mezi proudem a napětím a s ním i velikost jalového výkonu.

Při známém činném výkonu zařízení  $P$  a jeho účinníku  $\varphi$  lze potřebný jalový výkon  $Q_{komp}$  určit vztahem

$$Q_{komp} = Q - Q_k = P(\tan \varphi - \tan \varphi_k) \quad (1.4)$$

kde  $Q_k$  je jalový výkon při kompenzaci na požadovaný účinník.

Pro jalový výkon kondenzátoru (při kompenzování induktivní zátěže) platí vztah

$$Q_{komp} = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (1.5)$$

Potřebnou kapacitu kompenzačního kondenzátoru lze tedy určit jako

$$C_{komp} = \frac{Q_{komp}}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1.6)$$

Podobně v případě indukčnosti (při kompenzování kapacitní zátěže) platí, že

$$Q_{komp} = \frac{U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} \quad (1.7)$$

a tedy

$$L_{komp} = \frac{U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Q_{komp}} \quad (1.8)$$

#### 1.3.4 Statická a dynamická kompenzace

Nejjednodušší variantou je tzv. statická kompenzace pomocí kondenzátorů či tlumivek připojených do obvodu trvale. V takovém případě se však reaktance obvodu mění o pevnou hodnotu nezávisle na skutečné velikosti jalového výkonu, která však u generátoru není konstantní. Z toho vyplývá, že konstantní nemůže být ani velikost účinníku kompenzovaného obvodu. Navíc hrozí, že při velkých výkyvech v zatížení zdroje může dojít k nedostatečné nebo naopak přílišné kompenzaci.

Tyto nedostatky odstraňuje tzv. dynamická kompenzace. Tu provádí automatický regulační systém, který reaguje na okamžitou hodnotu účinníku a pomocí tyristorů připojuje vhodné kompenzační prvky. To přináší nejen přesnější, rychlejší regulaci (odezva v řádu desítek milisekund), ale i možnost změny požadované hodnoty prostřednictvím vzdáleného řízení. Nevýhodou je však vyšší finanční náročnost. [24]

V případě dynamické kompenzace pak existují 2 základní metody její realizace: Regulece stupňovitá a plynulá.

#### 1.3.4.1 Stupňovitá regulace

Stupňovitou regulací se nazývá řešení, kdy regulátor automaticky připojuje jeden nebo více kompenzačních prvků a kompenzační výkon tak roste stupňovitě podle výkonu jednotlivých prvků. Připojování je nejčastěji řešeno pomocí bezkontaktních spínačů řízených mikroprocesorem. Jedná se o nejrozšířenější způsob regulace.

#### 1.3.4.2 Plynulá regulace

V případě plynulé regulace se využívá paralelní kombinace tlumivky a kondenzátoru s připojeným tyristorovým spínačem. Změnou rozdělení proudu mezi tyto dva prvky lze plynule měnit jalový proud, který skrz ně prochází, a s ním i kompenzační výkon celého kompenzátoru. Jinou variantou plynulé regulace jsou variabilní tlumivky, jejichž indukčnost lze v určitém rozmezí plynule měnit [5].

#### 1.3.5 Ekonomie a ztráty

Kompenzační zařízení sice snižují ztráty na přenosovém vedení, jako každé jiné elektrické zařízení však mají omezenou účinnost a při jejich provozu tak vznikají ztráty, které v závislosti na provedení a požadovaném výkonu mohou dosáhnout poměrně značné velikosti.

Zároveň platí, že účinnost typicky roste se jmenovitým výkonem. Například kompenzační tlumivka TTC 33051–0010 má při výkonu 1,5 kvar maximální ztráty 4,2 %, tj. 62 W, které způsobí její oteplení až o 56 °C. U verze TTC 380140–0107 s výkonem 50 kvar pak ztráty činí „pouze“ 1,1 % - vzhledem k výkonu to však znamená 535 kW, což postačuje k oteplení tlumivky o 70 °C nad okolní teplotu [5].

V případě kompenzačních kondenzátorů pak např. u řady Fortis od KBH Energy udávané ztráty činí 0,05 %/kvar, tj. 0,75 W u 1,5kvar verze a 25 W u 50kvar [6]. V sítích s obsahem vyšších harmonických složek (např. od pulzních měničů) by však tyto složky mohly mít negativní vliv na životnost kompenzačních kondenzátorů. Proto se tyto kondenzátory doplňují ještě tzv. ochrannými tlumivkami, které zmíněné harmonické složky filtrují. I na těchto tlumivkách však vznikají další tepelné ztráty. V případě tlumivky TTC 35052–0069 (pro výkon kondenzátorového bloku 50 kvar) je to však už jen 150 W (0,3 %).

Při dynamické kompenzaci navíc vznikají ztráty ještě v řídicím obvodu, ty jsou však v porovnání se ztrátami na samotných kompenzačních prvcích velmi malé.

### 1.3.6 Rozdělení metod kompenzace podle zapojení kompenzačních zařízení

V závislosti na konstrukci elektrárny existuje několik možností umístění těchto kompenzačních zařízení:

#### 1.3.6.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

Jednotlivou kompenzací se označuje systém kompenzace jalového výkonu u několika zařízení, kde každé z těchto zařízení má svůj vlastní kompenzátor. Ten je připojen co nejbližše kompenzovanému zařízení, v ideálním případě přímo na jeho svorky, kompenzuje tak celé vedení mezi sítí a spotřebičem. Jedná se o nejjednodušší a nejspolehlivější způsob kompenzace, při větším počtu spotřebičů však s relativně vysokými náklady na pořízení a údržbu a velkými nároky na prostor. Výhodou je však to, že při relativně konstantním zatížení lze použít statickou kompenzaci. Kromě toho také není nutné pro kompenzátor použít samostatný spínač.

### 1.3.6.2 Skupinová kompenzace

V případě skupinové kompenzace je kompenzátor připojen k rozvaděči, který je společný pro několik zdrojů. Kompenzuje se tak vedení mezi kompenzátozem a spotřebičem. Tato metoda snižuje potřebný počet kompenzátorů, při proměnném zatížení však již vyžaduje použití dynamické kompenzace a vedení od sítě k rozvaděči zůstává nevykompenzováno.

### 1.3.6.3 Centrální kompenzace

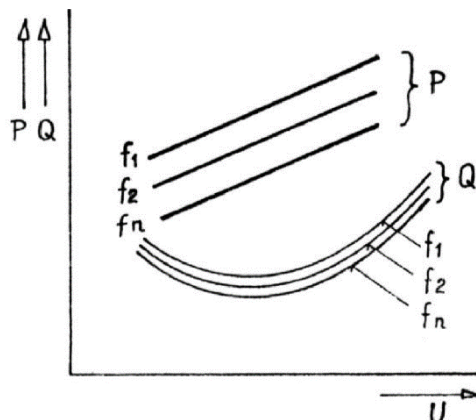
Toto řešení využívá jediný kompenzátor, který je připojen k hlavnímu rozvaděči. Vedení se tak kompenzuje už v místě připojení k síti. V případě, že je elektrárna do sítě připojena prostřednictvím transformátoru, však dochází ke kompenzaci pouze mezi sítí a tímto transformátorem a vedení mezi ním a zdroji zůstává nevykompenzováno.

### 1.3.6.4 Kombinovaná kompenzace

Jedná se o nečastější řešení kompenzace několika zařízení s různým výkonem a dobou využití. Příkladem může být kombinace centrální kompenzace mezi sítí a hlavním transformátorem a skupinové či individuální kompenzace u jednotlivých spotřebičů. [25]  
[26]

## 2 Regulace elektrizační soustavy

Hlavními parametry, které je nutné sledovat pro zajištění stability ES, jsou napětí a frekvence.

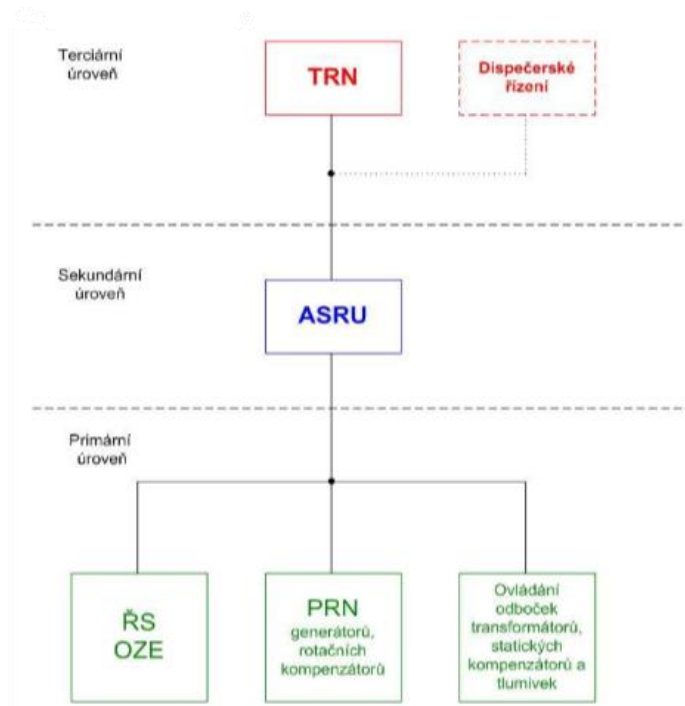


Obrázek 2.1 Závislost činného a jalového výkonu na napětí a frekvenci [7]

Jak vyplývá z grafu výše, změna jalového výkonu má relativně velký vliv na napětí, činný výkon se přitom mění jen velmi málo. Činný výkon je naopak spojen převážně s frekvencí.

Regulací jalového výkonu je tedy možné zároveň regulovat napětí v síti a udržovat jeho velikost v mezích stanovených v PPDS. Toto lze provést jak u dodavatele regulací zdroje, tak u odběratele kompenzací.

V ČR jsou používány tři stupně regulace – primární, sekundární a terciární.



Obrázek 2.2 Hierarchie regulace [12]

## 2.1 Primární regulace

Jedná se o regulaci na úrovni jednoho bloku elektrárny, která reaguje na odchylku frekvence v síti změnou okamžitého výkonu tohoto bloku. Doba odezvy této regulace se pohybuje na úrovni jednotek sekund. Probíhá automaticky a jsou do ní zapojeny všechny zdroje připojené v dané regulační oblasti. Poskytnutí dostatečné výkonové rezervy pro tuto regulaci je jednou ze základních povinností každého provozovatele přenosové soustavy. Poskytovatel regulace má povinnost potřebnou výkonovou rezervu uvolnit nejpozději do 30 sekund od vzniku odchylky frekvence.

Služba musí zároveň plnit následující požadavky:

- Zapínání a vypínání regulace z místa obsluhy bloku
- Signalizaci chodu regulace na Dispečink ČEPS
- Nastavování výkonové rezervy od  $\pm 3$  do  $\pm 15$  MW
- Nastavování požadované hodnoty frekvence od 49,95 do 50,05 Hz v krocích maximálně 0,01 Hz
- Nastavování pásma necitlivosti (mrtvé zóny) od 0 do 30 mHz v krocích maximálně 5 mHz

## 2.2 Sekundární regulace

Automatická sekundární regulace napětí (ASRU) má za úkol udržovat nastavené napětí na pilotních uzlech. Zajišťuje ji automatický regulátor, který měří odchylku skutečného napětí od zadaného a podle ní určuje velikost jalového výkonu potřebného pro její vyrovnání.

Zapínání a vypínání této regulace lze provádět jak z místa obsluhy bloku, tak prostřednictvím centrálního řízení. Vybrané signály a veličiny se přenáší na rozvodnu pilotního uzlu a zároveň na Dispečink ČEPS.

Generátor použitý pro regulaci musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon při  $\cos \varphi = 0,85$  až  $\cos \varphi = 0,95$ . Napětí na svorkách generátoru se zároveň nesmí odchýlit od jmenovité hodnoty o více než 5 %.

ČEPS, a.s. vykupuje tuto službu pouze u zdrojů s výkonem minimálně 50 MW.

## 2.3 Terciární regulace

Terciární regulace napětí je realizována změnou požadované hodnoty na regulátoru výkonu bloku. Požadavek může být zprostředkován buď dispečerem, nebo přes tzv. terminál výroby. Výrobna musí být schopna reagovat rychlostí minimálně 2 MW/min a maximální rozsah regulace je 100 MW [13].



## 3 Regulace výkonů obnovitelných zdrojů

### 3.1 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny (VTE) generují mění kinetickou energii proudícího větru na energii elektrickou. Využívají k tomu synchronní generátor spojený na hřídeli s vrtulí a připevněný na tzv. gondole.

#### 3.1.1 Mechanická regulace výkonu

Z toho vyplývá, že pro regulaci činného výkonu je třeba měnit výkon získaný při určité rychlosti větru, tj. účinnost elektrárny. To lze provést následujícími způsoby [14]:

- Natáčením jednotlivých lopatek vrtule:
  - Hydraulický nebo elektrický pohon natočí lopatky tak, aby generovaly větší či menší vztlak – lze regulovat velmi přesně a ve velkém rozsahu, mohou však vzniknout problémy s vibracemi v místě otočného upevnění lopatek.
  - Natočením lopatek o 90° lze eliminovat vztlak a výkon elektrárny tak v libovolný moment snížit až z nule.
- Natáčením celé gondoly:
  - Poskytuje možnost natočit celou elektrárnu o 360° – lze kompenzovat změnu směru větru.
  - Vyžaduje však technologicky složitě, a tedy i nákladně, otočné propojení vedení ke gondole – zejména u systému s kartáči, které umožňují otáčení gondoly v neomezeném rozsahu (není nutné ji po max. několika otáčkách otočit opačným směrem, aby se předešlo poškození vodičů).
  - Odchýlení od směru větru za účelem snížení výkonu však namáhá listy vrtule a hrozí jejich poškození – tato metoda se tak používá jen u malých elektráren (do výkonu řádově jednotek kW).
- Pasivní regulací vztlaku lopatek (passive stall control):
  - Tvar lopatek vrtule je navržen tak, že při určité rychlosti větru dojde k poklesu účinnosti a vrtule se zpomalí, příp. zastaví.
  - Jednodušší (tj. i levnější a spolehlivější) konstrukce bez pohyblivých částí, její návrh je však složitější.
  - Výkon je závislý pouze na rychlosti větru – lze navrhnout pro určitou rychlost, ale nelze dále regulovat.

- Vytváří větší úroveň aerodynamického hluku..
- Aktivní regulací vztlaku lopatek (active stall control):
  - Má pevné lopatky a pro regulaci využívá změny synchronních otáček generátoru.
  - Ideálního výkonu tak dosáhne je při určité rychlosti větru.

Větrné elektrárny zároveň umožňují i regulaci výkonu jalového. Způsob jejího provedení se však liší podle provedení generátoru.

### 3.1.2 Kompenzace změn otáček rotoru

Zásadním konstrukčním problémem větrných elektráren je to, že se s rychlostí větru mění otáčky vrtule a tedy i rotoru generátoru. Bez další regulace by tak nastala nežádoucí změna výstupního napětí. Každý z výrobců větrných elektráren tento problém řeší jinak:

#### 3.1.2.1 Variabilní převodovka

Česká firma Wikov vyvinula převodovku s variabilním převodovým poměrem (Variable Ratio Speed, VRS). Tento typ převodovky, také zvaný CVT (Continuously Variable Transmission), svojí konstrukcí umožňuje plynulou změnu převodového poměru bez přerušování dodávky energie. V případě VRS je převodový poměr hydraulicky řízen tak, aby na výstupu (hřídeli alternátoru) udržoval konstantní otáčky – při zvýšení rychlosti větru dojde ke zvýšení přenášeného momentu a převodovka zareaguje snížením převodového poměru (a naopak).

Tímto způsobem je možné udržovat otáčky alternátoru na konstantní hodnotě. Výstupní napětí generátoru má tedy také konstantní frekvenci, ten tudíž může být přes transformátor připojen přímo do sítě – není nutné použít frekvenční měnič.

#### 3.1.2.2 Pomaluběžný alternátor

Německý Enercon zvolil výrazně odlišný přístup. Převodovku totiž nahradil pomaluběžným stejnosměrným generátorem (dynamem) s buzením permanentními magnety. Tato konstrukce díky absenci převodovky výrazně snižuje mechanické ztráty a hluk, nevýhodou je však proměnná výstupní frekvence a napětí. Na výstupu generátoru je proto zařazen usměrňovač a přenos energie do sítě pak zajišťuje regulovatelný střídač[15].

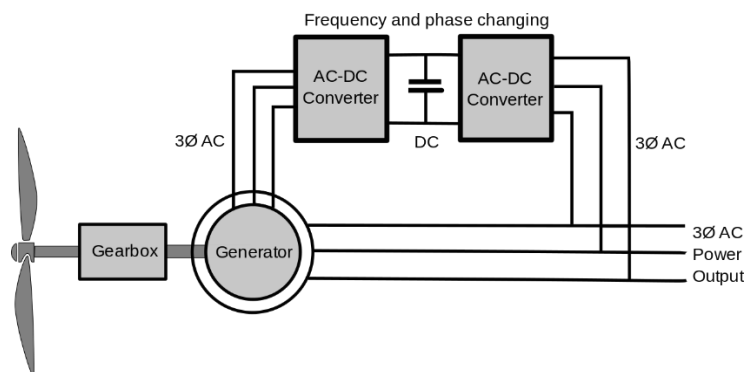
Další značnou nevýhodou je velmi velké množství magnetického materiálu potřebné pro permanentní magnet na rotoru.

### 3.1.2.3 Asynchronní alternátor

Dánský Vestas používá elektrárny klasické konstrukce s převodovkou a rychloběžným generátorem. Alternátor má rotor tvořený permanentními magnety a veškeré úpravy výstupního napětí a frekvence, stejně jako regulaci výkonu, zajišťuje ovládací modul s měničem umístěný přímo v gondole u alternátoru.

### 3.1.2.4 Dvojitě napájený asynchronní alternátor (Doubly-fed induction generator, DFIG)

Jedná se o alternátor, jehož rotor je buzen střídavým proudem z frekvenčního měniče, což umožňuje určitou nezávislost frekvence na otáčkách rotoru. Na rozdíl od synchronních generátorů tak při poryvech větru nevznikají mechanické rázy způsobené prudkým nárůstem točivého momentu působícího na rotor, který je regulací udržován na svých synchronních otáčkách. Zároveň však ve srovnání s elektrárnami se stejnosměrným přenosem podstatně klesá potřebný výkon měniče, který nepřenáší plný jmenovitý výkon generátoru.



Obrázek 3.1 DFIG [8]

### 3.1.3 Regulace jalového výkonu elektrárny

Aby větrná elektrárna splnila PPDS a mohla být připojena do distribuční sítě, musí zvládat regulaci jalového výkonu, který musí udržovat ve stanovených mezích. Může k tomu využít jeden nebo více z následujících způsobů:

#### 3.1.3.1 Regulace buzení alternátoru

Nejjednodušší regulace je možná u elektráren s konstantními otáčkami alternátoru (např. Wikov). Tento typ jedním z výše uvedených způsobů regulace udržuje otáčky vrtule, a tedy

i rotoru, na konstantní hodnotě, který odpovídá požadované frekvenci výstupního napětí alternátoru. Toto napětí je pak přes transformátor přivedeno rovnou do distribuční sítě.

V takovémto případě lze vzhledem k přímému propojení generátoru se sítí pro regulaci jalového výkonu využít jeho závislost na budícím proudu alternátoru: Podbuzený alternátor ze sítě odebírá jalový výkon odpovídající úrovni podbuzení, naopak přebuzený alternátor do sítě jalový výkon dodává.

V praxi se regulace provádí automatickými regulátory. Úkolem těchto regulátorů je nejen regulací buzení udržovat účinník ve stanovených mezích, případně přímo na konkrétní hodnotě, ale i zabránit překročení bezpečných mezí proudu statoru i rotoru.

### 3.1.3.2 Regulace napětí přepínáním odboček na výstupním transformátoru

Ne příliš přesným, ale konstrukčně jednoduchým způsobem řízení jalového výkonu je použití transformátoru s několika odbočkami na primárním vinutí. Přepínáním těchto odboček pak lze měnit výstupní napětí transformátoru a s ním i dodávaný či odebíraný jalový výkon.

Nevýhodami tohoto řešení jsou nutnost mechanického přepnutí vinutí, které vyžaduje odpojení transformátoru od sítě, a velmi omezený počet stupňů regulace (jednotky).

### 3.1.3.3 Kompenzace účinníku

Jak jsem již uvedl v 1.3.2, účinník je možné ovlivňovat i změnou reaktance obvodu, tj. přidáváním indukčností či kapacit do obvodu se zátěží. Toto samozřejmě platí i pro generátory větrných elektráren. Způsob provedení se pak liší podle typu zařízení, na kterém se regulace provádí.

#### 3.1.3.3.1 Kompenzace u alternátorů

V případě, že je alternátor elektrárny připojen přímo do distribuční sítě, tj. nepoužívá frekvenční měnič nebo střídač, účinník lze dále upravovat tzv. kompenzací (Power Factor Correction, PFC), tj. snížením celkové reaktance připojováním indukčních nebo kapacitních prvků (tlumivek nebo kondenzátorů).

### 3.1.3.3.2 *Kompenzace u pulzních měničů*

V případě generátorů, které jsou do distribuční sítě připojeny prostřednictvím pulzního měniče. Nezávislost výstupního napětí, frekvence a fázového posunu tak umožňuje přesné řízení účinníku i bez použití dalších kompenzačních systémů.

## 3.2 **Fotovoltaické elektrárny (FVE)**

Fotovoltaické elektrárny jsou jediným typem obnovitelného zdroje, který ke svému chodu nezbytně nevyžaduje pohyblivé součásti a neprodukuje hluk ani škodlivé emise. Ke své činnosti využívají tzv. fotoelektrický jev, kdy dopad světla na polovodičový přechod (fotočlánek) na něm způsobí vznik malého stejnosměrného napětí, které je úměrné intenzitě dopadajícího světla.

Stejnosemné napětí na výstupu solárních panelů ovšem znamená, že připojení do běžné (střídavé) distribuční sítě je podmíněno měničem, resp. střídačem, který převede proměnné stejnosměrné napětí soustavy fotovoltaických článků, resp. panelů vzniklých spojením většího množství jednotlivých článků, na střídavé napětí vhodné velikosti a frekvence.

Podobně jako u elektráren větrných i u fotovoltaických je dodávaný výkon omezen povětrnostními podmínkami, resp. množstvím dopadajícího světla. Kromě toho jsou fotovoltaické články velmi citlivé na nerovnoměrné osvětlení a i malá zastíněná plocha může způsobit značný pokles výstupního napětí, resp. výkonu.

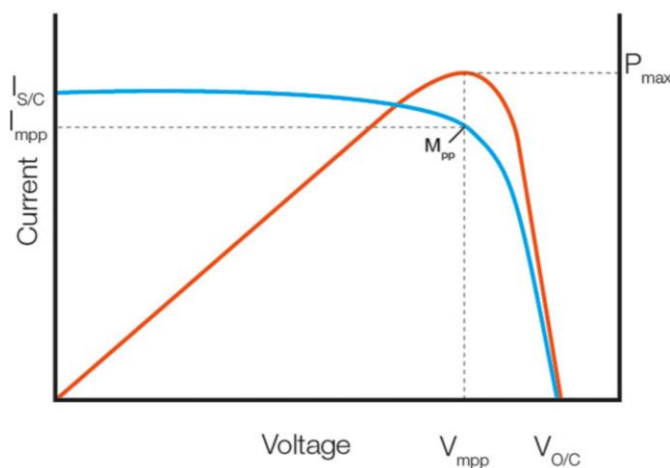
### 3.2.1 **Regulace činného a jalového výkonu**

Jak jsem již uvedl výše, provoz FVE ve střídavé síti je podmíněn použitím střídače. Ten může, ale nemusí, být doplněn DC/DC měničem pro stabilizaci jeho vstupního napětí.

V případě konstrukce s tímto měničem je situace stejná, jako u výše uvedené elektrárny větrné: Řízením napětí, frekvence a fázového posunu lze regulovat jak výkon jalový, tak i činný (až do maximálního výkonu, který mohou panely za daných podmínek poskytnout).

### 3.2.2 Sledování bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracking)

Na obrázku níže je VA charakteristika solárního panelu, na které je vyznačen bod maximálního dodávaného výkonu, tj. nejvyšší účinnosti, při dané intenzitě osvětlení.



Obrázek 3.2 V-A charakteristika solárního panelu [9]

Je tedy zřejmé, že při konstrukci elektrárny je jedním z cílů právě udržování zátěže panelů na této optimální hodnotě. Dosahuje se toho nejčastěji změnou vstupní impedance výše zmíněného zvyšovacího DC/DC měniče na základě měření zatěžovací charakteristiky panelu, teploty panelu, nebo udržováním konstantního poměru napětí se zátěží k napětí naprázdno. Tato funkce se nazývá Maximum Power Point Tracking (MPPT).

### 3.2.3 Udržování maximálního výkonu

Stejně jako větrné elektrárny poskytují maximální výkon pouze při natočení přímo proti větru, u solárních totéž platí pro úhel dopadajícího světla (tj. jeho intenzitu). V případě pevně umístěných panelů je tak nutné velmi pečlivě zvolit jejich umístění a úhel tak, aby na ně sluneční světlo dopadalo co nejdéle a co největší intenzitou.

Tento problém částečně řeší tzv. trackery (sledovače), otočné nosiče panelů s elektrickým pohonem, které sledují pohyb Slunce po obloze a udržují tak panely namířené přímo proti dopadajícímu světlu. Nevýhodami trackerů jsou však vyšší náklady na pořízení i údržbu a nižší spolehlivost.

### 3.3 Spalování biomasy

V energetice se jako biomasa označuje organický materiál, který je možné využít jako palivo výrobu elektrické nebo tepelné energie. Dělí se na 2 hlavní druhy:

1. Biomasa pěstovaná pro energetické účely, tj. rychle rostoucí dřeviny a rostliny, obiloviny.
2. Odpadní biomasa – zbytky z rostlinné a živočišné výroby, těžby a zpracování dřeva, biologicky rozložitelný komunální a průmyslový odpad (zbytky z potravin, papíru a jejich výroby) apod.

Získané teplo se pak využívá pro pohon parní turbíny a následně generátoru, stejně jako u elektráren na fosilní paliva. I regulace výkonu pak funguje na stejném principu – činný výkon lze regulovat změnou tepelného výkonu kotle, tj. změnou množství, resp. tlaku, dodávané páry, a jalový výkon změnou budicího proudu alternátoru.

Spalování biomasy se vyznačuje téměř nulovou bilancí CO<sub>2</sub>, protože množství uvolněného plynu je přibližně stejné jako to, které rostliny během svého života absorbují při fotosyntéze.

Biomasu lze také přidávat do paliva klasických uhelných elektráren. Příkladem může být původně uhelná elektrárna Hodonín, kde v roce 1999 začaly probíhat zkoušky s kombinovaným spalováním lignitu a otrub. Od roku 2009 pak jeden z bloků elektrárny spaluje výhradně biomasu a vytváří tak 30 MW z celkových 105 MW.

Tato elektrárna zároveň provozuje tzv. kogeneraci (kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla, KVET), kdy se její odpadní teplo (s celkovým tepelným výkonem 250 MW) využívá pro ohřívání vody. Lepší využití energie z paliva tak snižuje objem spáleného paliva a s ním provozní náklady i emise škodlivých látek. [18] [19].

### 3.4 Spalování bioplynu

Bioplyn je produkt vznikající anaerobním rozkladem (převážně) mokré biomasy a obsahující převážně metan a oxid uhličitý. Pro jeho výrobu se nejčastěji využívají vedlejší produkty ze zemědělství a komunální i průmyslový bioodpad. V bioplynových stanicích se zároveň využívá i skládkový plyn, vznikající na skládkách odpadu, a kalový plyn, vznikající v čističkách odpadních vod.

Tyto plyny se v bioplynových stanicích využívají buď pouze pro výrobu elektrické energie, prostřednictvím generátorů poháněných spalovacím motorem (buď pístovým, nebo turbínou). Elektrická účinnost takovýchto jednotek je pouze 30-40 %, ale v případě využití odpadního tepla se celková účinnost pohybuje až okolo 90 %. [20]

### 3.5 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny využívají k pohonu generátorů potenciální a kinetickou energii vody prostřednictvím jednoho z několika typů vodních turbín. V ČR tyto elektrárny momentálně tvoří přibližně 10 % celkového instalovaného výkonu, z čehož většinu tvoří tzv. velké vodní elektrárny s výkonem nad 10 MW. Využívají se zde převážně 3 druhy vodních elektráren:

1. Akumulační – tyto ke své činnosti využívají akumulaci vody v nádrži, která vznikne přehrazením vodního toku. Vzniká tak rezerva, kterou lze využít k pokrytí špičkového zatížení a následně v době snížené poptávky opět obnovit. Trvalý výkon elektrárny je závislý na spádu a aktuálním průtoku vodního toku, ze kterého je přehrada napájena. Výhodami akumulčních elektráren jsou velmi dobrá regulovatelnost a rychlá reakce na změnu poptávky, nevýhodami pak zejména velký zásah do okolní krajiny a díky tomu i omezený počet lokalit, kde lze tyto elektrárny realizovat.
2. Průtočné – ty jsou poháněny proudící vodou s minimální, příp. žádnou, možností akumulace. Staví se většinou na jezu, který zvyšuje rozdíl hladin před a za turbínou, což umožňuje dosáhnout většího výkonu při stejném průtoku díky větší potenciální energii vody. Nepracují s žádnou formou akumulace vody, což výrazně rozšiřuje možnosti výstavby, neboť se tím podstatně zmenšuje vliv na okolní krajinu. Nevýhodou je však to, že maximální dosažitelný výkon je vždy omezen aktuálním průtokem. Tato konstrukce je v ČR využívána spíše u elektráren menších výkonů.
3. Přečerpávací – jak už název napovídá, využívají akumulace vody formou jejího přečerpávání mezi dvěma nádržemi v různé výšce. Během noci, kdy je zátěž distribuční sítě nejnižší, je generátor elektrárny využíván jako čerpadlo a čerpá vodu z dolní nádrže do horní. Během zvýšené poptávky se pak zásoba vody v horní nádrži využívá pro generaci elektrické energie. Po poklesu poptávky se pak celý proces opakuje. Hlavní výhodou tohoto řešení je velký rozsah regulace a poměrně rychlé



reakce (přechod mezi jednotlivými režimy trvá řádově minuty), což umožňuje využití elektrárny pro efektivní regulaci výkonů v distribuční síti. Nevýhodou je značně omezené množství vody v akumulacní nádrži a tudíž i omezená doba souvislého provozu.

### 3.5.1 Regulace vodních elektráren

Základem všech typů vodních elektráren jsou, stejně jako u elektráren větrných, asynchronní či synchronní generátory. I regulace tedy může probíhat podobným způsobem, tj. elektricky změnou buzení generátoru a mechanicky změnou množství vody přiváděné na turbínu, v některých případech (Kaplanova turbína) pak i natáčením lopatek oběžného kola turbíny. Při požadavku na snížení výkonu či úplné odstavení generátoru však energie proudící vody omezuje maximální rychlost, kterou je možné průtok měnit, aniž by došlo k poškození regulačního zařízení.

## 4 Obnovitelné zdroje v ČR

Následující tabulka zobrazuje rozdělení státem podporovaných obnovitelných zdrojů elektrické energie (připojených do distribuční sítě) dle statistiky OTE, a.s. [22]:

Tabulka 4.1 Podíl OZE na výrobě elektrické energie v ČR

Druh zdroje / paliva	Zdroje registrované v CS OTE celkem			
	Instalovaný výkon (MW)	Počet zdrojů	Podíl výkonu (%)	Podíl počtu (%)
Fotovoltaické elektrárny	2.072,0	28.567	9,3	86,7
Větrné elektrárny	316,9	138	1,4	0,4
Biomasa	2.938,6	144	13,2	0,4
Bioplynové stanice	318,2	205	1,4	0,6
Ostatní plynové	96,0	12	0,4	0,0
Důlní plyn	22,4	19	0,1	0,1
Skládkový a kalový plyn	54,9	174	0,2	0,5
Ostatní druhotné zdroje	540,9	34	2,4	0,1
Malé vodní elektrárny do 10 MW	354,1	2.132	1,6	6,5
Vodní elektrárny nad 10 MW	742,8	23	3,3	0,1
Přečerpávací vodní elektrárny	1.170,0	7	5,3	0,0
Jaderné elektrárny	4.290,0	10	19,3	0,0
Tuhý komunální odpad	55,2	5	0,2	0,0
Ostatní zdroje (KVET, nepodporované zdroje)	9.294,3	980	41,9	3,0
Celkový součet	22.188,9	32.939	100,0	100

Z údajů výše zřejmé, že v popularitě obnovitelných zdrojů jasně vedou fotovoltaické elektrárny malých výkonů, které tvoří většinu všech aktuálně registrovaných zdrojů, do sítě však stále dodávají méně než 10 % z celkového výkonu. Může za to především tzv. fotovoltaický boom, kde velmi vysoká výkupní cena energie z fotovoltaických elektráren (až 12 Kč/kWh) v letech 2009-2013 společně s klesající pořizovací cenou panelů udělala provoz fotovoltaických elektráren velmi výhodným a to zejména pro malé elektrárny do 30 kWp, pro jejichž připojení nebyla nutná licence. To vedlo k velmi velkému zájmu a počet připojených FVE začal velmi rychle narůstat. V reakci na to byla v roce 2014 tato podpora zrušena a počet FVE se opět relativně stabilizoval. Na webových stránkách ERÚ již bohužel není dostupný (resp. se mi nepodařilo dohledat) dokument s vývojem počtu nově připojených FVE před rokem 2013, zbyl pouze graf, který v zájmu čitelnosti přikládám v příloze A.

## 5 Připojování OZE do sítě

Existují 3 základní možnosti provozu výroby el. energie:

1. Výroba pro vlastní spotřebu (tzv. ostrovní provoz, off-grid) – veškerý dodávaný výkon je spotřebován připojenou zátěží nebo uložen do akumulátorů, výroba tedy pracuje samostatně bez jakéhokoliv propojení s distribuční sítí. Používá se převážně pro elektrárny velmi malých výkonů (jednotky kW), které slouží jako zdroj elektrické energie v místech, kde by připojení do sítě bylo neekonomické nebo úplně nemožné.
2. Kombinovaný provoz – výroba převážně pro vlastní spotřebu, výroba však je připojena k distribuční sítí a v případě, že je její okamžitý výkon vyšší než příkon zátěže, přebytečný výkon dodává do sítě. Tímto způsobem se velmi často provozují malé soukromé FVE např. na střeších domů.
3. Síťový (on-grid) – veškerý vyrobený výkon je dodáván do distribuční sítě. Jedná se o prakticky jediný možný způsob provozu zdrojů velkých výkonů (stovky kW a více). V tomto režimu jsou kladeny nejvyšší požadavky na regulaci zdroje.

Vzhledem k zaměření této bakalářské práce se dále budu věnovat pouze síťovému režimu.

### 5.1.1 Podmínky připojení k OZE k síti podle PPDS

Požadavky na vlastnosti a regulační schopnosti nově připojovaných zdrojů určuje aktuální verze PPDS, resp. příloha 4 „PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTIBUČNÍ SOUSTAVY“. Dále se budu věnovat pouze požadavkům na zdroje s výkonem od 100 kW výše:

### 5.1.2 Všeobecné podmínky pro připojení

Nově připojované výroby do DS musí být připraveny pro instalaci dálkového ovládání, tzn. instalování ovládacího obvodu komunikační cesty mezi elektroměrovým rozváděčem a novou výrobnou. Připojení k síti PDS se děje v místě připojení s oddělovací funkcí, přístupným kdykoliv personálu PDS. U výroben s instalovaným výkonem 100 kVA a více musí být spínač s oddělovací funkcí vybaven dálkovým ovládním a signalizací stavu.

Posouzení možností připojení z hlediska zpětných vlivů na síť vychází z impedance sítě (zkratového výkonu) v místě připojení (ve společném napájecím bodě), připojovaného výkonu, stejně jako druhu a způsobu provozu výrobní elektrárny a údajů o souvisejících výrobnách, včetně jejich vlivu na napětí v DS, s využitím skutečně naměřených hodnot v související oblasti DS.

### 5.1.3 Požadavky na regulaci

Požadavky na regulaci zdrojů připojených do distribuční soustavy stanovuje příloha 4 k PPDS z roku 2017 – Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy [9].

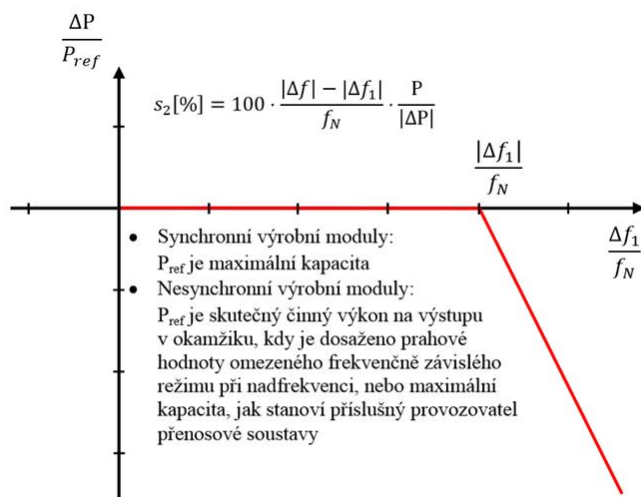
Výrobní s výkonem od 100 kW začlenit do systému dálkového řízení. Jde především o:

- Řízení spínače s oddělovací funkcí (především vypnutí při kritických stavech v síti – „dálkově VYP/ZAP“).
- Omezení dodávaného činného výkonu (s výjimkou MVE podle [1]).
- Řízení jalového výkonu a napětí.
- Rozhraní pro přenos dat.

Kromě toho provozovatel každé výrobní musí oznámit provozovateli distribuční soustavy, jestli je danou výrobní možné spustit bez použití vnějšího zdroje elektrické energie

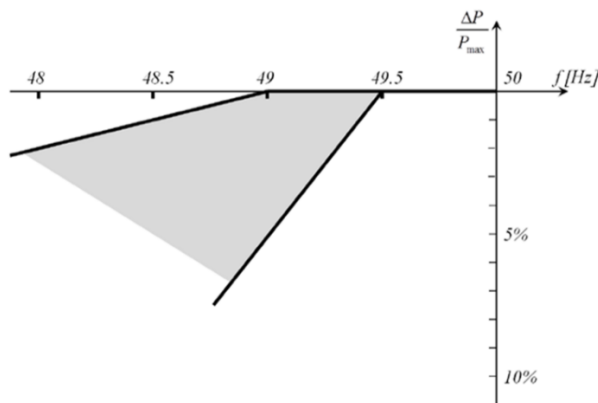
### 5.1.3.1 Řízení činného výkonu

Pokud dojde k nárůstu frekvence v síti nad stanovenou hodnotu (v ČR 50,2 Hz), výrobní musí snižovat svůj činný výkon a to o 20 % na každých 0,5 Hz odchylky:



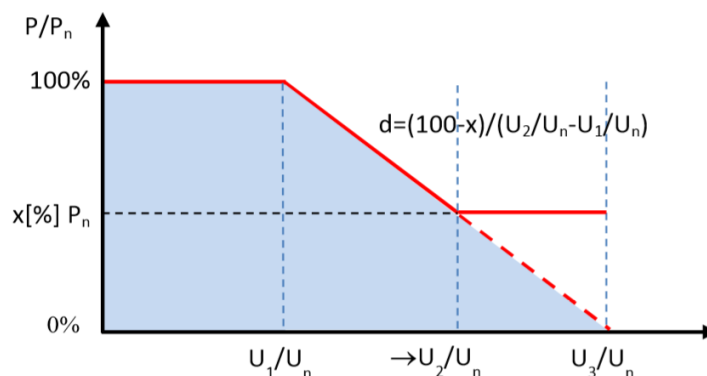
Obrázek 5.1 Snižování činného výkonu při nadfrekvenci

Ke snížení výkonu musí zároveň dojít i při podfrekvenci (pod 49,5 Hz).



Obrázek 5.2 Snižování činného výkonu při podfrekvenci

Všechny výrobní nad 16 A/fázi připojené do distribuční sítě na hladině nízkého napětí také musí být schopny regulovat svůj činný výkon v závislosti na napětí v přípojném místě. Konkrétní hodnoty stanoví provozovatel sítě nebo studie připojitelnosti.



Obrázek 5.3 Regulace činného výkonu v závislosti na napětí

Posledním kritériem u činného výkonu je jeho řízení v závislosti na provozních podmínkách. Podle něj musí být výrobní schopna provozu se sníženým činným výkonem, případně se i úplně odpojit, přičemž pokyn pro tento úkon musí být realizovatelný prostřednictvím dálkového řízení. Provozovatel sítě (PDS) je oprávněn takovýto pokyn vydat v případě, že by mohlo dojít k ohrožení bezpečného provozu sítě, nebo při nutnosti provést údržbu či stavební práce v síti. K dosažení požadované úrovně výkonu musí u výroben se synchronními generátory dojít do 5 minut, v případě nesynchronních generátorů (např. střídačů FVE) pak do 1 minuty. Výrobní moduly musí být schopny zvyšovat výkon gradientem alespoň  $2\% P_n/\text{min}$ , ale ne rychleji než  $40\% P_n/\text{min}$ . Výrobní moduly musí být schopny snižovat výkon gradientem alespoň  $-2\% P_n/\text{min}$ , ale ne rychleji než  $-40\% P_n/\text{min}$ .

Při omezení činného výkonu vzrůstem frekvence může být činný výkon opět zvyšován teprve po návratu frekvence na hodnotu  $f \leq 50,1$  Hz. Rozsah necitlivosti musí být do 10 mHz.

#### 5.1.4 Řízení jalového výkonu

Dalším požadavkem na zdroje nad 100 kVA je možnost řízení jalového výkonu tak, aby v místě připojení byl účinník minimálně 0,90 (kapacitní nebo induktivní). Po dohodě je možné v rámci podpůrné služby DS realizovat i větší rozsah řízení.

Při dodávce činného výkonu je nastavení jalového výkonu zadáváno PDS buď pevnou hodnotou, nebo, když to provoz sítě vyžaduje, dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou. Žádaná hodnota je:

- Pevná hodnota jalového výkonu
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu
- Pevná hodnota účinníku
- Hodnota účinníku závislá na napětí
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu
- Zadaná hodnota napětí

Pokud je PDS zadána charakteristika, musí být automaticky nastavena odpovídající ustálená hodnota jalového výkonu:

- Pro charakteristiku  $\cos \varphi = f(P)$  do 10 s
- Pro charakteristiku  $Q(U)$  nastavitelně mezi 10 s a jednou minutou (udá PDS)

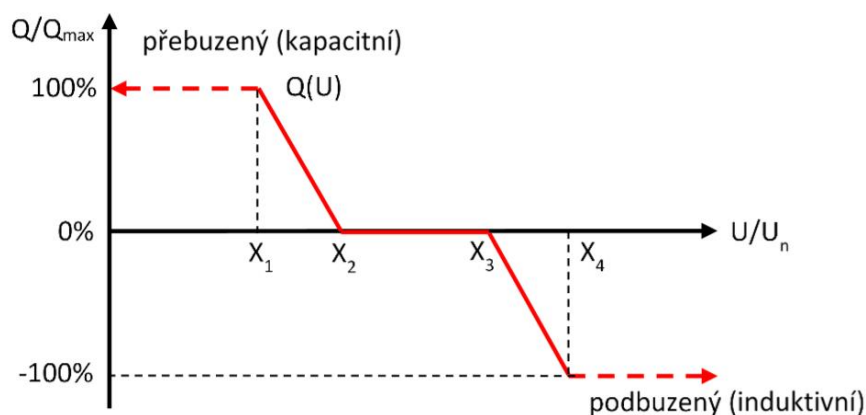
Pokud výrobná používá pro kompenzaci jalového výkonu kompenzační kondenzátory, tyto mohou být připojeny pouze k již aktivnímu generátoru a naopak odpojeny současně s ním.

Provozovatel může také vyžadovat opatření pro omezení napětí harmonických a zamezení zpětnému ovlivnění systému dálkového ovládání, Výkon, zapojení a způsob regulace kompenzačního zařízení tedy musí odsouhlasit PDS.

##### 5.1.4.1 Řízení jalového výkonu v závislosti na napětí

$Q(U)$  charakteristika je definována čtyřmi body, které definují tvar regulační charakteristiky, kde osa X odpovídá poměru měřené hodnoty napětí v místě připojení výrobní a jmenovité hodnoty napětí, osa Y odpovídá poměru dodávaného/odebraného jalového výkonu výrobní

a maximální hodnoty jalového výkonu, který je výrobní schopna dodat/odebrat. Příklad takové charakteristiky je na obrázku níže:



Obrázek 5.4 Závislost dodávaného jalového výkonu na napětí

Význam jednotlivých bodů:

- Bod  $X_1$ : Hodnota poměru  $U/U_n$  menší než 1, které odpovídá maximální dodávaný jalový výkon výrobní, pro zvýšení hodnoty napětí v místě připojení.
- Bod  $X_2$ : Hodnota poměru  $U/U_n$  menší než 1, která je počáteční hodnotou pro dodávku jalového výkonu pro zvýšení napětí v místě připojení.
- Bod  $X_3$ : Hodnota poměru  $U/U_n$  větší než 1, která je počáteční hodnotou odběru jalového výkonu pro snížení napětí v místě připojení.
- Bod  $X_4$ : Hodnota poměru  $U/U_n$  větší než 1, které odpovídá maximální odebíraný jalový výkon výrobní, pro snížení hodnoty napětí v místě připojení.

Příklad nastavení:  $X_1=0,94:1$ ;  $X_2=0,97:0$ ;  $X_3=1,05:0$ ;  $X_4=1,08:-1$

Nesynchronní výrobní modul musí po skokové změně napětí dosáhnout 90 % požadované změny jalového výkonu do doby, kterou stanoví PDS v rozmezí 1 až 5 sekund. K ustálení na hodnotu s maximální přípustnou odchylkou 5 % od maximální stanované hodnoty jalového výkonu pak musí dojít v rozmezí od 5 do 60 sekund – i zde konkrétní hodnotu stanoví PDS.



### 5.1.5 Možnosti připojení výroby k síti

U fotovoltaických a větrných elektráren je nejčastěji používaným řešením připojení přímo k distribuční síti, neboť se často staví v relativně odlehlých lokalitách, kde jiné výroby ani odběrná místa nejsou. U takového řešení je ale nutné věnovat zvýšenou pozornost možnému ovlivnění okolních odběratelů.

Druhou variantou je připojení ke zvláštnímu vývodu stávající vn rozvodny. Tato varianta může být ekonomicky náročnější z důvodu nutných úprav rozvodny a dlouhého vedení k ní, výrazně však snižuje riziko ovlivnění odběratelů.

## 5.2 Kompenzace jalového výkonu

V případě, že jalový výkon nelze regulovat přímo u zdroje (např. generátoru), nebo takovýto způsob regulace nesplňuje požadavky dané PPDS, je nutné regulaci zajistit přídatným zařízením. Tato zařízení se nazývají kompenzátory jalového výkonu a skládají se z baterie kondenzátorů nebo tlumivek, jejichž připojením lze měnit celkovou reaktanci v obvodu a s ní i velikost jalového výkonu přenášeného mezi zdrojem (resp. kompenzátozem) a spotřebičem.

### 5.2.1 Hierarchie kompenzace

Jak jsem již uvedl v kapitole 2, v elektrizační soustavě se projevuje silná vazba mezi napětím a jalovým výkonem. Napětí má navíc lokální charakter, tj. v jednotlivých místech sítě se může lišit. Z toho vyplývá, že velikost napětí v určitém místě sítě je možné změnou velikosti protékajícího jalového výkonu – a to jak na straně odběru (spotřebiče), tak na straně dodávky (zdroje), centralizovaně i decentralizovaně. Změna napětí v uzlu však ovlivní i napětí v uzlech sousedních v závislosti na jejich zapojení.

V ES České republiky je pro řízení napětí používána třístupňová hierarchie:

#### 5.2.1.1 Terciární regulace

Jedná se o nejvyšší úroveň regulace, která pracuje na úrovni celé elektrizační soustavy. Řídí toky jalových výkonů mezi pilotními uzly soustavy s cílem zajistit bezpečný a ekonomický provoz soustavy, tj. co nejnižší ztráty ve vedení. Vzhledem k vysokým nárokům na přesnost

a rychlost odezvy je tento systém řízen automaticky na základě nastaveného povoleného rozsahu napětí, aktuální rezervy regulačního výkonu v jednotlivých pilotních uzlech, toků jalového výkonu do jiných elektrizačních sítí a dalších parametrů.

### 5.2.1.2 Sekundární regulace

Sekundární regulace probíhá na úrovni pilotního uzlu sítě regulací toků jalového výkonu takovým způsobem, aby bylo dodrženo požadované napětí v uzlu pomocí systému zvaného automatický regulátor napětí (ARN). Potřebný výkon se určuje z momentální odchylky napětí v uzlu oproti požadovaného a požadavek na regulaci se následně rozdělí na jednotlivá regulační zařízení, tzv. sekundární regulátory napětí (SRU), a z nich na jednotlivé zdroje připojené do uzlu.

V tomto případě má regulátor povolenu delší dobu odezvy a to až 2 minuty.

#### 5.2.1.2.1 Automatická sekundární regulace napětí (ASRU)

Úkolem systému ASRU je automaticky zajišťovat udržování napětí v pilotním uzlu soustavy v předepsaných mezích nezávisle na provozním stavu soustavy prostřednictvím regulace dodávky jalového výkonu. Tato regulace probíhá prostřednictvím zpětné vazby z regulovaného uzlu, regulátor tak může rychle reagovat na náhlé změny napětí, což je důležitá zejména u soustav, u kterých tyto změny napětí probíhají často a které zároveň nedisponují velkou kapacitou regulačního výkonu. [27]

Snižováním množství přenášeného jalového výkonu zároveň snižuje přenosové ztráty ve vedení pro účinnější a tím i ekonomičtější provoz celé soustavy.

Při vytváření tohoto uzlu je nutné najít technické řešení, které umožňují zapojení všech těchto akčních členů do jednoho systému, ve kterém budou rozloženy rovnoměrně, aby dodávaný jalový výkon nebyl soustředěn pouze v jednom místě soustavy.

### 5.2.1.3 Princip ASRU

Fyzikální princip ASRU je založen na následujícím vztahu:

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (5.9)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že pro dosažení změny napětí v uzlu  $i$  je třeba změnit dodávku jalového výkonu v jednom z dalších pilotních uzlů ( $j$ ). Velikost této změny závisí na velikosti změny napětí a citlivostní konstantě  $a$  regulátoru. Malý zdroj jalového výkonu připojený v napěťově citlivém uzlu soustavy tedy může představovat stejnou, nebo i větší, změnu jalového výkonu oproti velkému zdroji připojenému v místě s malou citlivostí.

### 5.2.1.4 Pilotní uzly

Pilotní uzel je základním bodem regulace napětí a jalového výkonu v soustavě. Jedná se totiž o jediné místo, kde lze měnit napětí změnou dodávky jalového výkonu, aniž by tato změna měla výrazný vliv na napětí v sousedních uzlech sítě, což umožňuje velmi rychlou a přesnou regulaci.

V praxi má pilotní uzel převážně podobu klasické rozvodny, do které je připojen alespoň jeden výrazně odběr elektriny, což zvyšuje jeho napěťovou stabilitu. Do uzlu je zároveň připojena i minimálně jedna výrobná, u které tak není nutné počítat s omezovacími podmínkami a vlivy rozveden mezi soustavou a uzlem.

Předpokladem pro bezproblémový chod regulace uzlu je samozřejmě i velká přesnost měření napětí na přípojnicích rozvodny a možnost sběru dat na dálku (telemetrie) za účelem monitoringu aktuálního stavu rozvodny a aktivní topologie (tj. připojené transformátory, tlumivky, vedení elektráren, přenosová a distribuční vedení apod.).

### 5.2.1.5 Zadávání požadované hodnoty napětí

Jak jsem již uvedl výše, hlavním účelem systému ASRU je udržovat napětí v pilotním uzlu na požadované hodnotě. Zadávání této hodnoty regulátoru pak může probíhat několika způsoby:

1. Pevně nastavená hodnota napětí – používá se v soustavách vysokého napětí, kde existence transformátorů vn/nn bez možnosti řízení odboček pod zatížením. Takováto soustava se reguluje na pevnou hodnotu napětí, které odpovídá požadovanému napětí na nn straně těchto transformátorů. Systém ASRU zde tedy vykonává pouze stabilizaci napětí.
2. Ručně zadaná hodnota napětí – zadávání zde ručně řídí dispečer prostřednictvím uživatelského rozhraní řídicího systému. Tato varianta je vhodná pro soustavy, ve kterých nedochází k častým změnám a stačí tedy pouze občasné korekce.
3. Automatická (programová) změna hodnoty napětí – zde novou hodnotu napětí počítá specializovaný software, který může zároveň provádět i další úkony jako např. vypnutí či zapnutí vedení. Nová hodnota se počítá buď periodicky v nastaveném intervalu, na základě požadavky dispečera, nebo při výrazné změně v soustavě (např. vypnutí vedení).

Za účelem omezení četnosti zásahů způsobených malými výchylkami regulovaného napětí se na regulátoru ASRU nastavuje hystereze, která však nesmí snižovat citlivost regulátoru. V soustavách 400 a 220 kV se tak jedná o toleranci  $\pm 0,5$  kV, v soustavách 110 kV o  $\pm 0,25$  kV a v soustavách 22 kV pak o  $\pm 0,11$  kV. [27]

### 5.2.1.6 Poruchy a jejich příčiny

V terminologii regulační techniky se pojmem „porucha“ označuje jakákoliv změna, jejímž důsledkem je regulační odchylka nebo změna její velikosti a následný zásah regulátoru, která se snaží tuto odchylku eliminovat.

Základním a nejběžnějším druhem poruch jsou poruchy napěťové, které vznikají vlivem běžného provozu soustavy, např. zapnutí, vypnutí, nebo rekonfigurací vedení, transformátorů nebo tlumivek, případně velkou změnou dodávky nebo odběru. Napěťové změny mohou také vzniknout vlivem činnosti kompenzačního zařízení nebo zkratem v některém místě soustavy.

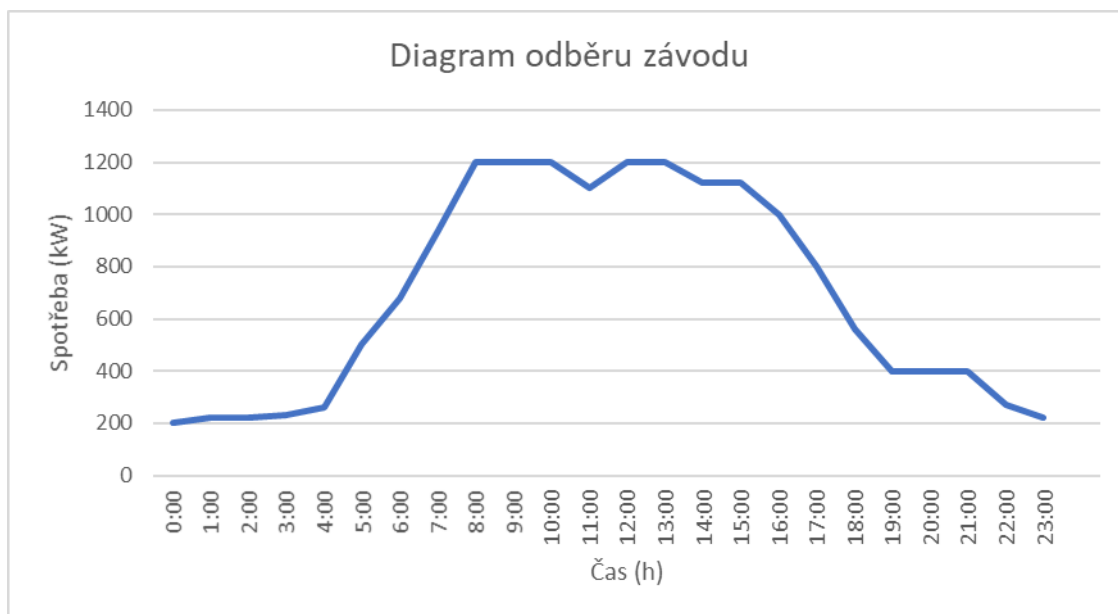
Dalšími možnými příčinami vzniku poruch jsou např. špatně koordinované další (elektricky) blízké ASRU, řízení účinníku větrných či fotovoltaických elektráren nebo rychlá změna regulační rezervy jalového výkonu (např. vlivem rozběhu větrné elektrárny). [27]

### **5.2.2 Primární regulace**

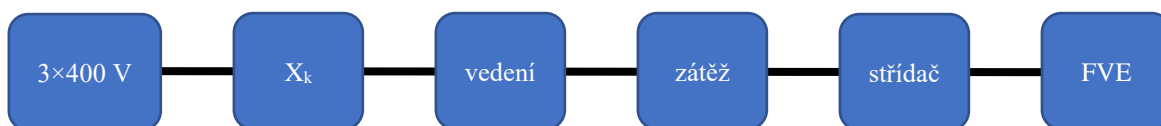
Jedná se o základní stupeň regulace, probíhající na úrovni jednotlivých generátorů. Jejím cílem je udržovat napětí na svorkách generátoru na konstantní úrovni, resp. na úrovni požadované sekundární regulací. Takto regulovat lze tedy pouze alternátory s proměnným buzením.

## 6 Vliv jalového výkonu na síť

Analýzu vlivu jalového výkonu na napětí v síti provedu na příkladu sítě s fotovoltaickou elektrárnou, která je připojena k vn rozvodně průmyslového závodu s odběrem kolísajícím mezi 200 kW při nečinnosti a 1200 kW při plném zatížení:



Obrázek 6.1 Časový průběh odběru závodu



Obrázek 6.2 Blokové schéma řešené sítě

Na střeše závodu je umístěna fotovoltaická elektrárna, která slouží k částečnému či úplnému pokrytí spotřeby závodu a tudíž snížení odběru energie z distribuční sítě. Aby FVE dodala dostatečný výkon i při horších světelných podmínkách, jsou použity panely s celkovým maximálním výkonem 2000 kW. Závod a elektrárna pracují s napětím 400 V, přenos energie zajišťuje na každé fázi 5 větví vedení s průměrnou délkou 700 m a průřezem 240 mm<sup>2</sup>. Celkové uspořádání znázorňuje blokové schéma níže:

Následuje vzorový výpočet pro odběr závodu 500 kW a okamžitý výkon FVE 5 % maximálního, tj. 100 kW. Uvažuji symetrický odběr, tj. dílčí výpočty mohu provést jen na jedné fázi. Kompletní výpočty provedu pouze u první varianty. Veškeré další výpočty jsem zpracoval pomocí MS Excel (verze 16 pro MS Office 365). Soubor .xlsx přikládám na CD,

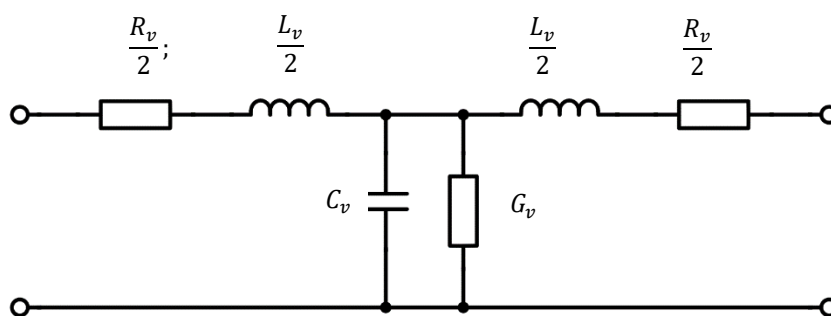
kde se nachází i elektronická verze tohoto dokumentu. Tabulku s použitými vstupními daty a výsledky pro obě varianty výpočtů přikládám v přílohách B až D.

## 6.1 Varianta 1: Kompenzace Q reaktancí

Jako první příklad poslouží klasická kompenzace jalového výkonu pomocí kompenzační tlumivky či kondenzátoru.

### 6.1.1 Parametry náhradního schématu vedení

Pro účely výpočtů jsem vedení uvnitř závodu nahradil T-článkem:



Obrázek 6.3 Náhradní schéma vedení

Pro rozvod jsem zvolil kabely U-1000 R2V od výrobce NKT Cables. V katalogovém listě (který také přikládám na CD) jsem našel odpor a indukčnost vedení:

Tabulka 6.1 Udávané parametry vedení

$R_k$	0,0754	$\Omega / \text{km}$
$L_k$	0,222	mH/km

Kapacitu vedení mohu zanedbat, z T-článku se tak stane pouze sériové spojení  $R_v$  a  $L_v$ .

$$R_v = R_k \cdot l = 0,0754 \cdot 0,7 = 0,05278 \Omega \quad (6.1)$$

$$L_v = L_k \cdot l = 0,222 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 = 0,155 \mu\text{H} \quad (6.2)$$

Z impedance se vypočítám reaktanci:

$$X_{L_v} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_v = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,155 \cdot 10^{-3} = 0,0488 \Omega \quad (6.3)$$

A následně si je vyjádřím jako komplexní impedanci:

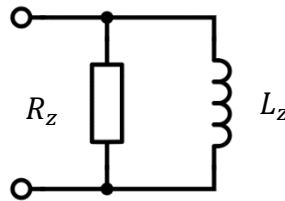
$$\bar{Z}_v = R_v + X_{L_v}i = 0,05278 + 0,0488i \Omega \quad (6.4)$$

O přenos každé fáze se stará 5 takovýchto kabelů. Opět předpokládám rovnoměrné rozdělení zátěže, celkovou impedanci tudíž tvoří podíl impedance 1 vodiče a jejich počtu:

$$\bar{Z}_{v_{celk}} = \frac{\bar{Z}_v}{5} = 0,010556 + 0,00976i \Omega \quad (6.5)$$

### 6.1.2 Výpočet impedance zátěže

Zátěž má v tomto případě induktivní charakter:



Obrázek 6.4 Náhradní schéma zátěže

Z činného výkonu (resp. příkonu) zátěže a účinníku zjistím výkon zdánlivý:

$$S_z = \frac{P_z}{\cos \varphi} = \frac{500}{\cos 0,9} = 185,19 \text{ kVA} \quad (6.6)$$

A z něj jalový:

$$Q_z = S_z \cdot \sin(\arccos \varphi) = 166,67 \cdot \sin(\arccos 0,9) = 80,72 \text{ kvar} \quad (6.7)$$

Oba si vyjádřím jako výkon komplexní:

$$\bar{S}_z = P + Qi = 166,67 + 80,72i \text{ kVA} \quad (6.8)$$

Ze sdruženého napětí si vypočítám fázové:



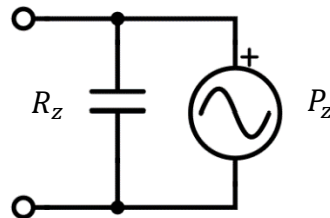
$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V} \quad (6.9)$$

A mohu si vypočítat komplexní impedanci zátěže:

$$\bar{Z}_z = \frac{U_f^2}{\bar{S}_z^*} = \frac{230^2}{166,67 - 80,72i} = 0,2592 + 0,1255i \quad (6.10)$$

### 6.1.3 Impedance střídače FVE

Při nízkém výkonu FVE její střídač představuje zátěž s kapacitním charakterem, která zde má spotřebu -15 kvar (3f).



Obrázek 6.5 Náhradní schéma FVE

$$\bar{Z}_s = -\frac{U_{3f}^2}{Q_s} i = -\frac{400^2}{15000} i = -10,66667i \Omega \quad (6.11)$$

### 6.1.4 Celková impedance obvodu

$$\begin{aligned} \bar{Z}_c &= \bar{Z}_{v_{celk}} + \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_s} + \frac{1}{\bar{Z}_z}} \quad (6.12) \\ &= (0,01056 + 0,00976i) + \frac{1}{\frac{1}{-10,6667i} + \frac{1}{0,2592 - 0,1255i}} \\ &= 0,2758 + 0,1303i \Omega \end{aligned}$$

### 6.1.5 Celkový odebíraný výkon

$$\begin{aligned}\bar{S}_{celk1} &= \frac{U_f^2}{Z_c^*} - \bar{S}_{sf} = \frac{230^2}{0,2758 - 0,1303i} - \frac{100 \cdot 10^3}{3} \\ &= 124766,91 + 74676,38i \text{ VA}\end{aligned}\quad (6.13)$$

### 6.1.6 Celkový účinník

$$\cos \varphi_{celk1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{124766,91}{\sqrt{124766,91^2 + 74676,38^2}} = 0,858 \quad (6.14)$$

## 6.2 Kompenzace účinníku

$$\begin{aligned}Q_{cíl} &= \frac{P_{celk1}}{\cos \varphi_{cíl}} \cdot \sin(\arccos \varphi_{cíl}) = \frac{124766,91}{0,98} \cdot \sin(\arccos 0,98) \\ &= 24828,30 \text{ var}\end{aligned}\quad (6.15)$$

$$Q_{komp} = Q_{cíl} - Q_{celk1} = 24828,30 - 74676,38 = -49848,1 \text{ var} \quad (6.16)$$

$$X_{komp} = \frac{U_f^2}{Q_{komp}} = \frac{230^2}{-49848,1} = -1,070 \Omega \quad (6.17)$$

Záporná hodnota reaktance značí, že ji tvoří kapacita. Její velikost si mohou spočítat z rovnice 1.6:

$$C_{komp} = -\frac{Q_{komp}}{230^2 \cdot \pi \cdot 50} = -\frac{-1,070}{230^2 \cdot \pi \cdot 50} = 5,950 \cdot 10^{-3} \text{ F} = 5950 \mu\text{F}$$

### 6.2.1 Síť po kompenzaci

$$\begin{aligned}\bar{S}_{celk2} &= P_{celk1} + (Q_{celk1} + Q_{komp})i = P_{celk1} + Q_{cíl}i \\ &= 124766,91 + 24828,30i \text{ VA}\end{aligned}\quad (6.18)$$

$$\cos \varphi_{celk2} = \frac{P_{celk1}}{\sqrt{P_{celk1}^2 + Q_{cíl}^2}} = \frac{124766,91}{\sqrt{124766,91^2 + 24828,30^2}} = 0,980 \quad (6.19)$$

### 6.2.2 Provozní náklady

$$I_{celk1} = \frac{S_{celk1}}{U_f} = \frac{\sqrt{P_{celk1}^2 + Q_{celk1}^2}}{230} = \frac{\sqrt{124766,91^2 + 74767,38^2}}{230} = 629,63 \text{ A} \quad (6.20)$$

$$I_{celk2} = \frac{S_{celk2}}{U_f} = \frac{\sqrt{P_{celk2}^2 + Q_{cil}^2}}{230} = \frac{\sqrt{122274,30^2 + 24828,30^2}}{230} = 550,85 \text{ A} \quad (6.21)$$

Nyní si mohu vypočítat činné ztráty na vedení.

$$\Delta P_{v1} = I_{celk1}^2 \cdot \frac{R_v}{5} \cdot 5 = I_{celk1} \cdot R_v = 629,63^2 \cdot 0,0528 = 20,93 \text{ kW} \quad (6.22)$$

$$\Delta P_{v2} = I_{celk2}^2 \cdot R_v = 550,85^2 \cdot 0,0528 = 16,01 \text{ kW} \quad (6.23)$$

Sečtením těchto ztrát za každou hodinu získám celkovou odebranou energií:

$$W_{celk1} = \sum \Delta P_{v1} = 4095,58 \text{ kWh} \quad (6.24)$$

$$W_{celk2} = \sum \Delta P_{v2} = 3296,29 \text{ kWh} \quad (6.25)$$

Rozdíl těchto hodnot je tedy roven energii ušetřené kompenzací:

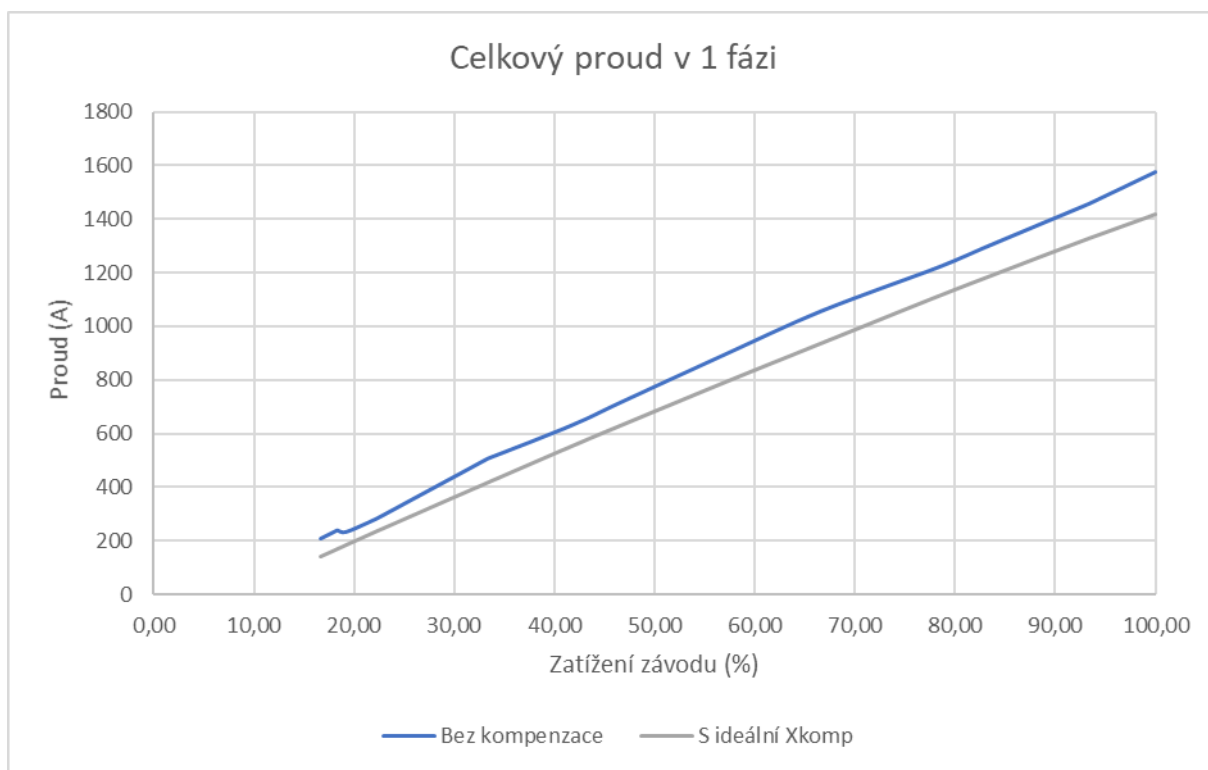
$$\Delta W_{celk} = W_{celk1} - W_{celk2} = 4095,58 - 3296,29 = 799,29 \text{ kWh} \quad (6.26)$$

Tu vynásobím velkoobchodní cenou za 1 kWh, která v době psaní této práce činí zhruba 1,3 Kč, a získám částku, kterou mi kompenzace jalového výkonu ušetří:

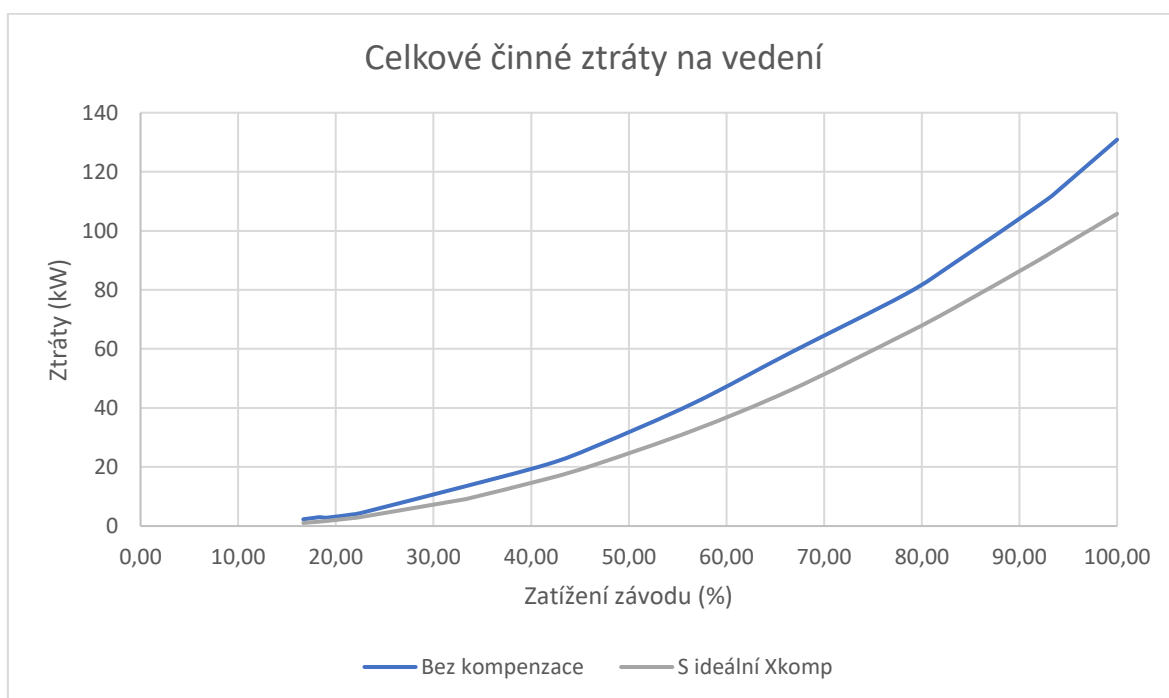
$$\Delta \text{Cena}_{den} = \Delta W_{celk} \cdot \text{Cena}_{kWh} = 799,29 \cdot 1,3 = 639,43 \text{ Kč} \quad (6.27)$$

$$\Delta \text{Cena}_{rok} = \Delta \text{Cena}_{den} \cdot 251 = 160497,30 \text{ Kč} \quad (6.28)$$

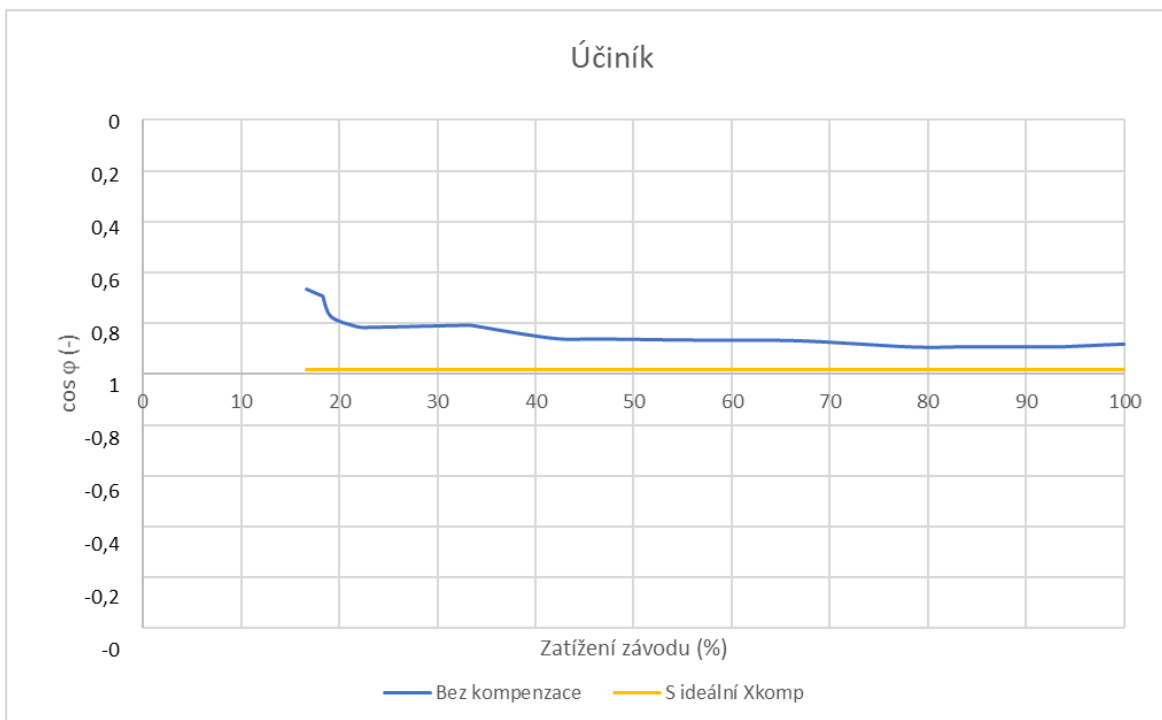
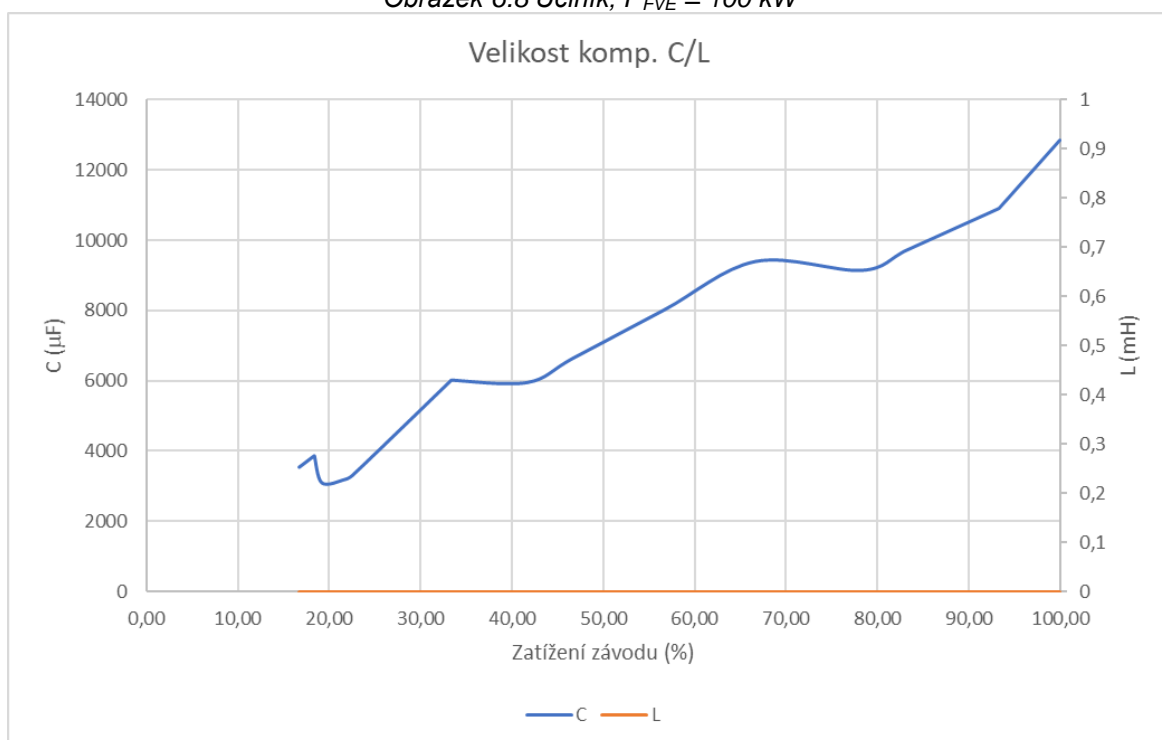
### 6.2.3 Grafické znázornění výsledků pro $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$



Obrázek 6.6 Proud v 1 fázi,  $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$



Obrázek 6.7 Ztráty ve vedení,  $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$


 Obrázek 6.8 Účíník,  $P_{FVE} = 100 \text{ kW}$ 


Obrázek 6.9 Potřebná velikost kompenzační kapacity/indukčnosti

#### 6.2.4 Varianta 2: Řízení Q střídačem

Při cca. 10 % maximálního výkonu se na střídači zcela přestává projevovat kapacita. V té chvíli přibývá další možnost, jak regulovat jalový výkon, a to řízení účíníku střídače, které jsem zmínil již ve 2. kapitole u větrných a fotovoltaických elektráren. Pro demonstraci tohoto

způsobu využiji stejný závod se stejnou zátěží, ale výkon FVE zvednu na 42 %, tj. 280 kW na fázi. Volím střídač s min.  $\cos \varphi = 0,8$  (induktivní/kapacitní).

Stejným způsobem jako u předchozího příkladu si spočítám celkovou impedanci. Kapacita střídače je nyní nulová, zbývá mi tudíž pouze sériové spojení vedení a zátěže:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{c3} &= \bar{Z}_{v_{celk}} + \bar{Z}_{z3} = (0,01056 + 0,0098i) + (0,2592 - 0,1255i) \\ &= 0,2698 + 0,1353i \Omega\end{aligned}\quad (6.29)$$

A odběr ze sítě:

$$\begin{aligned}\bar{S}_{celk3} &= \frac{U_f^2}{\bar{Z}_{c3}^*} - P_{FVE} = \frac{230^2}{0,2698 - 0,1353i} - 280 \cdot 10^3 \\ &= -122030,55 + 79232,06i \text{ VA}\end{aligned}\quad (6.30)$$

$$P_{celk3} = -122030,55 \text{ W} \quad (6.31)$$

$$Q_{celk3} = 79232,06 \text{ var} \quad (6.32)$$

Vidím, že odběr činného výkonu je záporný, tj. FVE dodává energii do sítě, odběr jalového výkonu je však stále kladný. Pokračuji výpočtem účinníku, který násobím -1, abych si zachoval stále stejnou orientaci výsledku (+ kapacitní, - induktivní) i při opačném směru proudu.

$$\cos \varphi_{celk3} = -\frac{P_{celk3}}{\sqrt{P_{celk3}^2 + Q_{celk3}^2}} = 0,839 \quad (6.33)$$

$$\begin{aligned}Q_{cíl3} &= \frac{P_{celk3}}{\cos \varphi_{cíl}} \cdot \sin(\arccos \varphi_{cíl}) \\ &= -\frac{122030,55}{0,98} \cdot \sin(\arccos 0,98) = 24283,77 \text{ var}\end{aligned}\quad (6.34)$$

$$Q_{komp} = Q_{cíl} - Q_{celk3} = 24283,77 - 79232,06 = -54948,30 \text{ var} \quad (6.35)$$

Nyní si zkontroluji, jestli mi k pokrytí potřebného kompenzačního výkonu bude stačit rozsah regulace FVE:

$$Q_{FVE_{max}} = \frac{P_{FVE}}{\cos \varphi_{FVE_{max}}} \cdot \sin(\arccos(\cos \varphi_{FVE_{max}})) \quad (6.36)$$

$$= \frac{280000}{0,8} \cdot \sin(\arccos 0,8) = 210000 \text{ var}$$

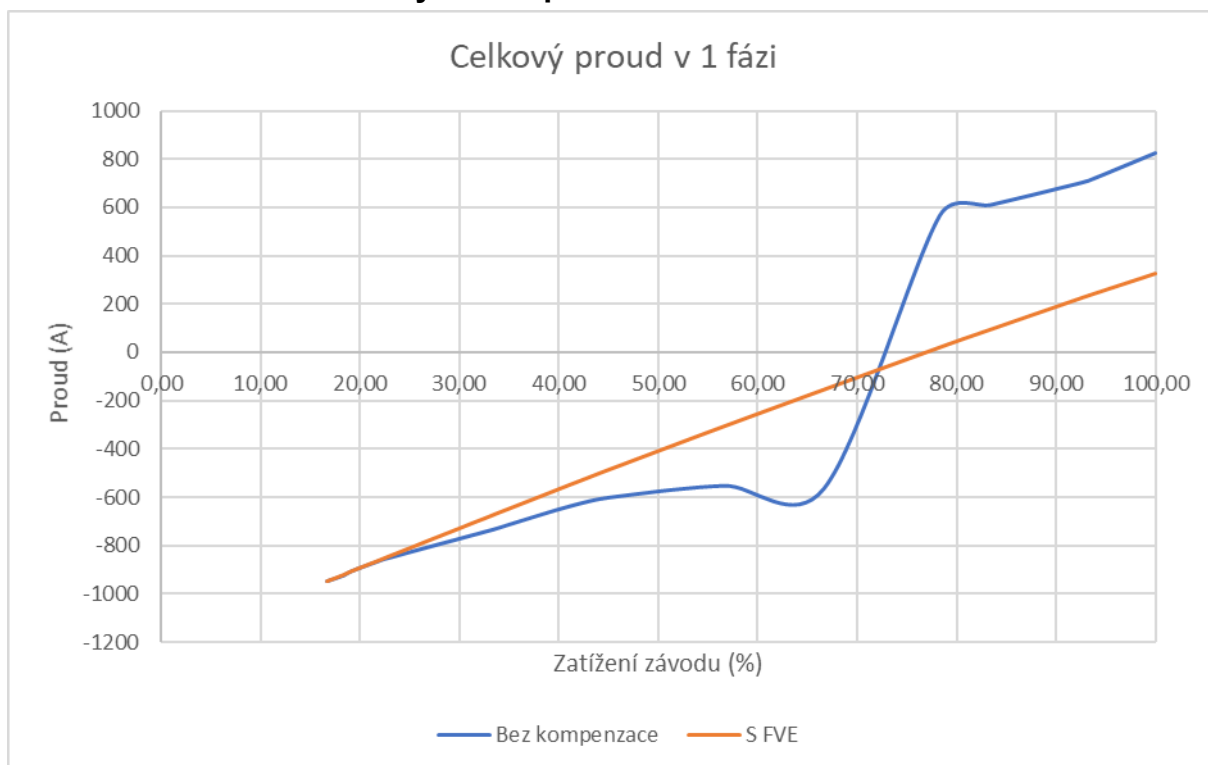
$$Q_{komp} < Q_{FVE_{max}} \quad (6.37)$$

Regulace střídače pokryje veškerý potřebný kompenzační výkon, kompenzační reaktanci  $X_{komp}$  tedy nebudu potřebovat. Pro úplnost ještě doplním hodnotu účinníku, se kterou bude střídač pracovat:

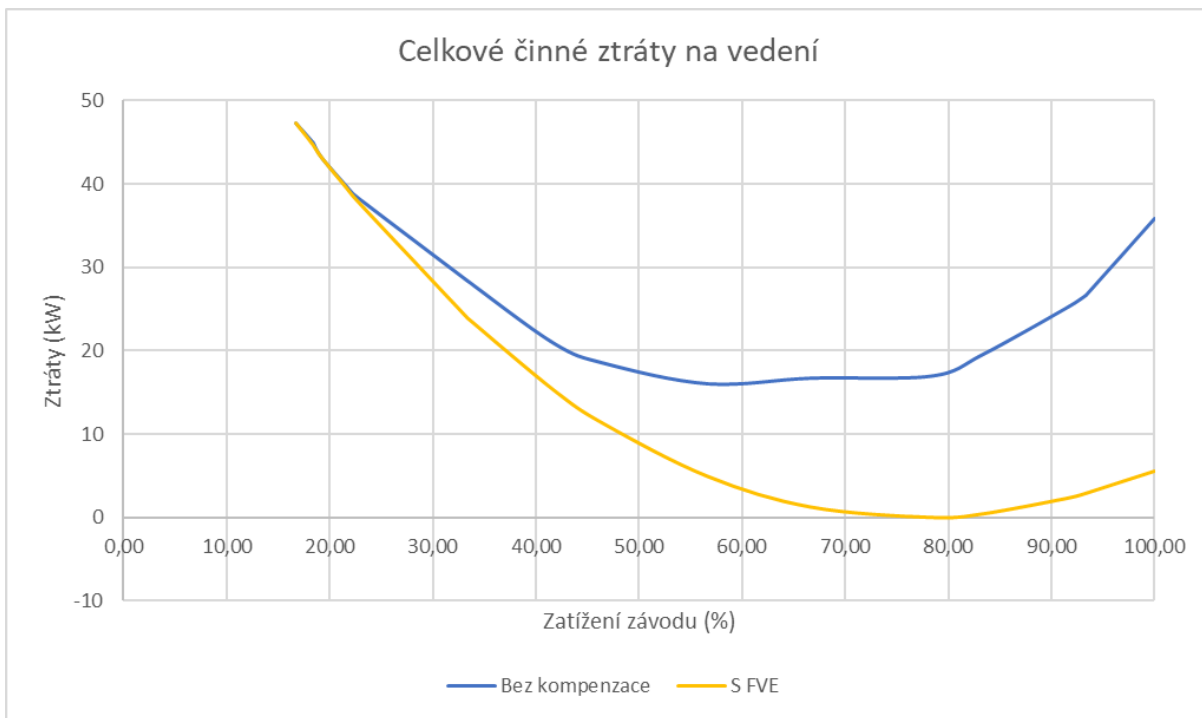
$$\cos \varphi_{FVE} = \cos \left( \arctg \frac{Q}{S} \right) = \cos \left( \arctg \frac{-54948,30}{\sqrt{280000^2 + (-54948,30)^2}} \right) \quad (6.38)$$

$$= -0,981$$

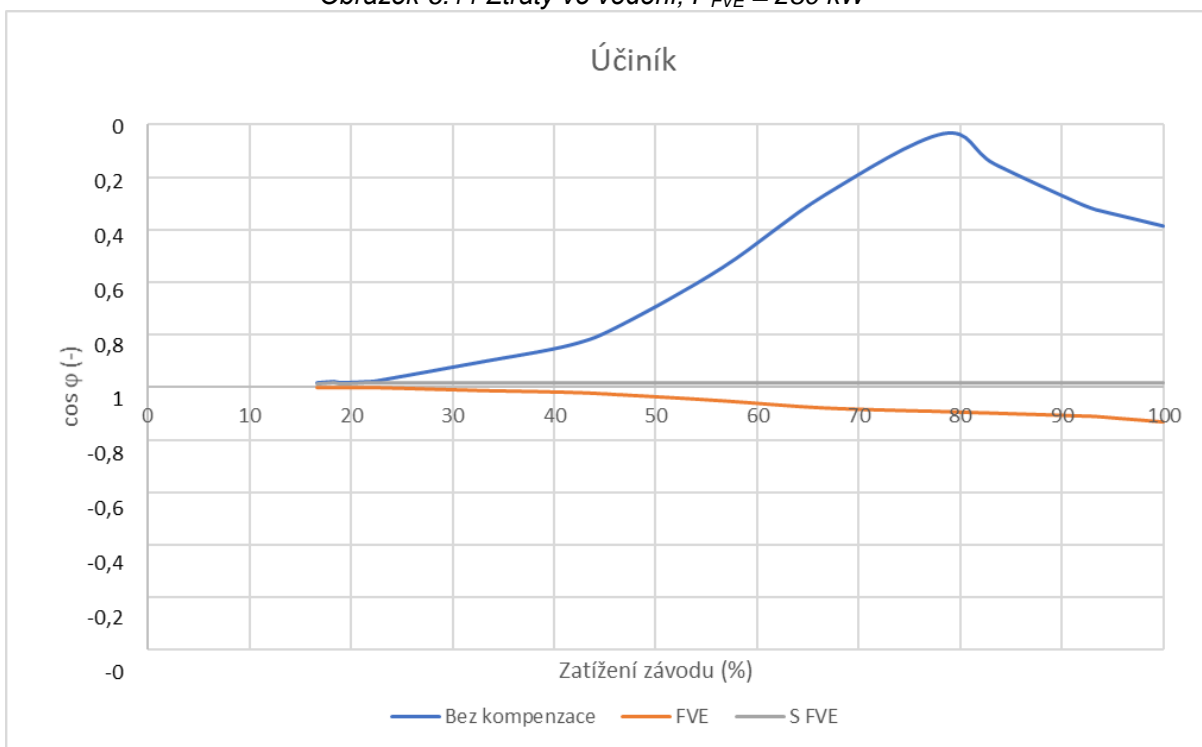
### 6.3 Grafické znázornění výsledků pro $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$



Obrázek 6.10 Proud v 1 fázi,  $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$



Obrázek 6.11 Ztráty ve vedení,  $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$



Obrázek 6.12 Účinnost,  $P_{FVE} = 280 \text{ kW}$



## 7 Závěr

Jalový výkon v distribuční síti ovlivňuje přenášený proud a s ním i napětí a ztráty. Pro zajištění dostatečné stability a kvality dodávky elektřiny je tedy nutné jalový výkon dostatečně přesně a rychle regulovat. Nároky na tuto regulaci rostou s výkonem připojeného zdroje. Konkrétní parametry uvádí příloha 4 Pravidel provozování distribuční soustavy, pro zdroje nad 100 kW se jedná o udržování účinníku v rozmezí 0,85 induktivních až 0,95 kapacitních, přičemž tento parametr musí být možné měnit prostřednictvím hromadného dálkového ovládání.

V elektrizační síti ČR je používána třístupňová hierarchie regulace: Primární regulace pracuje na úrovni jednoho bloku elektrárny, resp. generátoru, a slouží k regulaci jejího činného výkonu. Sekundární regulace pracuje na úrovni tzv. pilotního uzlu, což je místo v síti, do kterého jsou připojeny prvky disponující velkou rezervou jalového výkonu. V ČR je takovýchto uzlů 10. Nejvyšší úrovní je pak regulace terciární, která reguluje celou elektrizační soustavu.

Způsob realizace řízení výkonu se liší podle zdroje, resp. typu generátoru a způsobu připojení na síť. U elektráren větrných, vodních a tepelných (spalovny biomasy, geotermální elektrárny), které pro výrobu elektrické energie využívají klasický alternátor, lze činný výkon řídit změnou otáček alternátoru a jalový výkon změnou buzení. V případě elektráren fotovoltaických a některých větrných, které vyrábějí stejnosměrný proud a k distribuční síti se připojují pomocí střídače, je možné pro regulaci jalového výkonu využít řízení účinníku na výstupu tohoto střídače. Pokud tyto způsoby regulace nejsou dostupné nebo neumožňují regulaci v požadovaném rozsahu, lze jalový výkon také kompenzovat pomocí reaktance tlumivky či kondenzátoru.

V České republice jsou z obnovitelných zdrojů zdaleka nejvíce zastoupeny elektrárny fotovoltaické, zejména díky „fotovoltaickému boomeru“ zapříčiněnému vysokou výkupní cenou vyrobené elektřiny v letech 2010 až 2013 a následnému extrémně rychlému rozvoji zejména malých FVE, pro jejichž provoz nebyla nutná licence. Tyto malé FVE jsou také důvodem, proč je i přes velmi vysoký počet FVE jejich celkový výkon stále relativně malý.

Analýzu skutečného vlivu jalového výkonu na napětí v síti jsem ve spolupráci s Ing. Františkem Žákem, Ph.D. provedl na příkladu s průmyslovým závodem s připojenou fotovoltaickou elektrárnou. Z diagramu zatížení jsem si vypočítal impedanci zátěže, ze zvolené délky vedení a parametrů zvoleného kabelu pak impedanci vedení a z jalového výkonu (resp. příkonu) střídače FVE impedanci tohoto střídače. Z celkové impedance těchto prvků jsem vypočítal celkový příkon a účinník a také protékající proud, na němž závisí činné ztráty na vedení. Následoval výpočet kompenzace, kdy jsem si z činného příkonu závodu a požadovaného účinníku vypočítal, jalový výkon, při kterém dojde k dosažení požadovaného účinníku, a z něj pak potřebný kompenzační výkon a reaktanci, která zajistí požadovanou změnu jalového výkonu. Na závěr jsem opět provedl výpočet proudu a ztrát na vedení a porovnal je se stavem před kompenzací. Výsledkem bylo, že snížením proudu vlivem kompenzace jalového výkonu dojde ke zmenšení ztrát o 799,29 kWh, což při aktuální ceně cca. 1,3 Kč/kWh znamená úsporu nezanedbatelných 160.497 Kč za rok (251 pracovních dní). Dále jsem provedl částečný výpočet druhé varianty, kde FVE dodává výkon do závodu i do distribuční sítě a regulace jalového výkonu neprobíhá pomocí kompenzační reaktance, ale pomocí řízení účinku střídače FVE.

Z dopočítaných grafů je dále patrný strmý pokles nevykompenzovaného účinníku k nule při vyrovnání výkonu FVE a odběru závodu, kdy je odběr činného výkonu ze sítě nulový, ale jalový výkon je stále odebíráán ve stejném množství.

Činný výkon Jalový výkon má vliv na napětí v síti a také zvyšuje ztráty na vedení. Jeho regulace tak přispívá k udržení napětí ve stanovených mezích a snížením ztrát na vedení snižuje provozní náklady sítě.

## 8 Seznam zdrojů

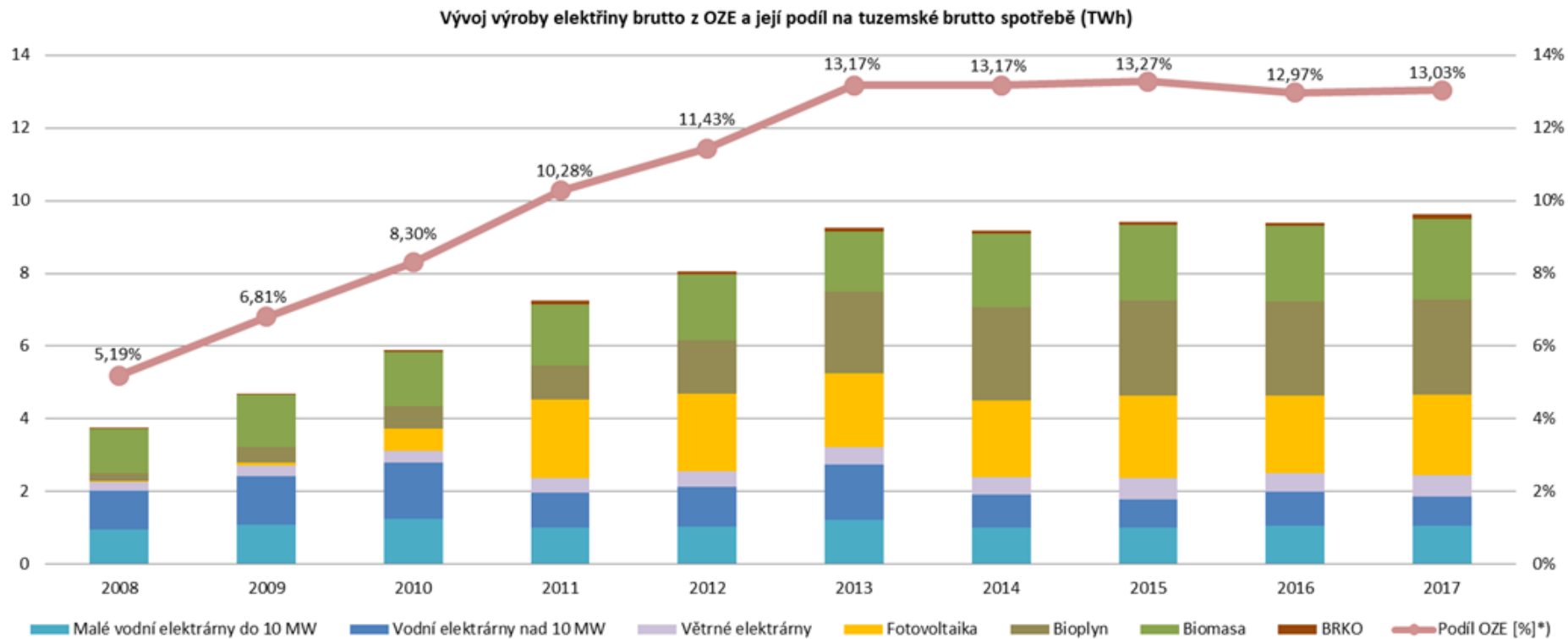
- [1] M. Galetka, „Přenosová soustava elektrické energie,“ 11 1 2016. [Online]. Available: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>. [Přístup získán 18 11 2018].
- [2] ČEPS, a.s., „ENTSO-E,“ [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/entso-e>. [Přístup získán 18 11 2018].
- [3] „ENTSO-E at a Glance,“ , . [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/publications/general-publications/entso-e-at-a-glance/Pages/default.aspx>. [Přístup získán 18 11 2018].
- [4] „Distributoři elektřiny,“ [Online]. Available: <https://www.kurzy.cz/elektrina/distributori>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [5] Elektrokov a.s. Znojmo, „Dekompenzační tlumivky pro kompenzaci kapacitních výkonů,“ [Online]. Available: <http://www.elektrokov.cz/produkty/dekompenzacni-tlumivky-pro-kompenzaci-kapacitnych-vykonu>. [Přístup získán 05 05 2019].
- [6] KBH Energy a.s., „Kompenzační kondenzátory FORTIS MKP G,“ [Online]. Available: [www.kbh.cz/images/pdf/cesky/01\\_kompenzacni\\_kondenzatory\\_fortis\\_mkp\\_g\\_kbh\\_katalog-vyrobn-rady.pdf](http://www.kbh.cz/images/pdf/cesky/01_kompenzacni_kondenzatory_fortis_mkp_g_kbh_katalog-vyrobn-rady.pdf). [Přístup získán 05 05 2019].
- [7] K. Noháč, „Elektrárny 2, část 11,“ [Online]. Available: [home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf](http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf). [Přístup získán 27 11 2018].
- [8] Nagle, Artist, *Doubly-fed generator for wind turbine*. [Art]. 2016.
- [9] Seaward Electronic, „What is solar PV I-V curve tracing?,“ [Online]. Available: <http://www.sewardsolar.com/userfiles/curve-tracing.php>.
- [10] ČEPS, a.s., „Kodex PS,“ [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [11] tzb-info.cz, „Zákon č. 458/2000 Sb. - energetický zákon a související předpisy,“ [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-458-2000-sb-a-souvisejici-predpisy>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [12] „PPDS 2016,“ [Online]. Available: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds\\_2016.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds_2016.pdf). [Přístup získán 17 11 2018].
- [13] J. Vlček, „Základy elektrotechniky,“ [Online]. Available: [http://ok1like.c-a-v.com/soubory/vlcek\\_zaklady\\_elektroniky3.htm](http://ok1like.c-a-v.com/soubory/vlcek_zaklady_elektroniky3.htm). [Přístup získán 23 11 2018].
- [14] ČEZ Distribuce, a.s., „PPDS 2017 - příloha 3,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017\\_priloha-4.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf). [Přístup získán 26 11 2018].
- [15] Energetický regulační úřad, „Vyhláška o PTE,“ 12 23 2015. [Online]. Available: <https://www.eru.cz/documents/10540/463080/Vyhlaska+o+PTE/02621ed5-a794-4f53-bc14-da9a2bbced2c>. [Přístup získán 25 11 2018].
- [16] R. Habrych, „Regulace napětí a jalových výkonů v distribuční soustavě 110 kV,“ 06 2013. [Online]. Available: [http://web.archive.org/web/20160701023811/http://www.pvgrid.eu/uploads/media/P\\_V\\_Grid\\_Habrych.pdf](http://web.archive.org/web/20160701023811/http://www.pvgrid.eu/uploads/media/P_V_Grid_Habrych.pdf). [Přístup získán 27 11 2018].

- [17] J. Šrom, „Řízení frekvence a výkonové bilance v elektrizační soustavě,“ [Online]. Available: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/12-srom.pdf>. [Přístup získán 27 11 2018].
- [18] Danish Wind Industry Association, "Power Control of Wind turbines," 1 6 2003. [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/powerreg.htm>. [Accessed 28 11 2018].
- [19] Enercon GmbH, "Technical Description - ENERCON Wind energy generator E-82 E4," 8 5 2015. [Online]. Available: [http://awel.coop/wp-content/uploads/2015/11/06-01-10376616-2\\_E-82-E4-2350\\_3000-kW\\_Technical-Description\\_eng.pdf](http://awel.coop/wp-content/uploads/2015/11/06-01-10376616-2_E-82-E4-2350_3000-kW_Technical-Description_eng.pdf). [Accessed 1 12 2018].
- [20] O energetice, „Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR,“ 6 2 2017. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>. [Přístup získán 02 03 2019].
- [21] ČEZ, a.s., „Hodonín | Uhelne elektrárny | Skupina ČEZ,“ [Online]. Available: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/hodonin.html>. [Přístup získán 02 03 2019].
- [22] ČEZ, a.s., „Elektrárny spalující biomasu | Obnovitelné zdroje | Skupina ČEZ,“ ČEZ, a.s., [Online]. Available: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/elektrarny-cez-spalujici-biomasu.html>. [Přístup získán 04 03 2019].
- [23] TEDOM, a.s., „Přehled kogeneračních jednotek,“ [Online]. Available: <https://www.tedom.com/wp-content/uploads/2019/02/TEDOM-Přehled-kogeneračních-jednotek-2019-02.pdf>. [Přístup získán 05 03 2019].
- [24] Ekowatt, „Kogenerace,“ [Online]. Available: <https://ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml>. [Přístup získán 5 03 2019].
- [25] OTE, a.s., „Registrované zdroje 2013-2018,“ [Online]. Available: [https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/statistika-poze/files\\_statistika\\_poze/registrovane-zdroje-2013-2018.xlsx](https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/statistika-poze/files_statistika_poze/registrovane-zdroje-2013-2018.xlsx). [Přístup získán 20 2 2019].
- [26] Janitza electronics GmbH, "Dynamic power factor correction systems," [Online]. Available: <https://www.janitza.com/dynamic-power-factor-correction-systems-technical-data.html>. [Accessed 13 12 2018].
- [27] KBH Energy, „Základy kompenzace,“ [Online]. Available: <http://www.kbh.cz/o-kompencaci/zaklady-kompencace>. [Přístup získán 29 3 2019].
- [28] L. Vilhelm, „Bakalářská práce - Metody kompenzace účinníku,“ 3 6 2011. [Online]. Available: [https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/PagesDispatcherServlet?pp\\_destElement=%23ssSouboryStudentuDivId\\_3276&pp\\_locale=cs&pp\\_reqType=render&pp\\_portlet=souboryStudentuPagesPortlet&pp\\_page=souboryStudentuDownloadPage&pp\\_nameSpace=G552649&soubidno=12888](https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/PagesDispatcherServlet?pp_destElement=%23ssSouboryStudentuDivId_3276&pp_locale=cs&pp_reqType=render&pp_portlet=souboryStudentuPagesPortlet&pp_page=souboryStudentuDownloadPage&pp_nameSpace=G552649&soubidno=12888). [Přístup získán 2 4 2019].
- [29] R. Habrych, „Automatická sekundární regulace napětí,“ 5 2015. [Online]. Available: [http://www.orgrez.cz/fileadmin/user\\_upload/750/E\\_5\\_2015\\_habrych.pdf](http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf). [Přístup získán 14 4 2019].
- [30] ERÚ, „Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR, III. čtvrtletí 2018,“ 2018. [Online]. Available: [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni\\_zprava\\_2018\\_III\\_Q.PDF/51f89cb1-1a14-4618-a315-9eafa767a44b](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni_zprava_2018_III_Q.PDF/51f89cb1-1a14-4618-a315-9eafa767a44b). [Přístup získán 19 11 2018].

- [31] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, "Reactive Power Regulation for Wind Power Plants," [Online]. Available: [http://power.eecs.utk.edu/pubs/Fangxing\\_li\\_ieeees2009\\_6.pdf](http://power.eecs.utk.edu/pubs/Fangxing_li_ieeees2009_6.pdf). [Accessed 2 12 2018].
- [32] A. F. Hoke, "Active Power Control of Photovoltaic Systems and Electric Vehicle Charge Optimization Including the Costs of Battery Degradation," University of Colorado, 2013. [Online]. Available: [https://scholar.colorado.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1135&context=ecen\\_gradetds](https://scholar.colorado.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1135&context=ecen_gradetds). [Accessed 16 12 2018].
- [33] Závodný elektro, s.r.o, „Kompenzace,“ [Online]. Available: [http://www.zavodny.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=3](http://www.zavodny.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=3). [Přístup získán 4 4 2019].

## Přílohy:

### Příloha A – Vývoj podílu OZE v letech 2008 až 2017



**Příloha B – Vstupní hodnoty**

Průběh zatížení závodu			
t (h)	P (kW)	rel. $P_{max}$	cos $\varphi$
0:00	200	0,166667	0,85
1:00	220	0,183333	0,85
2:00	220	0,183333	0,85
3:00	230	0,191667	0,89
4:00	260	0,216667	0,9
5:00	500	0,416667	0,9
6:00	680	0,566667	0,9
7:00	940	0,783333	0,92
8:00	1200	1	0,91
9:00	1200	1	0,92
10:00	1200	1	0,92
11:00	1100	0,916667	0,92
12:00	1200	1	0,92
13:00	1200	1	0,92
14:00	1120	0,933333	0,92
15:00	1120	0,933333	0,92
16:00	1000	0,833333	0,92
17:00	800	0,666667	0,9
18:00	560	0,466667	0,9
19:00	400	0,333333	0,87
20:00	400	0,333333	0,87
21:00	400	0,333333	0,87
22:00	270	0,225	0,9
23:00	220	0,183333	0,85

**Značení účinníku**

+x	induktivní
-x	kapacitní

**Provozní parametry**

pracovní napětí (sdružené)	400 V
požadovaný účinník	0,98 -
počet větví na fázi	5 -
okamžitý výkon FVE v %	5 %
tj.	100 kW (3f)
velkoobchodní cena el. Energie	1,3 Kč/kWh

**Limity FVE**

max. výkon	2000 kW
min. účinník střídače (absolutní)	0,8 -
max. Q střídače	-40 kvar
klesá do	8 %

**Parametry kabelů:**

L	0,7 km	prům délka vodiče
$R_k$	0,0754 $\Omega$ /km	
$L_k$	0,222 mH/km	
$C_k$	0 $\mu$ F/km	
$I_{max}$	564 A	

## Příloha C: Výsledky pro P<sub>FVE</sub> = 100 kW

### Před kompenzací

Výkony a impedance na zátěži						Celková impedance vč. vodičů a střídače
P <sub>r</sub> /fáze (W)	% P <sub>max</sub>	Q/fáze (var)	S/fáze (VA)	S <sub>kompl</sub> /fáze (VA)	Z <sub>r</sub> /fáze	Z <sub>kompl</sub> /fáze
6,6667E+04	16,67	4,1316E+04	7,8431E+04	66666,6666666667+41316,28922	0,578+0,358212227596993i	0,627484648164723+0,345832458253772i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,568185886422664+0,31733181547335i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,568185886422664+0,31733181547335i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,568185886422664+0,31733181547335i
7,6667E+04	19,17	3,9277E+04	8,6142E+04	76666,6666666667+39277,49837	0,551026086956522+0,282299037843712i	0,590316174785115+0,268973571472614i
8,6667E+04	21,67	4,1975E+04	9,6296E+04	86666,6666666667+41974,58241	0,498461538461538+0,241415941488407i	0,531180243398546+0,231877885317533i
9,0000E+04	22,50	4,3589E+04	1,0000E+05	90000+43588,9894354067i	0,48+0,232474610322169i	0,511123826119112+0,22439080945419i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,323036401016705+0,175136859104876i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,323036401016705+0,175136859104876i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,323036401016705+0,175136859104876i
1,6667E+05	41,67	8,0720E+04	1,8519E+05	166666,6666666667+80720,35080	0,2592+0,125536289573971i	0,27580610402448+0,130273055536219i
1,8667E+05	46,67	9,0407E+04	2,0741E+05	186666,6666666667+90406,79290	0,231428571428571+0,112085972833903i	0,246812464138849+0,117859999814058i
2,2667E+05	56,67	1,0978E+05	2,5185E+05	226666,6666666667+109779,6770	0,190588235294117+0,0923060952749788i	0,204423159729532+0,099381739361878i
2,6667E+05	66,67	1,2915E+05	2,9630E+05	266666,6666666667+129152,5612	0,162+0,078460180983732i	0,174927305650515+0,0862907647140134i
3,1333E+05	78,33	1,3348E+05	3,4058E+05	313333,3333333333+133479,4410	0,144068085106383+0,0613727472574783i	0,156269461510628+0,0695125298265765i
3,3333E+05	83,33	1,4200E+05	3,6232E+05	333333,3333333333+141999,4053	0,135424+0,0576903824220295i	0,147434540730727+0,0660209060350126i
3,6667E+05	91,67	1,5620E+05	3,9855E+05	366666,6666666667+156199,3459	0,123112727272727+0,0524458022018447i	0,134871630108524+0,0610270934935927i
3,7333E+05	93,33	1,5904E+05	4,0580E+05	373333,3333333333+159039,3340	0,120914285714286+0,0515092700196692i	0,132630749096192+0,0601327656422143i
3,7333E+05	93,33	1,5904E+05	4,0580E+05	373333,3333333333+159039,3340	0,120914285714286+0,0515092700196692i	0,132630749096192+0,0601327656422143i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,122006148158802+0,0591491307639985i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,122006148158802+0,0591491307639985i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,122006148158802+0,0591491307639985i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,122006148158802+0,0591491307639985i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,122006148158802+0,0591491307639985i



S <sub>sítě</sub> /fáze	Celkové výkony, proud a účinník					
	Celkový příkon/výkon	S <sub>abs</sub> (VA)	P (W)	Q <sub>z</sub> (var)	cos φ <sub>z</sub>	I <sub>abs</sub> (A)
31859,4019495288+35930,3832677052i	48020,97	31859,4	35930,38	0,663448	207,9369	2,282089
38215,1100831036+39959,8053844312i	55291,78	38215,11	39959,81	0,691154	239,4204	3,025462
38215,1100831036+39959,8053844312i	55291,78	38215,11	39959,81	0,691154	239,4204	3,025462
38215,1100831036+39959,8053844312i	55291,78	38215,11	39959,81	0,691154	239,4204	3,025462
41481,3895618155+34088,8223555238i	53691,28	41481,39	34088,82	0,772591	232,4901	2,852845
51001,1196726674+36814,8003723285i	62900,27	51001,12	36814,8	0,810825	272,3662	3,915396
54150,7561626701+38406,7903964162i	66388,15	54150,76	38406,79	0,815669	287,4691	4,361659
94261,9449361456+69176,8364258541i	116922	94261,94	69176,84	0,806195	506,287	13,52891
94261,9449361456+69176,8364258541i	116922	94261,94	69176,84	0,806195	506,287	13,52891
94261,9449361456+69176,8364258541i	116922	94261,94	69176,84	0,806195	506,287	13,52891
124766,912401537+74676,382401894i	145407,5	124766,9	74676,38	0,85805	629,633	20,92398
142629,690991301+84027,3690655889i	165541	142629,7	84027,37	0,861597	716,8136	27,11951
177688,648555349+102589,802600817i	205177,8	177688,6	102589,8	0,866023	888,4459	41,66116
211884,037298118+120964,50210708i	243982,1	211884	120964,5	0,868441	1056,473	58,90966
251581,626912413+126737,236313912i	281701,3	251581,6	126737,2	0,893079	1219,803	78,53233
267987,357444294+134930,830412176i	300039,3	267987,4	134930,8	0,893174	1299,208	89,08956
294901,40558872+148520,575334657i	330189,6	294901,4	148520,6	0,893127	1429,763	107,8941
300220,915031046+151228,426157144i	336158,6	300220,9	151228,4	0,893093	1455,61	111,8302
300220,915031046+151228,426157144i	336158,6	300220,9	151228,4	0,893093	1455,61	111,8302
320613,149744872+171594,850972596i	363644,9	320613,1	171594,9	0,881666	1574,628	130,8656
320613,149744872+171594,850972596i	363644,9	320613,1	171594,9	0,881666	1574,628	130,8656
320613,149744872+171594,850972596i	363644,9	320613,1	171594,9	0,881666	1574,628	130,8656
320613,149744872+171594,850972596i	363644,9	320613,1	171594,9	0,881666	1574,628	130,8656
320613,149744872+171594,850972596i	363644,9	320613,1	171594,9	0,881666	1574,628	130,8656

Kompenzační Q		Kompenzace FVE		Kompenzace X		C/L pro X	
cíl. Q (var)	Q <sub>kcelk</sub> (var)	Q <sub>FVE</sub> (var)	cos φ <sub>FVE</sub>	Q <sub>komp</sub> (var)	X <sub>komp</sub> (Ω)	C <sub>komp</sub> (μF)	L <sub>komp</sub> (mH)
6339,9409	-29590,4	0	1	-29590,4	-1,80238	3532,099	0
7604,7109	-32355,1	0	1	-32355,1	-1,64838	3862,105	0
7604,7109	-32355,1	0	1	-32355,1	-1,64838	3862,105	0
7604,7109	-32355,1	0	1	-32355,1	-1,64838	3862,105	0
8254,6923	-25834,1	0	1	-25834,1	-2,06445	3083,722	0
10149,095	-26665,7	0	1	-26665,7	-2,00007	3182,984	0
10775,864	-27630,9	0	1	-27630,9	-1,9302	3298,199	0
18757,89	-50418,9	0	1	-50418,9	-1,0578	6018,318	0
18757,89	-50418,9	0	1	-50418,9	-1,0578	6018,318	0
18757,89	-50418,9	0	1	-50418,9	-1,0578	6018,318	0
24828,302	-49848,1	0	1	-49848,1	-1,06992	5950,176	0
28382,95	-55644,4	0	1	-55644,4	-0,95847	6642,063	0
35359,595	-67230,2	0	1	-67230,2	-0,79329	8025,015	0
42164,391	-78800,1	0	1	-78800,1	-0,67682	9406,07	0
50064,112	-76673,1	0	1	-76673,1	-0,69559	9152,18	0
53328,811	-81602	0	1	-81602	-0,65358	9740,524	0
58684,639	-89835,9	0	1	-89835,9	-0,59367	10723,38	0
59743,208	-91485,2	0	1	-91485,2	-0,58297	10920,24	0
59743,208	-91485,2	0	1	-91485,2	-0,58297	10920,24	0
63801,211	-107794	0	1	-107794	-0,49477	12866,92	0
63801,211	-107794	0	1	-107794	-0,49477	12866,92	0
63801,211	-107794	0	1	-107794	-0,49477	12866,92	0
63801,211	-107794	0	1	-107794	-0,49477	12866,92	0
63801,211	-107794	0	1	-107794	-0,49477	12866,92	0

## Po kompenzaci

$S_{\text{sít s ideální } X_{\text{komp}}}$ (VA)	$S_{\text{abs}}$ (VA)	P (W)	Q (var)	$\cos \varphi$	I (A)	$\Delta P$
31859,4019495288+6339,94093870227i	32484,09	31859,4	6339,941	0,980769	140,6603	1,044268
38215,1100831036+7604,71088806693i	38964,42	38215,11	7604,711	0,980769	168,7209	1,502475
38215,1100831036+7604,71088806693i	38964,42	38215,11	7604,711	0,980769	168,7209	1,502475
38215,1100831036+7604,71088806693i	38964,42	38215,11	7604,711	0,980769	168,7209	1,502475
41481,3895618155+8254,69229754643i	42294,75	41481,39	8254,692	0,980769	183,1416	1,770286
51001,1196726674+10149,0946705351i	52001,14	51001,12	10149,09	0,980769	225,1715	2,676063
54150,7561626701+10775,8644183361i	55212,53	54150,76	10775,86	0,980769	239,0773	3,016796
94261,9449361456+18757,8902017401i	96110,21	94261,94	18757,89	0,980769	416,1694	9,141337
94261,9449361456+18757,8902017401i	96110,21	94261,94	18757,89	0,980769	416,1694	9,141337
94261,9449361456+18757,8902017401i	96110,21	94261,94	18757,89	0,980769	416,1694	9,141337
124766,912401537+24828,3020812223i	127213,3	124766,9	24828,3	0,980769	550,8498	16,01533
142629,690991301+28382,9501389488i	145426,3	142629,7	28382,95	0,980769	629,7145	20,9294
177688,648555349+35359,5946058051i	181172,7	177688,6	35359,59	0,980769	784,5009	32,48301
211884,037298118+42164,3910470116i	216038,6	211884	42164,39	0,980769	935,4746	46,18845
251581,626912413+50064,1116369392i	256514,6	251581,6	50064,11	0,980769	1110,741	65,11706
267987,357444294+53328,8107920948i	273242	267987,4	53328,81	0,980769	1183,173	73,88658
294901,40558872+58684,6387491721i	300683,8	294901,4	58684,64	0,980769	1301,999	89,47271
300220,915031046+59743,207762509i	306107,6	300220,9	59743,21	0,980769	1325,485	92,72969
300220,915031046+59743,207762509i	306107,6	300220,9	59743,21	0,980769	1325,485	92,72969
320613,149744872+63801,2112334663i	326899,7	320613,1	63801,21	0,980769	1415,517	105,7547
320613,149744872+63801,2112334663i	326899,7	320613,1	63801,21	0,980769	1415,517	105,7547
320613,149744872+63801,2112334663i	326899,7	320613,1	63801,21	0,980769	1415,517	105,7547
320613,149744872+63801,2112334663i	326899,7	320613,1	63801,21	0,980769	1415,517	105,7547
320613,149744872+63801,2112334663i	326899,7	320613,1	63801,21	0,980769	1415,517	105,7547

## Výsledky pro P<sub>FVE</sub> = 280 kW

### Před kompenzací

Výkony a impedance na zátěži						Celková impedance vč. vodičů a střídače Z <sub>kompl</sub> /fáze
P <sub>r</sub> /fáze (W)	% P <sub>max</sub>	Q/fáze (var)	S/fáze (VA)	S <sub>kompl</sub> /fáze (VA)	Z <sub>r</sub> /fáze	
6,6667E+04	16,67	4,1316E+04	7,8431E+04	66666,6666666667+41316,28922	0,578+0,358212227596993i	0,588555999999999+0,367976297564349i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,536010545454545+0,335411549600987i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,536010545454545+0,335411549600987i
7,3333E+04	18,33	4,5448E+04	8,6275E+04	73333,3333333333+45447,91814	0,525454545454546+0,32564747963363i	0,536010545454545+0,335411549600987i
7,6667E+04	19,17	3,9277E+04	8,6142E+04	76666,6666666667+39277,49837	0,551026086956522+0,282299037843712i	0,561582086956523+0,292063107811072i
8,6667E+04	21,67	4,1975E+04	9,6296E+04	86666,6666666667+41974,58241	0,498461538461538+0,241415941488407i	0,509017538461538+0,251180011455764i
9,0000E+04	22,50	4,3589E+04	1,0000E+05	90000+43588,9894354067i	0,48+0,232474610322169i	0,490556+0,242238680289527i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,313316000000001+0,181346069023205i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,313316000000001+0,181346069023205i
1,3333E+05	33,33	7,5563E+04	1,5326E+05	133333,3333333333+75563,48221	0,302760000000001+0,171581999055846i	0,313316000000001+0,181346069023205i
1,6667E+05	41,67	8,0720E+04	1,8519E+05	166666,666666667+80720,35080	0,2592+0,125536289573971i	0,269756+0,135300359541329i
1,8667E+05	46,67	9,0407E+04	2,0741E+05	186666,666666667+90406,79290	0,231428571428571+0,112085972833903i	0,241984571428571+0,121850042801261i
2,2667E+05	56,67	1,0978E+05	2,5185E+05	226666,666666667+109779,6770	0,190588235294117+0,0923060952749788i	0,201144235294117+0,102070165242336i
2,6667E+05	66,67	1,2915E+05	2,9630E+05	266666,666666667+129152,5612	0,162+0,078460180983732i	0,172556+0,0882242509510891i
3,1333E+05	78,33	1,3348E+05	3,4058E+05	313333,3333333333+133479,4410	0,144068085106383+0,0613727472574783i	0,154624085106383+0,0711368172248354i
3,3333E+05	83,33	1,4200E+05	3,6232E+05	333333,3333333333+141999,4053	0,135424+0,0576903824220295i	0,14598+0,0674544523893865i
3,6667E+05	91,67	1,5620E+05	3,9855E+05	366666,666666667+156199,3459	0,123112727272727+0,0524458022018447i	0,133668727272727+0,0622098721692017i
3,7333E+05	93,33	1,5904E+05	4,0580E+05	373333,3333333333+159039,3340	0,120914285714286+0,0515092700196692i	0,131470285714286+0,0612733399870264i
3,7333E+05	93,33	1,5904E+05	4,0580E+05	373333,3333333333+159039,3340	0,120914285714286+0,0515092700196692i	0,131470285714286+0,0612733399870264i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,120969333333333+0,0600698708257073i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,120969333333333+0,0600698708257073i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,120969333333333+0,0600698708257073i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,120969333333333+0,0600698708257073i
4,0000E+05	100,00	1,8225E+05	4,3956E+05	400000+182245,384102223i	0,110413333333333+0,0503058008583503i	0,120969333333333+0,0600698708257073i

S <sub>sítě</sub> /fáze	Celkové výkony, proud a účinník					Ztráty
	S <sub>abs</sub> (VA)	P (W)	Q <sub>z</sub> (var)	cos φ <sub>z</sub>	I <sub>abs</sub> (A)	ΔP (kW)
-214849,842717623+40733,1055371183i	-218677	-214850	40733,11	0,982498	-946,899	47,32351
-208497,644117558+44742,9928198769i	-213244	-208498	44742,99	0,97774	-923,376	45,00142
-208497,644117558+44742,9928198769i	-213244	-208498	44742,99	0,97774	-923,376	45,00142
-208497,644117558+44742,9928198769i	-213244	-208498	44742,99	0,97774	-923,376	45,00142
-205248,587353867+38876,115171365i	-208898	-205249	38876,12	0,982531	-904,554	43,18559
-195740,461324237+41578,747863586i	-200108	-195740	41578,75	0,978175	-866,492	39,62767
-192593,311615892+43161,8017976422i	-197371	-192593	43161,8	0,975796	-854,639	38,55097
-152493,214140395+73800,4263728084i	-169413	-152493	73800,43	0,900128	-733,579	28,40291
-152493,214140395+73800,4263728084i	-169413	-152493	73800,43	0,900128	-733,579	28,40291
-152493,214140395+73800,4263728084i	-169413	-152493	73800,43	0,900128	-733,579	28,40291
-122030,549193921+79232,0596784085i	-145496	-122031	79232,06	0,838719	-630,017	20,94954
-104180,564641255+88532,9407461023i	-136717	-104181	88532,94	0,762013	-592,004	18,49775
-69145,888145972+106997,419078389i	-127395	-69145,9	106997,4	0,542766	-551,638	16,06122
-34973,129630853+125277,081650059i	-130067	-34973,1	125277,1	0,268885	-563,207	16,74195
4669,90124808799+130966,082810221i	131049,3	4669,901	130966,1	0,035635	567,4602	16,99574
21064,217145514+139115,782309837i	140701,5	21064,22	139115,8	0,149709	609,2552	19,59151
47960,097447655+152633,724844183i	159991,3	47960,1	152633,7	0,299767	692,7828	25,33165
53276,097897228+155327,415203049i	164210,1	53276,1	155327,4	0,324439	711,0505	26,68519
53276,097897228+155327,415203049i	164210,1	53276,1	155327,4	0,324439	711,0505	26,68519
73673,322324827+175623,93873834i	190450,9	73673,32	175623,9	0,386836	824,6764	35,89521
73673,322324827+175623,93873834i	190450,9	73673,32	175623,9	0,386836	824,6764	35,89521
73673,322324827+175623,93873834i	190450,9	73673,32	175623,9	0,386836	824,6764	35,89521
73673,322324827+175623,93873834i	190450,9	73673,32	175623,9	0,386836	824,6764	35,89521
73673,322324827+175623,93873834i	190450,9	73673,32	175623,9	0,386836	824,6764	35,89521

Kompenzační Q		Kompenzace FVE		Kompenzace X		C/L pro X	
cíl. Q (var)	Q <sub>kcelk</sub> (var)	Q <sub>FVE</sub> (var)	cos φ <sub>FVE</sub>	Q <sub>komp</sub> (var)	X <sub>komp</sub> (Ω)	C <sub>komp</sub> (μF)	L <sub>komp</sub> (mH)
40733,106	0	0	1	0	1E+99 0	0	0
41490,507	-3252,49	-3252,49	-0,99993	0	1E+99 0	0	0
41490,507	-3252,49	-3252,49	-0,99993	0	1E+99 0	0	0
41490,507	-3252,49	-3252,49	-0,99993	0	1E+99 0	0	0
38876,115	0	0	1	0	1E+99 0	0	0
38951,86	-2626,89	-2626,89	-0,99996	0	1E+99 0	0	0
38325,585	-4836,22	-4836,22	-0,99985	0	1E+99 0	0	0
30345,766	-43454,7	-43454,7	-0,98817	0	1E+99 0	0	0
30345,766	-43454,7	-43454,7	-0,98817	0	1E+99 0	0	0
30345,766	-43454,7	-43454,7	-0,98817	0	1E+99 0	0	0
24283,773	-54948,3	-54948,3	-0,98128	0	1E+99 0	0	0
20731,671	-67801,3	-67801,3	-0,97191	0	1E+99 0	0	0
13759,858	-93237,6	-93237,6	-0,94878	0	1E+99 0	0	0
6959,5649	-118318	-118318	-0,92114	0	1E+99 0	0	0
929,29861	-130037	-130037	-0,90696	0	1E+99 0	0	0
4191,7263	-134924	-134924	-0,90086	0	1E+99 0	0	0
9543,9389	-143090	-143090	-0,89046	0	1E+99 0	0	0
10601,81	-144726	-144726	-0,88835	0	1E+99 0	0	0
10601,81	-144726	-144726	-0,88835	0	1E+99 0	0	0
14660,806	-160963	-160963	-0,86696	0	1E+99 0	0	0
14660,806	-160963	-160963	-0,86696	0	1E+99 0	0	0
14660,806	-160963	-160963	-0,86696	0	1E+99 0	0	0
14660,806	-160963	-160963	-0,86696	0	1E+99 0	0	0
14660,806	-160963	-160963	-0,86696	0	1E+99 0	0	0

**Po kompenzaci**

$S_{sít}$ s FVE bez $X_{komp}$ (VA)	$S_{abs}$ (VA)	P (W)	Q (var)	cos $\varphi$	I (A)	$\Delta P$
-214849,842717623+40733,1055371183i	218677	-214850	40733,11	0,982498	-946,899	47,32351
-208497,644117558+41490,5073126595i	212585,8	-208498	41490,51	0,980769	-920,524	44,72386
-208497,644117558+41490,5073126595i	212585,8	-208498	41490,51	0,980769	-920,524	44,72386
-208497,644117558+41490,5073126595i	212585,8	-208498	41490,51	0,980769	-920,524	44,72386
-205248,587353867+38876,115171365i	208897,9	-205249	38876,12	0,982531	-904,554	43,18559
-195740,461324237+38951,8599902139i	199578,5	-195740	38951,86	0,980769	-864,2	39,41832
-192593,311615892+38325,5851057146i	196369,6	-192593	38325,59	0,980769	-850,305	38,16096
-152493,214140395+30345,7664627405i	155483,3	-152493	30345,77	0,980769	-673,262	23,92423
-152493,214140395+30345,7664627405i	155483,3	-152493	30345,77	0,980769	-673,262	23,92423
-152493,214140395+30345,7664627405i	155483,3	-152493	30345,77	0,980769	-673,262	23,92423
-122030,549193921+24283,7726782346i	124423,3	-122031	24283,77	0,980769	-538,769	15,32054
-104180,564641255+20731,6706017446i	106223,3	-104181	20731,67	0,980769	-459,96	11,16633
-69145,888145972+13759,8580065643i	70501,68	-69145,9	13759,86	0,980769	-305,281	4,918919
-34973,129630853+6959,5649238i	35658,87	-34973,1	6959,565	0,980769	-154,407	1,258363
4669,90124808799+929,29861487521i	4761,468	4669,901	929,2986	0,980769	20,61776	0,022436
21064,217145514+4191,72628645448i	21477,24	21064,22	4191,726	0,980769	92,99917	0,456486
47960,097447655+9543,9388885652i	48900,49	47960,1	9543,939	0,980769	211,7453	2,366448
53276,097897228+10601,8096211608i	54320,72	53276,1	10601,81	0,980769	235,2156	2,920127
53276,097897228+10601,8096211608i	54320,72	53276,1	10601,81	0,980769	235,2156	2,920127
73673,322324827+14660,8060326219i	75117,89	73673,32	14660,81	0,980769	325,27	5,584155
73673,322324827+14660,8060326219i	75117,89	73673,32	14660,81	0,980769	325,27	5,584155
73673,322324827+14660,8060326219i	75117,89	73673,32	14660,81	0,980769	325,27	5,584155
73673,322324827+14660,8060326219i	75117,89	73673,32	14660,81	0,980769	325,27	5,584155
73673,322324827+14660,8060326219i	75117,89	73673,32	14660,81	0,980769	325,27	5,584155