

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

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

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš KANTA**  
Osobní číslo: **E17B0023P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Téma práce: **Řízení jalového výkonu v obnovitelných zdrojích připojených do distribuční sítě**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

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 bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II. Legislativní předpisy o řízení P,Q u zdrojů nad 200 kW.
2. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
dekan



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá podmínkami připojování obnovitelných zdrojů do distribuční sítě na území České republiky. Konkrétně se zaměřuje na řízení jalového a činného výkonu v elektrizační soustavě. Cílem praktické části je rozbor vlastností konkrétní fotovoltaické elektrárny o výkonu 2,2 MW z hlediska dodávaného činného a jalového výkonu do sítě. Výhodou navrženého řešení je použití tří transformátorů o výkonu 800 kVA, což vede ke snížení provozních ztrát.

## **Klíčová slova**

Elektrizační soustava, přenosová soustava, distribuční soustava, napětí, fotovoltaická elektrárna, kompenzace, účinník, činný výkon, jalový výkon, frekvence

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the conditions of connecting a renewable energy source into the distribution network grid in the Czech republic. The next chapter focuses on the various ways of controlling active power and reactive power in the electrical grid. The goal of the practical part is the analysis of photovoltaic power plant with an installed capacity of 2,2 MW and its supplied active and reactive power. The advantage of this particular design is the use of three power transformers of 800 kVA, which decreases operating losses.

## **Keywords**

Electricity grid, transmission grid, distribution grid, voltage, solar power plant, compensation, power factor, active power, reactive power, frequency

## **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, který je použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni 11.6. 2020

Tomáš Kanta

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí práce doc. Ing. Lucii Noháčové, PhD. za čas, který věnovala mé bakalářské práci, trpělivé vedení a cenné rady. Dále děkuji mému konzultantovi Ing. Františkovi Žákovi, PhD. za poskytnutí podkladů k praktické části, odborné rady a věnovaný čas.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA</b> .....	<b>13</b>
1.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA .....	13
1.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA .....	13
1.3 OBNOVITELNÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE V ČESKÉ REPUBLICE .....	14
<b>2 PŘIPOJOVÁNÍ ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ</b> .....	<b>15</b>
2.1 ZVÝŠENÉ NAPĚTÍ .....	15
2.2 ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ.....	15
2.3 PŘIPOJOVÁNÍ GENERÁTORŮ A VÝROBEN DO SÍTĚ.....	16
2.4 DÁLKOVÉ ŘÍZENÍ .....	16
2.5 UVEDENÍ ZDROJE EL. ENERGIE DO PROVOZU .....	16
2.6 NESYMETRIE NAPĚTÍ V SÍTI.....	16
2.7 OSTROVNÍ PROVOZ .....	17
2.8 PŘIPOJENÍ VÝROBNY DO DS .....	17
2.9 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ CHOD ZDROJŮ V DS .....	19
2.10 PROVOZNI DOBA VÝROBNY PŘI ZMĚNĚ FREKVENCE .....	19
2.11 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU .....	19
2.11.1 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci, podfrekvenci.....	19
2.12 PORUCHY VZNIKLÉ V PROPOJENÉ SOUSTAVĚ .....	20
2.13 NESYNCHRONNÍ VÝROBNÍ MODULY .....	21
<b>3 DRUHY VÝKONŮ</b> .....	<b>22</b>
3.1 ČINNÝ A JALOVÝ VÝKON.....	22
3.2 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU.....	23
3.2.1 Závislost jalového výkonu na napětí .....	23
3.3 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....	23
3.3.1 Individuální kompenzace .....	24
3.3.2 Skupinová kompenzace.....	24



3.3.3	Centrální kompenzace .....	24
<b>4</b>	<b>ŘÍZENÍ NAPĚTÍ A FREKVENCE V SÍTI .....</b>	<b>25</b>
4.1	ŘÍZENÍ NAPĚTÍ .....	25
4.1.1	Automatická sekundární regulace napětí .....	25
4.1.2	Výhody použití ASRU .....	27
4.2	ŘÍZENÍ FREKVENCE .....	27
4.2.1	Systémové služby .....	28
4.2.2	Podpůrné služby .....	28
4.2.3	Primární regulace .....	28
4.2.4	Sekundární regulace .....	28
4.2.5	Terciální regulace .....	29
4.2.6	Rychle startující záloha .....	29
4.2.7	Snížení výkonu .....	30
4.2.8	Snížení zatížení .....	30
4.3	PŮSOBENÍ PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ REGULACE .....	30
4.4	NOVÝ KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY .....	31
<b>5</b>	<b>KONKRÉTNÍ PŘÍPAD REALIZACE .....</b>	<b>32</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>48</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>48</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>49</b>
	PŘÍLOHA A – TABULKA VÝKONŮ PRO ÚHEL ZE ZDROJE $0^\circ$ .....	49
	PŘÍLOHA B – TABULKA VÝKONŮ PRO $\cos \phi = 1$ .....	50
	PŘÍLOHA C – TABULKA PRO $\cos \phi = 0,95$ INDUKTIVNÍHO CHARAKTERU .....	51
	PŘÍLOHA D – TABULKA PRO $\cos \phi = 0,95$ KAPACITNÍHO CHARAKTERU .....	52

## Seznam symbolů a zkratk

$A_{FRP}$	automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy
$a_{ij}$	Koeficient citlivosti změny napětí v uzlu na změnu jalového výkonu (-)
ASRU	Automatická sekundární regulace napětí
$\cos\varphi$	Účinník (-)
ČR	Česká republika
DS	Distribuční soustava
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ES	Elektrická soustava
FCP	proces automatické regulace frekvence
$f_N$	Jmenovitá frekvence sítě (Hz)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
$i_0$	Proud naprázdno (%)
$k_{k1}$	Zkratový poměr výkonů (-)
$M_{FRP_T}$	ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy
nn	Nízké napětí (kV)
OZE	Obnovitelné zdroje elektrické energie
$P_0$	Ztráty transformátoru naprázdno (W)
$P_k$	Ztráty transformátoru nakrátko (W)
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PPPS	Pravidla provozování přenosové soustavy
PpS	Podpůrné služby
$P_{ref}$	Referenční výkon (W)
PS	Přenosová soustava
RZMZt	Regulační záloha minutové zálohy v čase t
$S_2$	Statika (%)
$S_{A\ max}$	všechny zdánlivé výkony všech zdrojů pracujících současně (VA)
SCOPT	Security constrained optimization
$S_{kV}$	Zkratový výkon v přípojném místě (VA)
uk	Napětí nakrátko (%)
$U_N$	Jmenovité napětí (V)
VFE	Velká fotovoltaická elektrárna
vn	Vysoké napětí (kV)

---

zvn	Zvlášť vysoké napětí (kV)
$\Delta f$	Odchylka frekvence (Hz)
$\Delta P$	Změna činného výkonu (W)
$\Delta Q_j$	Změna jalového výkonu v uzlu (Var)
$\Delta U_i$	Změna napětí v uzlu (V)
$\Delta U_{\max}$	Maximální odchylka od maximální hodnoty napětí (V)
I	Proud (A)
P	Činný výkon (W)
S	Zdánlivý výkon (VA)
Q	Jalový výkon (Var)
R	Odpor ( $\Omega$ )
U	Napětí (V)
X	Reaktance ( $\Omega$ )
Z	Impedance ( $\Omega$ )

## Úvod

Obnovitelné zdroje v dnešní době zažívají nebývalý rozmach. Svět se začíná stále více zaměřovat na udržitelné zdroje energie, udržitelnou těžbu nerostných surovin, stejně tak jako na udržitelnost v běžném životě (vybavení, oblečení). Obnovitelné zdroje jsou podstatnou složkou moderní energetiky. Provozovatelé distribučních a přenosových soustav se v současnosti snaží decentralizovat výrobu. Základními principy jsou lokální soběstačnost, efektivita výroby i přenosu elektrické energie a s tím související pokrytí lokální spotřeby pomocí lokálních výroben. Z tohoto důvodu je velmi důležité optimalizovat řízení dodávek činného a jalového výkonu. V opačném případě hrozí přenos s velkými ztrátami a případně narušení distribuce energie.

Evropská unie stanovala limity průměrných emisí (g/km) pro výrobce aut, což automobilky nutí k vyšší produkci hybridních a elektrických modelů. Důsledkem bude zvýšená spotřeba elektrické energie, a tudíž zvýšené nároky na elektrickou soustavu a zdroje elektrické energie. Ideálním příkladem spojení elektromobility a obnovitelných zdrojů je domácnost, kde obnovitelný zdroj nabíjí elektromobil v době jeho nečinnosti.

Každý zdroj elektrické energie s výkonem větším než 800 W podléhá pravidlům provozování distribuční sítě v ČR. Typickým příkladem může být rodinný dům s malou solární elektrárnou. [6]

První polovina této práce se zabývá souhrnem pravidel provozování distribuční sítě, podle kterých se musí řídit každý spotřebitel a provozovatel výroby připojený k dané síti. Ustanovení pravidel distribuční sítě musí být nejprve schváleno Energetickým regulačním úřadem. Druhá polovina bakalářské práce se zaměřuje na analýzu konkrétního případu větší fotovoltaické elektrárny z hlediska ztrát na dodávaném proudu FVE a dále na dodávaném jalovém výkonu do distribuční sítě. Poznatky z této části ukazují chování FVE v závislosti na určitých podmínkách a s tím související ekonomiku provozu fotovoltaické elektrárny.



kV a jsou do ní připojovány menší zdroje o výkonech do desítek megawatt. Česká republika má tři významné provozovatele distribuční sítě (ČEZ Distribuce, a.s. E.ON Distribuce, a.s. a PRE distribuce, a.s.). [1]

### 1.3 Obnovitelné zdroje elektrické energie v České republice

Česká republika musí plnit směrnice Evropského parlamentu a rady o podpoře využívání OZE na výrobu elektrické energie 2009/28/ES, která Českou republiku zavazuje, aby podíl na výrobě obnovitelných zdrojů v průběhu let rostl. V roce 2005 měla Česká republika podíl vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů 4,4 %. V roce 2010 už tento podíl byl na hodnotě 8,3 %. Podle evropské směrnice by v roce 2020 měla mít Česká republika podíl OZE na výrobě elektrické energie 13 %. Tento cíl byl splněn již v roce 2017, kdy byl podíl OZE již 13,03 %. Kontrolním úřadem o podílu OZE na vyrobené energii je Energetický regulační úřad. V roce 2018 bylo v České republice vyrobeno nejvíce obnovitelné energie ve FVE (2318,7 GWh), z biomasy (2 118,7 GWh), ve vodních elektrárnách (1614,5 GWh), a ve větrných elektrárnách (600,7 GWh). Česká republika by v roce 2030 měla dle evropské směrnice vyrobit 22,5 % elektrické energie z obnovitelných zdrojů.[3][19][20]

## 2 Připojování zdrojů do distribuční sítě

Při připojování zdrojů do DS se musí všechny strany řídit podle Pravidel provozování distribuční soustavy (PPDS). V tomto dokumentu se stanovují minimální technické, provozní, plánovací a informační požadavky pro připojení k DS. PPDS jsou podřazeny pravidlům provozování přenosové soustavy (PPPS) tak, aby společně zajistili základní podmínky pro rozvoj a spolehlivý provoz elektrizační soustavy ČR a pro kvalitní a stálé dodávky elektrické energie.

K zamezení zpětného vlivu napětí na DS, je nutné technickým řešením zajistit, aby výrobná byla připojena k DS pouze tehdy, pokud budou všechny fáze pod napětím. Toho lze docílit pomocí spínače, který zabrání připojení výrobní do sítě před tím, než bude na všech fázích alespoň rozběhové napětí.

### 2.1 Zvýšené napětí

V soustavě vn a na hladině 110 kV nesmí v místě připojení výrobní (což je nejnepríznivější stav) napětí překročit za normálních podmínek hodnotu 102 %  $U_N$ . Při mimořádných podmínkách je tato hranice 105 %  $U_N$ . V případě jediného přípojného místa v síti je možné tuto hranici pro normální podmínky posoudit pomocí zkratových poměrů:

$$k_{k1} = \frac{S_{kV}}{\sum S_{A \max}} \quad (2.1)$$

Hodnota  $k_{k1}$  musí být větší než 50, aby byla splněna podmínka zkratových poměrů.

V případě, že výrobná při provozním napětí nedocílí požadovaných výsledků deklarovaných zpracovatelem studie, může provozovatel DS požadovat nápravu tak, aby výrobná splňovala podmínky, či v krajním případě byl omezen činný výkon.

### 2.2 Změny napětí při spínání

Při častějším spínání zdroje elektrické energie (jednou za 90 sekund) nesmí překročit změna napětí  $\Delta u_{\max} = 2$  %. Při méně častém spínání a pokud je vhodný stav sítě, může provozovatel DS povolit výrobně i větší změnu napětí, současně však nesmí být překročena maximální hranice  $\pm 10$  %  $U_N$  v místě připojení. Pro hladinu 110 kV je tato hranice  $\Delta u_{\max}$  0,5 % pro jeden generátor či větrnou turbínu a 2 % pro připojení více zdrojů najednou například větrného parku. [6]

### 2.3 Připojování generátorů a výroben do sítě

Synchronní generátor musí mít při synchronizaci se sítí maximální rozdíl napětí  $\pm 10\%$   $U_N$ , rozdíl frekvence  $\pm 1\%$  Hz a rozdíl fáze maximálně  $\pm 10^\circ$ . U asynchronních generátorů musí být otáčky mezi 95 % až 105 % jmenovitých otáček. U zdrojů se střídači schopnými ostrovního režimu je důležité dodržet stejné podmínky jako pro synchronní generátor.

### 2.4 Dálkové řízení

Zdroje elektrické energie musí být opatřeny logickým rozhraním tak, aby bylo možné do 5 sekund od vzniku požadavku přerušit dodávku činného výkonu. Dále musí být odpínací prvek instalován tak, aby po odpojení silové části zůstal stále aktivní a byla možná automatizace provozu. S rozhraním musí být instalováno také řízení jalového výkonu a zařízení pro přenos dat.

### 2.5 Uvedení zdroje el. energie do provozu

Před trvalým provozem zdroje elektrické energie, musí výrobce projít procesem prvního paralelního připojení, při kterém může být přítomen zástupce provozovatele DS. Dříve než je zdroj poprvé paralelně připojen, je nutné provést prohlídku zařízení výroby, porovnat skutečnou realizaci výroby s projektovaným návrhem a zkontrolovat měřicí zařízení či jeho přípravu. Po instalaci je nutné ověřit správnost jeho chodu a následně je důležité prověřit funkčnost ochran. O těchto zkouškách následně vyhotoví odborná firma protokol. Pokud však není možné vyzkoušet či provést všechna potřebná měření (například v zimním období u fotovoltaické elektrárny), může provozovatel DS požadovat ověřovací provoz, o jehož délce sám rozhodne. Tento provoz může být uskutečněn bez instalovaných měřících zařízení a je omezen na dobu, kdy se provedou potřebná měření. [6]

### 2.6 Nesymetrie napětí v síti

Nesymetrie napětí v třífázové DS, která vzniká díky jednofázovým nebo dvoufázovým spotřebičům nebo zdrojům energie, může mít za následek zvýšení ohřevu transformátoru. Velká nesymetrie může mít za následek zkrácení životnosti motoru či úplnou destrukci jeho vinutí. Z tohoto důvodu je v normách stanovena hodnota nesymetrie napětí v rozsahu 0 až 2 %  $U_N$ .

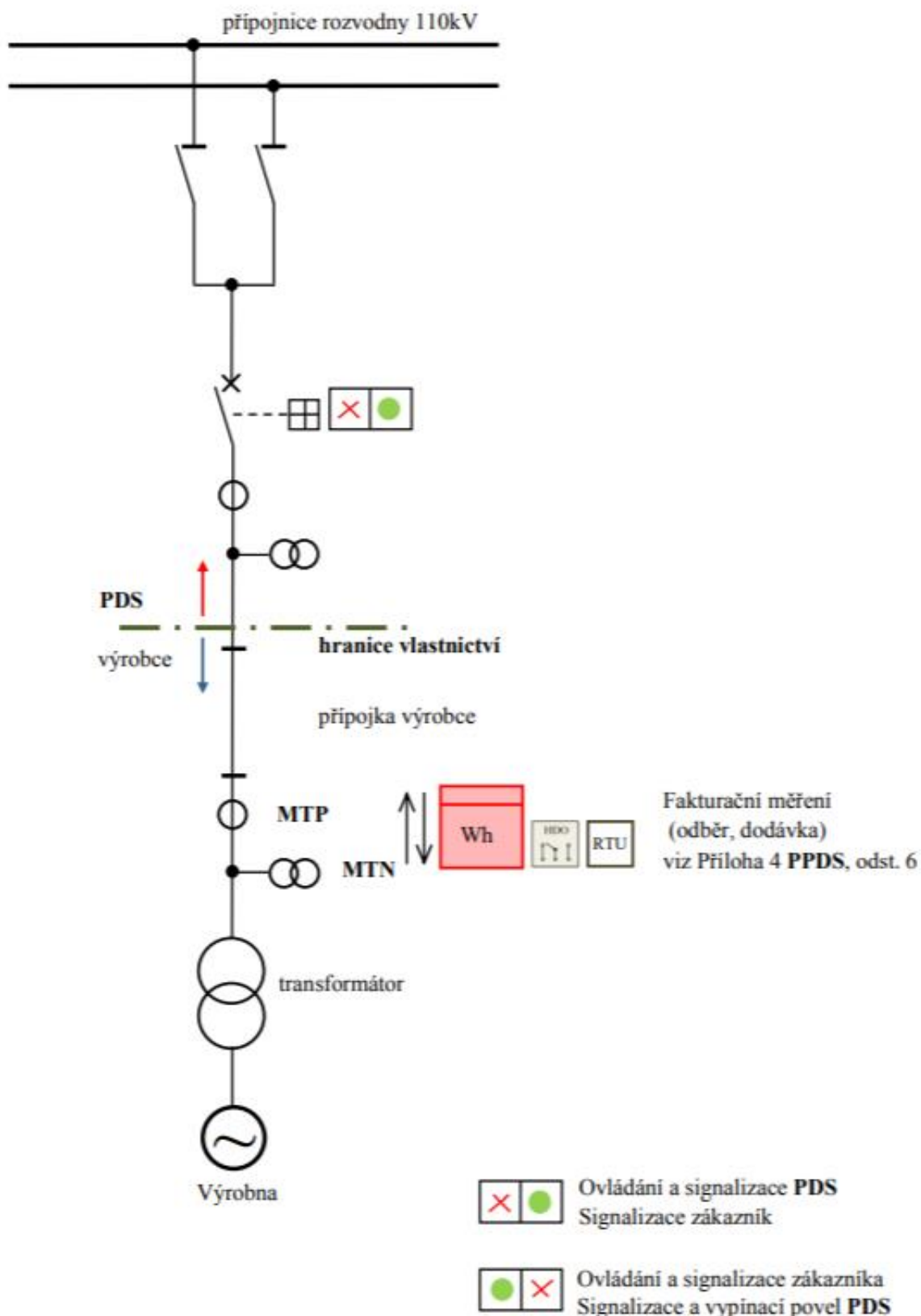


## 2.7 Ostrovní provoz

Ostrovní provoz znamená, že zdroj elektrické energie nepracuje do propojené soustavy s ostatními zdroji, ale pracuje do oddělené sítě či zátěže. Jeho výhodou jsou menší zkratové výkony, proudy a menší ztráty, jelikož se energie nepřenáší na příliš velké vzdálenosti. Nevýhodou může být nespolehlivá dodávka elektrické energie, protože pokud vypadne zdroj, žádný jiný ho nenahradí.

## 2.8 Připojení výroby do DS

Na obrázku 2.1 je znázorněn příklad připojení silové části zdroje elektrické energie do DS. Je zde vyobrazen transformátor, který zvýší napětí na potřebnou hodnotu, což je v tomto případě 110 kV. V měřicí části výroby elektrické energie se nachází měřicí transformátory proudu (výstup na transformátoru je 5 A nebo 1 A) a napětí (zde je na výstupu transformátoru 100 V). Výstupy těchto transformátorů jsou připojeny na měřicí jednotku, která měří jak dodávaný výkon, tak i odebíraný. Následně jsou zde měřicí transformátory proudu a napětí provozovatele DS. Další částí je výkonový vypínač, který vypíná zkratové proudy a odpojuje v případě potřeby zdroj elektrické energie od DS. Za vypínačem se nacházejí odpínače, které slouží pro odpojování bez zátěže, či slouží k viditelnému odpojení od DS. [6]



Obrázek 2.1 Připojení výrobny do DS. [6]

## 2.9 Pravidla pro paralelní chod zdrojů v DS

V pravidlech pro paralelní chod zdrojů v DS jsou uvedeny podklady, které pomáhají k projektování zdrojů a následnému rozhodování provozovatele DS, zda tento zdroj připojí. Je zde také uvedeno, jak se budou plánovat, řídit či provozovat zdroje elektrické energie, připojené do sítí vvn, vn, nn. Do distribuční soustavy se připojují převážně obnovitelné zdroje. Těmito zdroji jsou v České republice solární, větrné a vodní elektrárny. Při plánování a zřizování elektráren je zapotřebí se řídit nařízeními a předpisy, aby nedocházelo ke zpětnému působení na síť, zařízení či spotřebitele. Zdroje musí být schopny udržovat frekvenci v mezích 49-51 Hz. Velikost napětí udává, do jaké napěťové hladiny je elektrárna připojena, jmenovitá hodnota napětí  $U_N$  ale nesmí být větší jak  $\pm 10\%$  u sítí nn, vn a  $\pm 5\%$  u sítí vvn.

## 2.10 Provozní doba výroby při změně frekvence

Výrobní elektrické energie se odpojují od distribuční či přenosové sítě při poklesu frekvence pod 47,5 Hz nebo při zvětšení nad 51,5 Hz. V tomto rozmezí musí pracovat do propojené sítě podle následující tabulky a až následně se mimo povolenou mez musí odpojit.

Tabulka 2.1 Doba, po kterou musí výrobní vyrábět energii při změně frekvence. [17]

Rozsah frekvence	Doba trvání
47 – 47,5 Hz	20 sekund
47,5 – 48,5 Hz	30 minut
48,5 – 49 Hz	90 minut
49 – 51 Hz	neomezeně
51 – 51,5 Hz	30 minut

## 2.11 Řízení činného výkonu

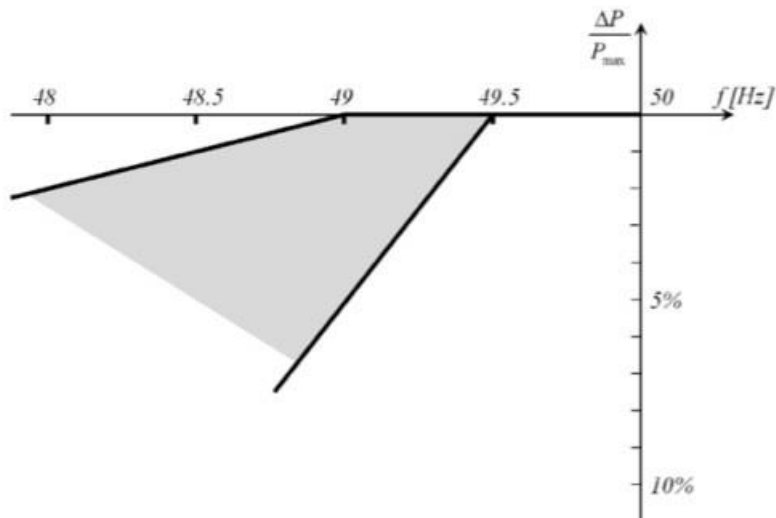
V případě ohrožení bezpečnosti a spolehlivosti provozu elektrizační soustavy je nutné, aby dispečer elektrické soustavy dočasně omezil nebo přerušil dodávku činného výkonu ze zdroje elektrické energie.

### 2.11.1 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci, podfrekvenci

Výrobní elektrické energie musí být schopna při frekvenci o hodnotě 50,2 Hz a nad touto hodnotou, snížit dodávku činného výkonu se stanovenou hodnotou statiky  $s_2$  na 5 % podle následujícího vztahu. [6]

$$\Delta P = 100 \times \frac{|\Delta f| - 50.2}{f_n} \times \frac{P_{ref}}{s_2} \quad (2.2)$$

Při hodnotě frekvence menší než je 49,5 Hz, musí být výkon omezen v požadovaném rozsahu (znázorněno v obr. 2.2).



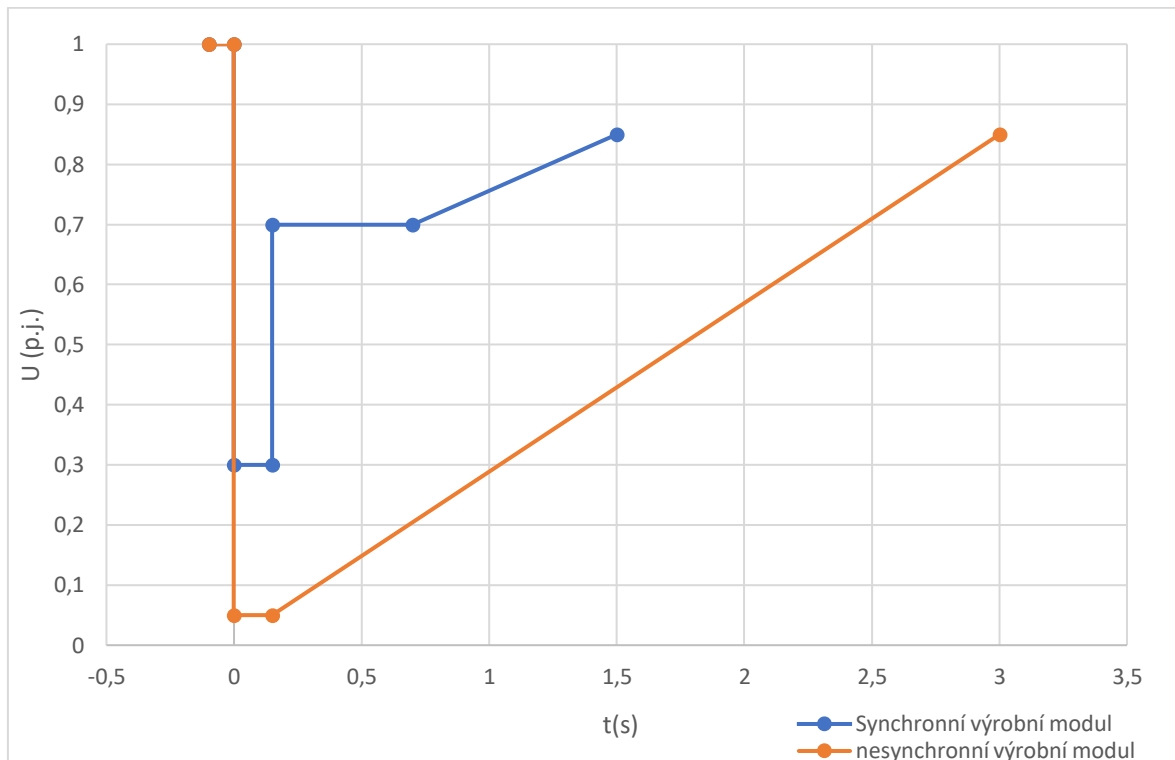
Obrázek 2.2 Snížení činného výkonu při podfrekvenci. [6]

## 2.12 Poruchy vzniklé v propojené soustavě

Výrobna musí být schopna vyrábět elektrickou energii i při poruchových stavech po určitou dobu určenou provozovatelem přenosové soustavy. Provozovatel přenosové soustavy musí uvést hodnoty minimální velikosti zkratových výkonů před a po poruše v místě připojení výroby. Dále musí uvést pracovní bod jalového a činného výkonu společně s napětím v místě připojení před poruchou. Minimální hodnoty těchto časů v závislosti na poklesu napětí jsou znázorněny na obrázku 2.3. Pokud průběh poruchového napětí leží nad touto křivkou, výroba musí zůstat připojena do propojené sítě a dodávat energii. V případě, že průběh je pod křivkou, může se výroba odpojit. Dále se v tomto grafu nachází dvě křivky, jedna je pro synchronní výrobní moduly a druhá pro nesynchronní výrobní moduly. Nesynchronní výrobní moduly pro výrobu střídavého napětí nevyužívají střídavé elektrické stroje (generátory), ale musí být vybaveny střídačem a musí být schopny vyrábět elektrickou energii i při větších poruchových stavech než synchronní výrobní moduly.

Nastavení ochran a systémů určuje provozovatel přenosové soustavy s ohledem na typ výrobního modulu. V nastavení je zohledněna bezpečnost a zdraví zaměstnanců i veřejnosti. Pod systémy ochrany patří například vnější a vnitřní zkraty, přebuzení a podbuzení, přepětí

nebo zapínací proudy. Jakákoliv změna ochrany musí být předem konzultována mezi provozovatelem přenosové soustavy a vlastníkem výroby. [18]



Obrázek 2.3 Profil schopnosti výrobních modulů překlenout poruchu. Upraveno z [18]

## 2.13 Nesynchronní výrobní moduly

Nesynchronní výrobní moduly musí být schopny dodávat požadovaný jalový výkon, který určí provozovatel soustavy. Další podmínkou provozu je schopnost dodávky rychlého poruchového proudu v místě připojení nebo měření napětí na svorkách výrobních bloků a v případě potřeby dodání rychlého poruchového proudu tam, kde je potřeba. Provozovatel DS v koordinaci s provozovatelem přenosové soustavy stanovují čas a přenos rychlého poruchového proudu, který nemusí být uvolněn v jednom okamžiku, ale může mít několik fází. Pokud se jedná o nesymetrické poruchy mohou provozovatelé požadovat též nesymetrický poruchový proud. Po poruše stanovuje provozovatel přenosové soustavy čas a velikost, kdy začne obnovení činného výkonu podle kritérií napětí, a také maximální dobu obnovování činného výkonu. [18]

### 3 Druhy výkonů

#### 3.1 Činný a jalový výkon

Ve střídavé elektrizační soustavě lze hovořit o několika typech výkonů, například činný a jalový výkon. Činný výkon koná práci a jalový výkon je důležitý z hlediska tvorby magnetického a elektrostatického pole. Z hlediska dimenzování a provozu elektrické soustavy je nutné, aby převážná část výkonu přeneseného přes síť byla činného charakteru a tím nebyla elektrická soustava zbytečně zatěžována. Pokud zanedbáme ztráty (deformační, pulzační atd.), můžeme definovat účinník jako poměr činného výkonu (P) ke zdánlivému výkonu (S). Zdánlivý výkon je definován jako vektorový součet činného a jalového výkonu.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

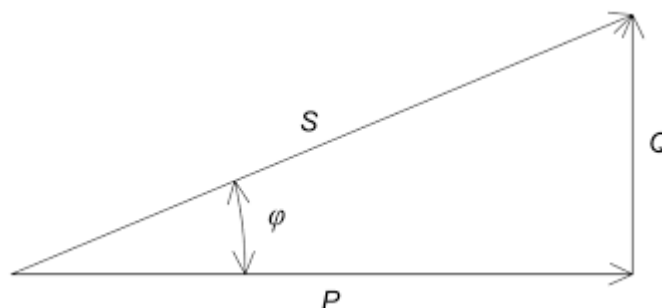
Činný výkon lze spočítat:

$$P = U \times I \times \cos \varphi \quad (3.2)$$

Jalový výkon:

$$Q = U \times I \times \sin \varphi \quad (3.3)$$

Zdánlivý výkon lze odvodit z trojúhelníku výkonů:



Obrázek 3.1 trojúhelník výkonů. [4]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.4)$$

Za normálních normou stanovených podmínek by se měla hodnota účinníku pohybovat v rozmezí  $\cos \varphi$  od 0,95 do 1.

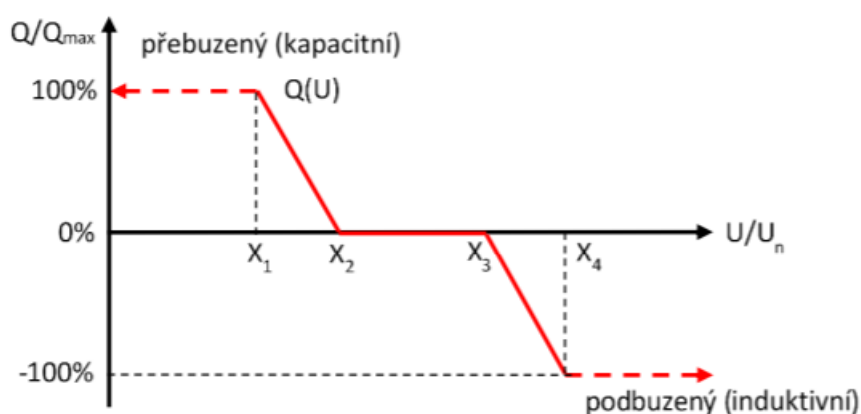
## 3.2 Řízení jalového výkonu

Jalový výkon a jeho řízení vždy závisí na místě připojení k distribuční soustavě a podléhá předpisům PPDS po konzultaci s výrobcem.

Rozsah řízení jalového výkonu je od 0,95 kapacitního do 0,95 induktivního charakteru. V tomto rozsahu musí zdroje elektrické energie být kdykoliv schopny změnit poměr dodávaných výkonů do DS. Při velikých a častých změnách výkonu zdroje (které jsou běžné u větrných a solárních elektráren) musí být dostatečně rychle a automaticky kompenzován jalový výkon. [6]

### 3.2.1 Závislost jalového výkonu na napětí

Charakteristika závislosti jalového výkonu na napětí se nastavuje podle místa připojení zdroje provozovatelem distribuční soustavy.



Obrázek 3.2 Závislost jalového výkonu na napětí. [6]

Na obrázku 3.2 lze vidět, že pokud by došlo k poklesu napětí v síti a bylo by potřeba zvýšit napětí, pohybujeme se na křivce v rozmezí mezi body  $X_1$  (maximální) a  $X_2$  (minimální), což znázorňuje dodávání jalového výkonu do sítě v místě připojení. Pokud chceme snížit napětí v síti, pohybujeme se v rozmezí mezi body  $X_3$  (minimální) a  $X_4$  (maximální) a jalový výkon odebíráme ze sítě v místě připojení.

## 3.3 Kompenzace jalového výkonu

Jak již bylo dříve zmíněno, je nutné, aby jalový výkon přenášený přes síť byl co nejmenší. Z tohoto důvodu se dodržuje rozmezí hodnot účinníku. Za menší účinník, než je povolený, může provozovatel sítě vyměřit pokutu. Velká část elektrických zařízení v dnešní

době má jak činný, tak jalový výkon. Nízké hodnoty účinníku dosahují například motory, zvláště pokud pracují bez zátěže (naprázdno). V takovém případě totiž odebírají z větší části pouze jalový výkon, který potřebují na vytvoření elektromagnetického pole, avšak nekonají žádnou práci. Při zatížení se hodnota účinníku zvýší, ale přesto má výrazně induktivní charakter. Proto je vhodné, zapojit se zařízením s nízkou hodnotou účinníku jiné zařízení, které je schopné snížit výkon jalového charakteru. Kompenzačním zařízením je nejčastěji kondenzátor u menších výkonů či synchronní kompenzátor u velkých výkonů. Kompenzace se provádí buď centrálně, individuálně, skupinově nebo kombinací již zmíněných typů.

### 3.3.1 Individuální kompenzace

U individuální kompenzace je prováděna kompenzace v místě připojení spotřebiče. Výhodou je možnost použití menších průřezů přírodních kabelů. Nevýhodou je však větší počet kompenzačních zařízení (tudíž cena) a nevhodnost použití u strojů, které pracují pouze krátkou dobu. Tato kompenzace je vhodná zejména u spotřebičů pracujících velkou část nebo po celou pracovní dobu. [14]

### 3.3.2 Skupinová kompenzace

U skupinové kompenzace je připojeno ke kompenzačnímu zařízení více spotřebičů. Výhoda je stejná jako u individuální kompenzace. Nevýhodou je nutnost řízení kompenzačního výkonu, protože zapojené spotřebiče pracují pouze po krátký časový úsek (méně než celou pracovní dobu) a tudíž se hodnota potřebného kompenzačního výkonu v průběhu času mění. [15]

### 3.3.3 Centrální kompenzace

Centrální kompenzace se provádí v blízkosti hlavní rozvodny u přívodu od provozovatele DS. Kompenzačními zařízeními prochází veškerý výkon, který chceme kompenzovat. U tohoto typu kompenzace kompenzační zařízení obvykle pracují nejdelší dobu. Nevýhodou je nutnost větších průřezů přírodních kabelů ke spotřebičům, protože kompenzace se provádí až u hlavní rozvodny.



## 4 Řízení napětí a frekvence v síti

### 4.1 Řízení napětí

Regulace napětí je závislá na poměru spotřebovávaného a dodávaného jalového výkonu. Udržení normalizované hodnoty napětí je prospěšné pro životnost a správnou funkci zařízení a přístrojů, kterými jsou například světelné spotřebiče a motory. V sítích vysokého napětí se regulace napětí provádí pomocí odboček transformátorů, většinou se zde volí transformátory umožňující změnu odbočky pouze bez zatížení. V DS se využívá regulace napětí pomocí změny jalového výkonu a můžeme se setkat také s regulací pomocí odboček transformátorů. V takovém případě se používají transformátory s možností přepínání odboček při zatížení, aby nebyla ovlivněna plynulost dodávek energie. V PS se regulace napětí provádí změnou výkonu zdrojů. [10]

#### 4.1.1 Automatická sekundární regulace napětí

Automatická sekundární regulace napětí (ASRU), pomáhá kontrolovat toky jalových výkonů a stabilizovat napětí v soustavách při všech provozních stavech. Napěťové požadavky pro připojení elektrizační soustavy České republiky do ENTSO-E byly zvládnuty díky ASRU. Tento systém zvládá řídit velké přetoky, které se přenášejí zejména z větrných elektráren v Severním moři, jenž dodávají elektrickou energii německé přenosové soustavě. Význam ASRU se bude nadále zvyšovat s rostoucím instalovaným výkonem ve větrných elektrárnách a jiných obnovitelných zdrojích.

Na rozdíl od ostatních systémů řízení jalového výkonu, ASRU nezatěžuje své ani akční členy a disponuje zpětnou vazbou, která je důležitá hlavně v případech, kdy je riziko podpětí či přepětí a malá rezerva pro řízení jalového výkonu. V takové situaci může být omezena možnost připojení velké fotovoltaické elektrárny.

Cílem systému ASRU je průběžné vyrovnávání bilance jalového výkonu ve vybraných uzlech soustavy na zadanou hodnotu napětí. Tyto uzly se nazývají pilotní (přípojnice rozvoden) a jsou k nim připojeny významnější elektrárny velkých výkonů. Proto v nich lze řídit jalový výkon a tím stabilizovat napětí. [8]

Vysvětlen fyzikální vztah pro ASRU:

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

Ze vzorce 4.1 vyplývá, že pokud chceme dosáhnout změny napětí v libovolném uzlu, musíme změnit dodávku jalového výkonu do uzlu. Změna napětí však nezávisí pouze na změně jalového výkonu, ale také na velikosti koeficientu citlivostní konstanty mezi pilotním uzlem a daným libovolným uzlem. Připojením menšího zdroje jalového výkonu do napětově citlivého bodu se bude z méně napětově citlivého bodu jevit jako zdroj s velkým jalovým výkonem.

#### 4.1.1.1 Pilotní uzel

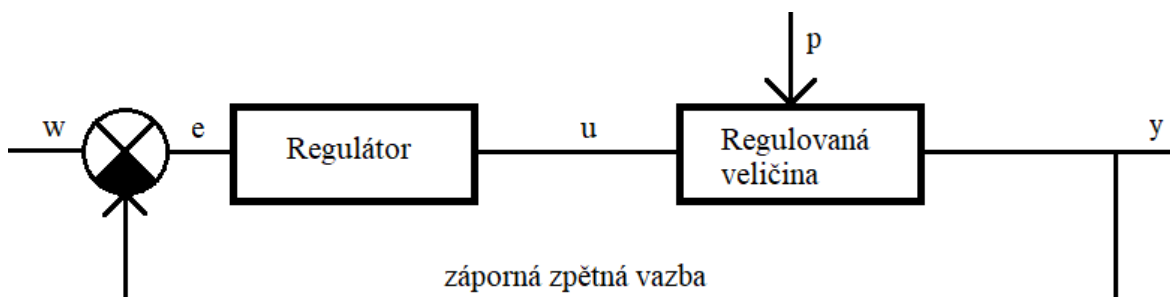
Pouze v pilotním uzlu je možné bezpečně měnit napětí změnou dodávky jalového výkonu s prioritou kontrolování napětěvých poměrů blízkých uzlů.

Pilotní uzel je bodem v soustavě, který se vyznačuje napětěvou stabilitou. Což znamená, že je možné zde dlouhodobě udržet zadanou hodnotu i při nestálé hodnotě jalového výkonu v soustavě. Charakteristikou pilotního uzlu je schopnost rychle a přesně regulovat bilanci jalového výkonu akčních členů při rychlých změnách jalového výkonu v uzlu tak, aby bylo dosaženo malé napětěvé odchylky od zadané hodnoty. V tomto uzlu se nachází dostatečné množství regulačního jalového výkonu připojeného na akční členy, který je možné v případě potřeby použít.

Pilotní uzel musí splňovat určité požadavky:

- musí obsahovat přípojnice
- měl by mít významný odběr elektrické energie, neměla by být nezatížena
- musí k němu být připojeny významné zdroje elektrické energie
- mít dobré měření a sběr dat pro vyhodnocování aktuální situace [8]

ASRU je vlastně zjednodušeně řečeno regulátor se zápornou zpětnou vazbou. Toto řízení je výhodnější než řízení účinníku. [8]



Obrázek 4.1 Regulátor se zpětnou vazbou.

V obrázku 4.1 značí písmeno **w** žádanou veličinu, **e** regulační odchylku, **u** akční veličinu, **p** poruchu, v tomto případě změnu jalového výkonu v soustavě, **y** znamená regulovanou veličinu.

Regulátor musí být vždy nastaven na určitou hodnotu napětí, jinak by regulace nefungovala správně. Existují tři typy zadávání požadované hodnoty.

- Pevně zadaná hodnota požadovaného napětí se vyskytuje v sítích vysokého napětí. V těchto sítích se velmi špatně optimalizuje tok jalového výkonu pomocí změny napětí, protože se zde nacházejí zejména transformátory bez možnosti změny odboček při zatížení. Z tohoto důvodu se volí hodnota napětí, která se rovná jmenovité hodnotě ze strany nízkého napětí.
- Ruční změnu požadované hodnoty napětí řídí ze svého uživatelského rozhraní dispečer převážně dle aktuální situace či plánu provozu soustavy. Tento způsob se využívá při pomalých změnách napětí soustavy, kdy stačí pouze občasná korekce této proměnné.
- Programově vypočtená hodnota žádaného napětí se počítá pomocí programů ze skupiny Optimal power flow (OPF). Pro tento účel se používají převážně programy pro terciální regulaci napětí a SCOPT. Terciální regulace napětí se stará pouze o optimální rozložení jalového toku v soustavě. SCOPT provádí komplexnější změny jako například změnu výroby činného výkonu či vypnutí vedení.

#### 4.1.2 Výhody použití ASRU

Mezi výhody použití ASRU patří efektivní regulace napětí. ASRU může snížit odebíraný proud jalového charakteru, jelikož se jedná o regulaci v reálném čase. Pokud bude v měření systému ASRU i počítadlo počtu regulací, díky čemuž lze vyhodnotit dynamiku soustavy udávající časovou závislost napětí a proudu.

## 4.2 Řízení frekvence

Regulace frekvence se provádí pomocí změny činného výkonu tak, aby frekvence zůstala stejná za všech okolností. V propojené elektrizační soustavě je regulace frekvence závislá na principu udržování výkonové rovnováhy, kdy se v případě vypnutí zdroje nebo poruše vedení podílejí na udržení frekvence všechny zdroje, které jsou připojeny do elektrizační soustavy. Cílem provozovatelů ES je minimalizovat počet zdrojů, které jsou zasaženy poruchou v síti. Na změnu frekvence ideálně nezareagují všechny zdroje připojené do této soustavy, ale pouze zdroje připojené do soustavy, kde se vyskytla změna frekvence.

Podle velikosti odchylky od normalizované hodnoty frekvence se provádí regulace pomocí změny výkonů tepelných elektráren či se připojí zdroje zařazené do podpůrných služeb (PpS).

#### 4.2.1 Systémové služby

O systémové služby elektrizační soustavy České republiky se stará firma ČEPS. a.s. Zastřešují prostředky k udržení spolehlivé dodávky elektrické energie jak v přenosové soustavě České republiky, tak v propojené elektrizační soustavě ENTSO - E. Slouží pro udržení kvality elektrické energie, výkonové rovnováhy v reálném čase a případně také pro obnovení provozu elektrizační soustavy.

#### 4.2.2 Podpůrné služby

Podpůrné služby poskytují možnost regulovat rozdíl mezi odebíraným a vyrobeným výkonem. Na tento typ služeb jsou kladeny požadavky jako například dostatečně kvalitní měření a kdykoliv a v jakémkoli ročním období garance dostupnosti služby s možnou kontrolou nadřízených orgánů. Zdroje připojené do PpS musí být certifikovány a průběžně kontrolovány. Do podpůrných služeb patří zejména primární, sekundární a terciální regulace. [11]

#### 4.2.3 Primární regulace

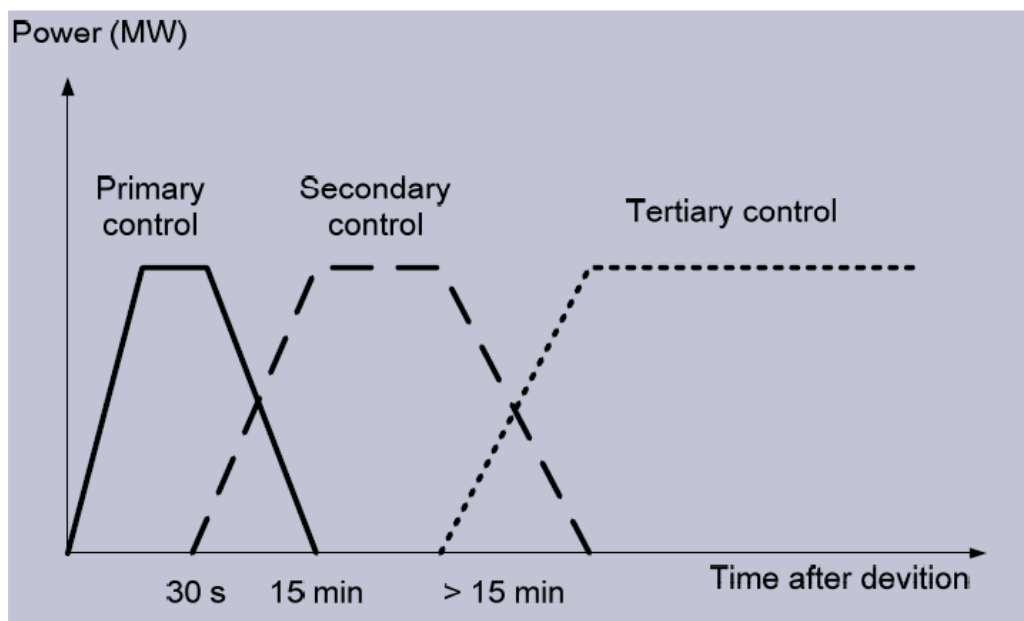
Každý provozovatel přenosové soustavy musí zajistit výkonovou zálohu danou normou s dostatečně rychlou reakční dobou. Zdroje pracující do této regulace musí být schopny změny výkonu do 30 sekund od vzniku odchylky frekvence 200 mHz od jmenovité frekvence. Maximální velikost výkonu, který může provozovatel PS vykoupit z jednoho bloku, je 10 MW a minimální je 3 MW. [9]

#### 4.2.4 Sekundární regulace

Tato regulace pracuje v koordinaci s primární regulací a vyrovnává výkyvy frekvence v postižené oblasti takovým způsobem, že posílá požadovanou hodnotu výkonu na bloky, které jsou připraveny a zapojeny do podpůrných služeb. Tato regulace by měla obnovit požadovanou frekvenci do 10 minut od okamžiku výpadku zdroje či poruchy vedení. Velikost zálohy je u této regulace od 10 MW do 20 MW. [9]

#### 4.2.5 Terciální regulace

V této regulaci se mění výkon bloku elektráren podle pokynů dispečinku ČEPS, který může buď snižovat výkon nebo zvyšovat výkon dodávaný do sítě. Výkon zdrojů se pohybuje od 30 MW do 100 MW a mezní čas, za který musí začít dodávat smluvený výkon je 30 minut. Změna výkonu za čas musí být minimálně 2 MW/min. Obr. 4.2 znázorňuje jednotlivé typy regulace a jejich rozdíly. [11]



Obrázek 4.2 Primární, sekundární a terciální regulace. [11]

#### 4.2.6 Rychle startující záloha

Tato regulace se dělí na 10-ti minutovou a 15-ti minutovou zálohu. U 10-ti minutové musí být schopen zdroj dodávat smluvenou regulační zálohu RZMZt do 10-ti minut od požadavku provozovatele přenosové soustavy. Regulační záloha 10-ti minutová může být buď kladná či záporná podle požadavků provozovatele PS. Pojmem kladná rychle startující záloha se rozumí zvýšení dodávaného výkonu bloku elektrárny, nebo odpojení potřebné zátěže od elektrizační soustavy. Minimální velikost výkonu pro 10-ti minutovou zálohu je 30 MW a minimální doba, po kterou musí garantovat dodávat výkon jsou 4 hodiny i při blížícím se konci rezervace této služby. Do rychle startujících 10-ti minutových záloh patří takzvaná Vltavská kaskáda (jedná se o vodní přehrady postavené na Vltavě). 15-ti minutová záloha musí začít dodávat výkon do 15 minut od vzniku požadavku. Nejmenší výkon pro tento typ terciální regulace je 70 MW a doba rezervace není omezena. [11][12]

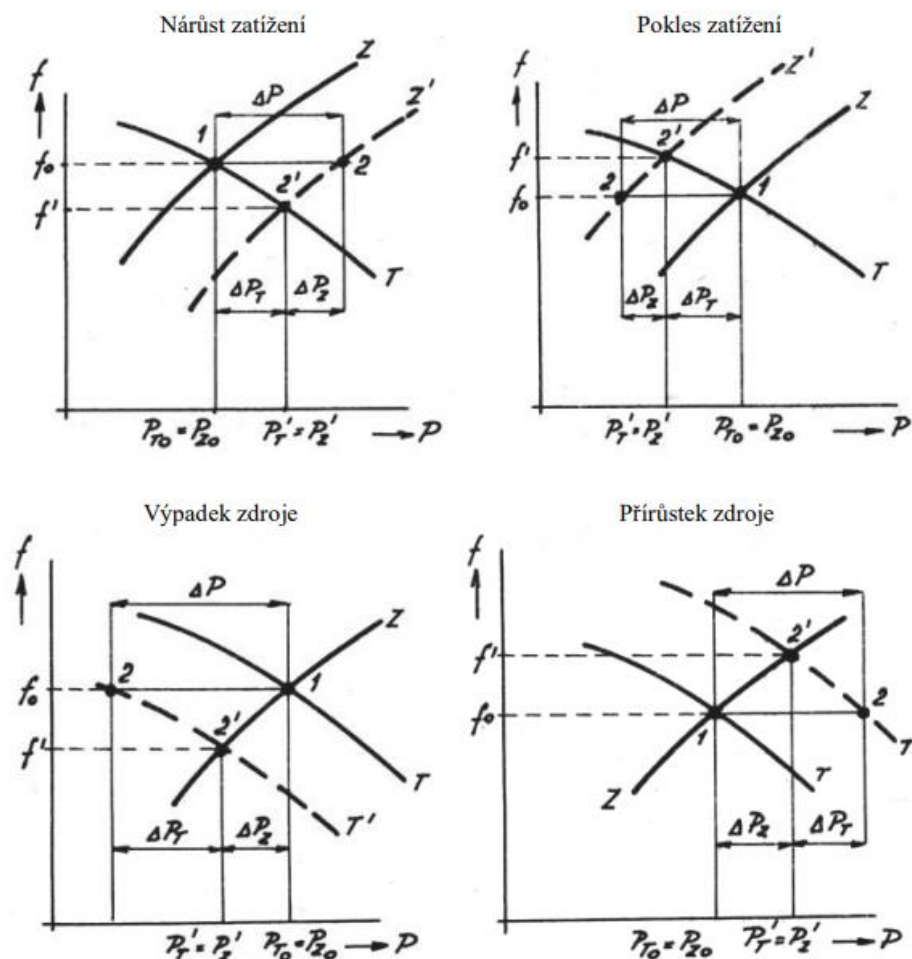
#### 4.2.7 Snížení výkonu

Ke snížení výkonu se přistupuje při nedodržení sjednaného diagramu a nemožnosti udržení výchytky v povolených mezích pomocí sekundární a záporné terciální regulace. Minimální výkon je 30 MW a doba, po kterou musí garantovat využití od příchodu požadavku je 24 hodin.

#### 4.2.8 Snížení zatížení

Při službě snížení zatížení se snižuje nebo zvyšuje zatížení o předem stanovenou hodnotu regulační zálohy. Maximální možné množství zatížení musí být aktivováno do 30 minut a trvat po dobu minimálně 120 minut.

#### 4.3 Působení primární a sekundární regulace



Obrázek 4.3 Změna frekvence při změně zatížení či změně výkonu zdroje. [9]

Z obrázku 4.3 je patrné, že při nárůstu či poklesu zatížení se musí zvýšit výkon zdroje pouze o  $\Delta P_T$ .  $\Delta P_Z$  je snížení požadavku zátěže při poklesu zátěže. Tento jev se nazývá

samoregulační efekt ES. Obdobný princip platí i pro výpadek či přírůstek výkonu od zdroje.

#### 4.4 Nový kodex přenosové soustavy

V průběhu vypracování bakalářské práce došlo od 1.1 2020 ke změnám v kodexu přenosové soustavy. Tyto změny se týkají i podpůrných služeb. Primární regulace byla přejmenována na proces automatické regulace (FCP). Doba a rozmezí výkonů však zůstaly nezměněny.

Sekundární regulace byla přejmenována na automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy ( ${}_A\text{FRP}$ ). Čas, za který musí poskytovatel podpůrné služby dodat smluvený výkon, se nezměnil. Rozmezí výkonů je nově od 10 MW do 70MW.

Pojem minutové zálohy byl nahrazen ručně ovládaným procesem obnovení frekvence a výkonové rovnováhy ( ${}_M\text{FRP}_T$ ). Maximální časy pro poskytnutí smluvené výkonu jsou nyní 5 minut a 15 minut. U 5-ti minutové je minimální výkon 30 MW a maximální hodnotu regulačního výkonu určuje provozovatel přenosové soustavy. Minimální doba trvání jsou 4 hodiny. Pro čas 15 minut se hodnoty výkonů ani doba aktivace služby nezměnila. [24]

## 5 Konkrétní případ realizace

Po konzultaci s Ing. Františkem Žákem jsem se rozhodl vypracovat analýzu připojení reálné fotovoltaické elektrárny o výkonu 2,2 MW do distribuční sítě na základě poskytnutých dat. Jako vstupní předpoklady připojení této konkrétní elektrárny do distribuční sítě jsem vybral tři paralelně zapojené transformátory 0,4/22 kV o výkonu 800 kVA a kabel o délce pět kilometrů. Tyto údaje byly poté použity pro následující výpočty.

### Fotovoltaická elektrárna

Fotovoltaická elektrárna je tvořena sério-paralelním spojením mnoha fotovoltaických panelů. Výkon panelů se obvykle udává v jednotce watt peak (Wp), která udává maximální možný dodaný výkon. Takového výkonu je možné typicky dosáhnout pouze ve standardizovaných laboratorních podmínkách (1 kW/m<sup>2</sup> energie dopadá kolmo, při teplotě 25 °C). V reálných podmínkách je dodaný výkon většinou nižší než udávaný. [21]

### Střídač

Slouží k přeměně stejnosměrného napětí na střídavé napětí. Díky tomuto zařízení můžeme z fotovoltaické elektrárny udělat řízený zdroj elektrické energie. Za střídačem je kompenzační zařízení o hodnotě 150 kVar kapacitního charakteru a indukčnosti o velikosti 5,5 μH.

### Transformátor

Slouží k transformaci střídavého napětí na hodnoty vhodné pro přenos na velké vzdálenosti při co nejnižších ztrátách. Nicméně i na transformátoru vznikají určité ztráty, které jsou uvedené v tabulce 5.1. Z těchto hodnot lze vypočítat náhradní schéma transformátoru, které budu využívat při výpočtu FVE.

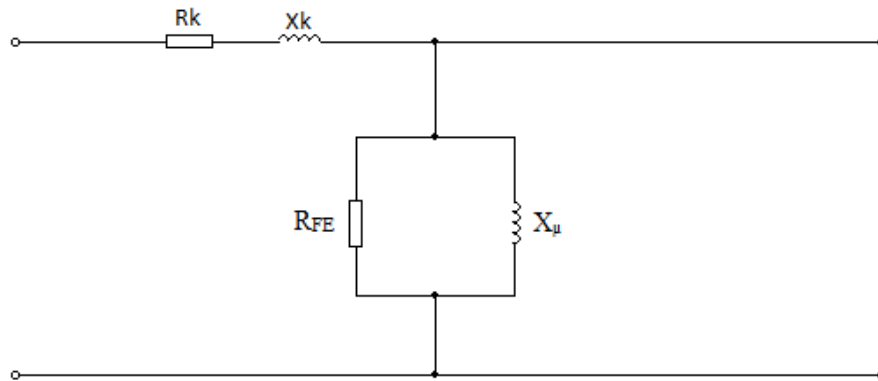
Tabulka 5.1 Parametry transformátoru DOTEL 800H/20.

DOTEL 800H/20	
S (kVa)	800
P <sub>0</sub> (W)	650
P <sub>k</sub> (W)	8400
u <sub>k</sub> (%)	6
i <sub>0</sub> (%)	0,2

Na obrázku 5.1 se podélné parametry spočítají pomocí ztrát nakrátko P<sub>k</sub> a napětí nakrátko u<sub>k</sub>. Ztráty R<sub>k</sub> znamenají odpor ve vinutí, X<sub>k</sub> nahrazuje rozptylovou reaktanci. V příčné větvi znamená R<sub>FE</sub> ztrátu v železe a X<sub>μ</sub> magnetizační reaktanci. Příčné parametry



se spočítají pomocí ztrát naprázdno  $P_0$  a proudu naprázdno  $i_0$ .



Obrázek 5.1 Náhradní schéma transformátoru.

Následuje výpočet náhradního schématu transformátoru s konkrétními hodnotami pro vybranou fotovoltaickou elektrárnu. Důvodem dělení jednotlivých výsledků třemi je použití tří paralelně spojených transformátorů.

$$R_K = \Delta P_K \cdot \left(\frac{U_N}{S_N}\right)^2 = 8400 \cdot \left(\frac{22000}{800000}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} = 2,118 \Omega \quad (5.1)$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}\right)^2 - R_K^2} = \sqrt{\left(\frac{6}{100} \cdot \frac{22000^2}{800000}\right)^2 - 6,325^2} \cdot \frac{1}{3} = 11,913i \Omega \quad (5.2)$$

$$R_{FE} = \frac{U_N^2}{\Delta P_0} = \frac{22000^2}{650} \cdot \frac{1}{3} = 248,205 k\Omega \quad (5.3)$$

$$X_\mu = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}} = \frac{\frac{22000}{0,002 \cdot \frac{800000}{22000}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,002 \cdot \frac{800000}{22000}}{744 \frac{615}{22000}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{3} = 110,049i k\Omega \quad (5.4)$$

Převod transformátoru

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{0,4}{22} = 0,0182 \quad (5.5)$$

## Kabel

Se souhlasem konzultanta jsem vybral silový kabel typu 22-AXEKVCEY, který bude spojoval FVE s distribuční sítí a má parametry uvedené v tabulce 5.2. Použil jsem tři paralelní kabely pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie do sítě v předávacím místě. Podélné parametry je třeba vydělit 3 a příčné vynásobit 3.

Tabulka 5.2 Parametry kabelu.

22 - AXEKVCEY	
Průřez kabelu (mm <sup>2</sup> )	3 x 240
Délka l (km)	5
Podélný odpor R <sub>k</sub> (Ω/km)	0,125
Příčná kapacita C <sub>k</sub> (μF/km)	0,3
Podélná indukčnost L <sub>k</sub> (mH/km)	0,57

Výpočty parametrů kabelů:

$$R_V = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 5 \cdot \frac{1}{3} = 0,208 \Omega \quad (5.6)$$

$$L_V = L_k \cdot l = 0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 2,85 \text{ mH} \quad (5.7)$$

$$X_{VL} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_V = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} = 0,298i \Omega \quad (5.8)$$

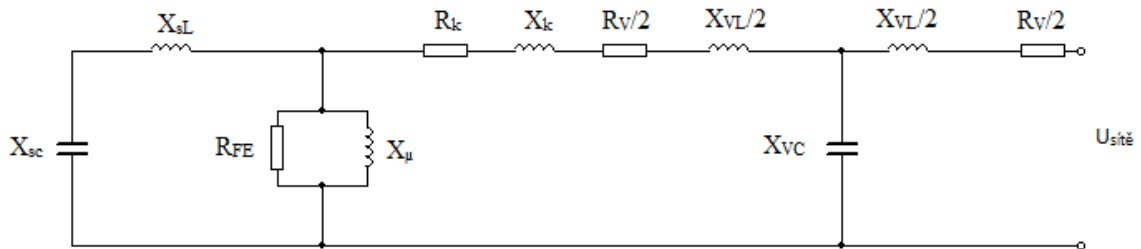
$$C_v = C_k \cdot l = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 1,5 \mu F \quad (5.9)$$

$$X_{VC} = \frac{1}{2 \cdot f \cdot \pi \cdot C_v} = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} \cdot 3 = -6366,198i \Omega \quad (5.10)$$

## Výpočet

Připojením FVE k distribuční soustavě se v podstatě jedná o obvod se dvěma nezávislými zdroji, kdy lze pro výpočet s výhodou použít metodu superpozice, u které se vypočítávají veličiny pomocí superpozice příspěvků jednotlivých zdrojů. Distribuční síť budu nahrazovat zdrojem napětí a FVE budu nahrazovat zdrojem proudu. Řešení je rozděleno na dva kroky, v prvním kroku budu počítat se zdrojem napětí a zdroj proudu

odpojím. Ve druhém kroku vyjmu zdroj napětí a nahradím ho zkratem, připojím zdroj proudu a vypočtu veličiny na prvcích obvodu pro výkon dodávaný z FVE. Výsledný proud a napětí na jednotlivých prvcích je vypočten superpozicí příspěvků zdrojů.



Obrázek 5.2 Obvod se zdrojem distribuční sítě.

Nejdříve si vypočítám kapacitní a induktivní reaktanci za střídačem a přečítám tyto reaktance na hladinu 22 kV.

$$X_{sc} = \frac{U_N^2}{Q} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{3 \cdot 230^2}{150000} \cdot \frac{1}{0,0182^2} = -3200,45i \Omega \quad (5.11)$$

$$X_{sL} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot \frac{1}{p^2} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{0,0182^2} = 5,227i \Omega \quad (5.12)$$

Tyto dva prvky sériově sečteme

$$Z_{a1} = X_{sc} + X_{sL} = -3200,45i + 5,227i = -3195,223i \Omega \quad (5.13)$$

Nyní si paralelně sečteme  $R_{FE}$  a  $X_\mu$

$$Z_{b1} = \frac{R_{FE} \cdot X_\mu}{R_{FE} + X_\mu} = \frac{248\,205 \cdot 110\,049i}{248\,205 + 110\,049i} = (40,963 + 92,137i) \text{ k}\Omega \quad (5.14)$$

Paralelní spojení  $Z_{a1}$  a  $Z_{b1}$

$$Z_{11} = \frac{Z_{a1} \cdot Z_{b1}}{Z_{a1} + Z_{b1}} = \frac{(40963 + 92137i) \cdot (-3195,223i)}{(40963 + 92137i) + (-3195,223i)} = 43,615 - 3289,923i \Omega \quad (5.15)$$

Sériové spojení  $Z_{11}$ ,  $R_k$ ,  $X_k$ ,  $X_{vL/2}$ ,  $R_{k/2}$

$$Z_{12} = Z_{11} + R_k + X_k + \frac{X_{vL}}{2} + \frac{R_v}{2} = 43,615 - 3289,923i + 2,118 + 11,913i + 0,149i + 0,104 = (45,837 - 3277,86i) \Omega \quad (5.16)$$

Následně sečteme paralelně  $Z_{12}$  s  $X_{vc}$

$$Z_{13} = \frac{Z_{12} \cdot X_{vc}}{Z_{12} + X_{vc}} = \frac{(45,837 - 3277,86i) \cdot (-6366,197i)}{45,837 - 3277,86i - 6366,197i} = (19,973 - 2163,864i) \Omega \quad (5.17)$$

Nakonec sériově sečteme  $Z_{13}$  s  $R_{v/2}$  a  $X_{vL/2}$

$$\begin{aligned} Z_{c1} &= Z_{13} + X_{vL/2} + R_{v/2} = 19,973 - 2163,864i + 0,104 + 149i = \\ &= (20,077 - 2163,714i) \Omega \end{aligned} \quad (5.18)$$

Následně vypočítáme napětí a proudy na jednotlivých prvcích:

Proud dodávaný ze sítě

$$I_{sítě1} = \frac{U_{fsítě}}{Z_{c1}} = \frac{12701,706}{20,077 - 2163,714i} = (0,054 + 5,869i) \text{ A} \quad (5.19)$$

Napětí na kapacitní reaktanci  $X_{vc}$

$$\begin{aligned} U_{xvc1} &= U_{fsítě} - \left( I_{sítě} \cdot \left( R_{v/2} + X_{vL/2} \right) \right) = \\ &= 12701,706 - \left( (0,054 + 5,869i) \cdot (0,104 + 0,149i) \right) = \\ &= (12702,576 - 0,619i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Proud za transformátorem  $Z_{12}$

$$I_{z12} = \frac{U_{xvc1}}{Z_{12}} = \frac{12702,576 - 0,619i}{45,837 - 3277,86i} = (0,054 + 3,874i) \text{ A} \quad (5.21)$$

Napětí na transformátoru  $Z_{b1}$

$$\begin{aligned} U_{zb1} &= U_{xvc1} - \left( I_{z12} \cdot \left( R_k + X_k + X_{cL/2} + R_{v/2} \right) \right) = \\ &= 12702,57 - 0,619i + \\ &- \left( (0,054 + 3,874i) \cdot (2,118 + 11,913i + 0,149i + 0,104) \right) = \\ &= (12749,192 - 9,883i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Proud na impedanci  $Z_{a1}$

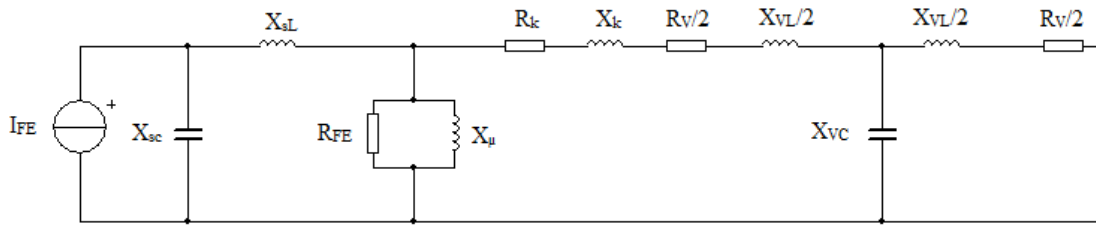
$$I_{za1} = \frac{U_{zb1}}{Z_{a1}} = \frac{12749,192 - 9,883i}{-3195,223i} = (0,003 + 3,99i) \text{ A} \quad (5.23)$$

Napětí na FVE

$$\begin{aligned} U_{FVE1} &= I_{za1} \cdot X_{sc} = (0,003 + 3,99i) \cdot (-3200,45i) = \\ &= (12770,047 - 9,899i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.24)$$

### Následuje výpočet ze strany FVE:

Výpočet provedu pro maximální proud, který je FVE schopna dodávat. Ten přepočítám na fázové napětí 12,701 kV a získám hodnotu 57 A. Zdroj proudu bude mít fázový posun  $0^\circ$ , což znamená, že uvažuji dodávaný pouze činný výkon z FVE.



Obrázek 5.3 Obvod ze strany FVE.

Nejdříve si vypočítám opět impedanci obvodu. Sériově  $R_{v/2}$  a  $X_{vL/2}$

$$Z_{21} = R_{v/2} + X_{vL/2} = 0,104 + 0,149i = (0,104 + 0,149i) \Omega \quad (5.25)$$

Paralelně  $Z_{21}$  s  $X_{vc}$

$$\begin{aligned} Z_{22} &= \frac{Z_{21} \cdot X_{vc}}{Z_{21} + X_{vc}} = \frac{(0,104 + 0,149i) \cdot (-6366,198i)}{0,104 + 0,149i - 6366,198i} = \\ &= (0,104 + 0,149i) \Omega \end{aligned} \quad (5.26)$$

Sériově  $Z_{22}$ ,  $R_{v/2}$ ,  $X_{vL/2}$ ,  $R_k$  a  $X_k$

$$\begin{aligned} Z_{23} &= Z_{22} + R_k + X_k + X_{vL/2} + R_{v/2} = \\ &= 0,104 + 0,149i + 2,118 + 11,913i + 0,104 + 0,149i = \\ &= (2,325 + 12,212i) \Omega \end{aligned} \quad (5.27)$$

Paralelně  $Z_{23}$  a  $Z_{b1}$

$$\begin{aligned} Z_{24} &= \frac{Z_{23} \cdot Z_{b1}}{Z_{23} + Z_{b1}} = \frac{(2,325 + 12,212i) \cdot (40963 + 92137i)}{2,325 + 12,212i + 40963 + 92137i} = \\ &= (2,326 + 12,210i) \Omega \end{aligned} \quad (5.28)$$

Sériově  $Z_{24}$  a  $X_{sL}$

$$Z_{25} = Z_{24} + X_{sL} = 2,326 + 12,210i + 5,227i = (2,326 + 17,437i) \Omega \quad (5.29)$$

Paralelně  $Z_{25}$  a  $X_{sc}$

$$\begin{aligned} Z_{c2} &= \frac{Z_{25} \cdot X_{sc}}{Z_{25} + X_{sc}} = \frac{(2,326 + 17,437i) \cdot (-3200,45i)}{2,326 + 17,437i - 3200,45i} = \\ &= (2,351 + 17,53i) \Omega \end{aligned} \quad (5.30)$$

Napětí na zdroji proudu:

$$\begin{aligned} U_{fFVE2} &= I_{FVE} \cdot Z_{c2} = 57 \cdot (2,351 + 17,53i) = \\ &= (134,033 + 999,257i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Dále proud  $I_{Z25}$

$$I_{Z25} = \frac{U_{FVE2}}{Z_{25}} = \frac{134,033 + 999,257i}{2,326 + 17,437i} = (57,312 - 0,042i) \text{ A} \quad (5.32)$$

Napětí na transformátoru  $U_{z24}$ :

$$\begin{aligned} U_{z24} &= I_{z25} \cdot Z_{24} = (57,312 - 0,042i) \cdot (2,326 + 12,210i) = \\ &= (133,814 + 699,696i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Proud před transformátorem  $I_{z23}$ :

$$I_{z23} = \frac{U_{z24}}{Z_{23}} = \frac{133,814 + 699,696i}{2,325 + 12,212i} = (57,305 - 0,043i) \text{ A} \quad (5.34)$$

Napětí na  $X_{vc}$ .

$$\begin{aligned} U_{xvc2} &= I_{z23} \cdot Z_{22} = (57,305 - 0,043i) \cdot (0,104 + 0,149i) = \\ &= (5,976 + 8,547i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Proud dodávaný do sítě  $I_{sítě2}$ .

$$I_{sítě2} = \frac{U_{xvc}}{Z_{21}} = \frac{5,976 + 8,547i}{0,104 + 0,149i} = (57,307 - 0,044i) \text{ A} \quad (5.36)$$

### Výsledná napětí a proudy:

Výsledná napětí dostanu tak, že napětí na jednotlivých prvcích sečtu a proudy odečtu.

Proud FVE:

$$I_{FVE} = 57 \text{ A} \quad (5.37)$$

Napětí na FVE:

$$\begin{aligned} U_{fFVE} &= U_{fFVE1} + U_{fFVE2} = 12770,047 - 9,899i + 134,033 + \\ &+ 999,257 = \\ &= (12904,079 + 989,358i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Proud před transformátorem

$$\begin{aligned} I_{tr} &= I_{z25} - I_{za1} = 57,312 - 0,042i - (0,003 + 3,99i) = \\ &= (57,309 - 4,032i) \text{ A} \end{aligned} \quad (5.39)$$

Napětí na transformátoru:

$$\begin{aligned} U_{tr} &= U_{zb1} + U_{z24} = (12749,192 - 9,883i) + (133,814 + 699,696i) = \\ &= (12883,006 + 689,813i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.40)$$

Proud na vedení:

$$\begin{aligned} I_V &= I_{z23} - I_{z12} = (57,305 - 0,043i) - (0,054 + 3,874i) = \\ &= (57,251 - 3,922i) \text{ A} \end{aligned} \quad (5.41)$$

Napětí na vedení:

$$\begin{aligned} U_v &= U_{xvc1} + U_{xvc2} = (12702,576 - 0,619i) + (5,976 + 8,547i) = \\ &= (12708,552 + 7,927i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.42)$$

Proud sítě:

$$\begin{aligned} I_{sítě} &= I_{sítě2} - I_{sítě1} = (57,307 - 0,044i) - (0,054 + 5,869i) = \\ &= (57,252 - 5,914i) \text{ V} \end{aligned} \quad (5.43)$$

Napětí sítě:

$$U_{f_{sítě}} = 12,701 \text{ kV} \quad (5.44)$$

Následně si z proudů a napětí u FVE spočítáme komplexní výkon.

$$\begin{aligned} S_{FVE} &= 3 \cdot U_{f_{FVE}} \cdot I_{FVE}^* = 3 \cdot (12904,079 + 989,358i) \cdot (57) = \\ &= (2206,597 + 169,18i) \text{ kVA} \end{aligned} \quad (5.45)$$

Činný výkon je reálná složka komplexního výkonu

$$P_{FVE} = 220,597 \text{ kW} \quad (5.46)$$

Jalový výkon je imaginární složka komplexního výkonu

$$Q_{FVE} = 169,18 \text{ kVar} \quad (5.47)$$

Stejným způsobem zjistím komplexní výkon v síti

$$\begin{aligned} S_{sítě} &= 3 \cdot U_{f_{sítě}} \cdot I_{sítě}^* = 3 \cdot 12701 \cdot (57,252 + 5,914i) = \\ &= (2181,602 + 225,362i) \text{ kVA} \end{aligned} \quad (5.48)$$

Činný výkon v síti

$$P_{sítě} = 2181,602 \text{ kW} \quad (5.49)$$

Jalový výkon v síti

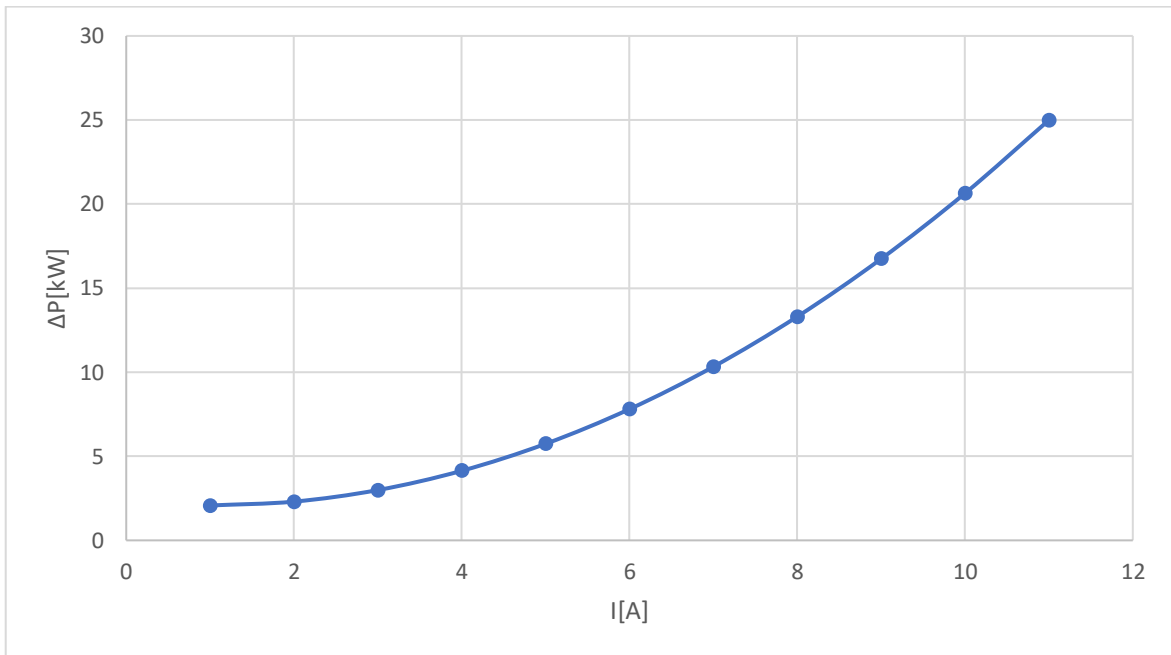
$$Q_{sítě} = 225,362 \text{ kVar} \quad (5.44)$$

Tabulka 5.3 Hodnoty výkonů pro různé hodnoty proudu při stejné hodnotě úhlu  $0^\circ$ .

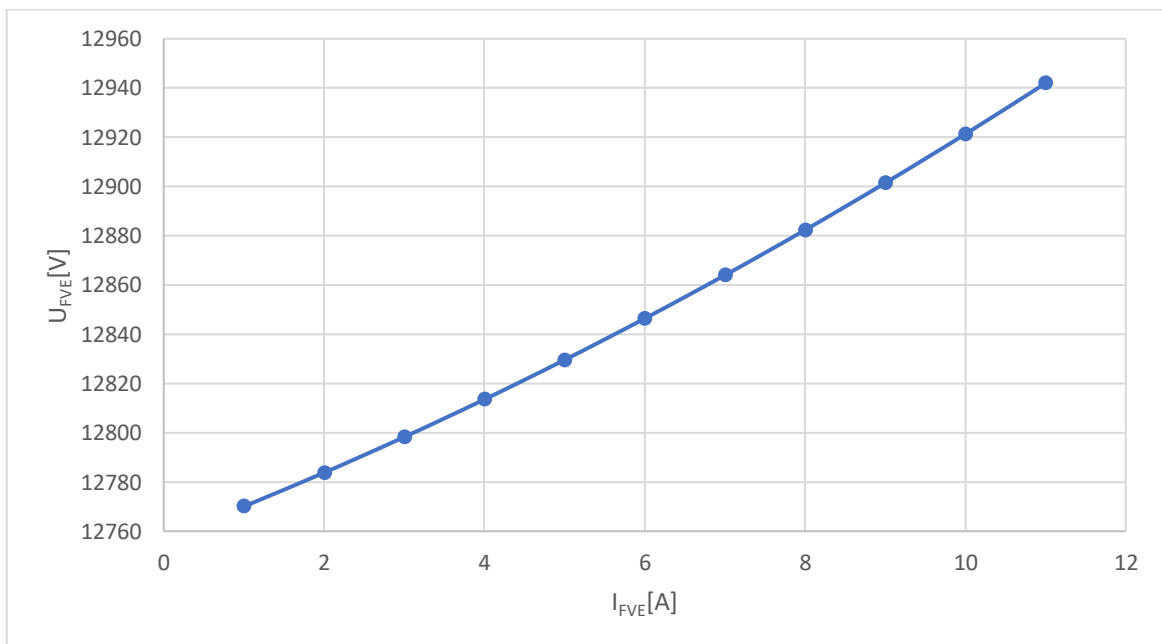
Úhel FVE [°]	$I_{FVE}$ [A]	$S_{FVE}$ [kVA]	$P_{FVE}$ [kW]	$Q_{FVE}$ [kVar]	$S_{sítě}$ [kVA]	$P_{sítě}$ [kW]	$Q_{sítě}$ [kVar]
0	0	0	0	0	224	-2	224
0	5,84	219	219	2	311	216	224
0	11,4	438	438	6	489	435	224
0	17,1	657	657	15	690	653	224
0	22,8	878	877	27	900	871	224
0	28,5	1098	1098	42	1113	1090	225
0	34,2	1320	1318	60	1327	1308	225
0	39,9	1542	1540	83	1543	1526	225
0	45,6	1765	1762	108	1759	1745	225
0	51,3	1989	1984	137	1976	1963	225
0	57	2213	2207	169	2193	2182	225

Z tabulky 5.3 lze vidět, že pokud budeme dodávat z FVE proměnný proud se stejným úhlem  $0^\circ$ , musí síť dodávat jalový výkon od hodnoty 224 kVar do 225 kVar. Ztráty jsou způsobeny ztrátami na vedení, podélnými a příčnými prvky transformátoru. Z obr. 5.4

je vidět, že i při nulové dodávce výkonu z FVE, jsou ztráty zhruba 2 kW, při plném zatížení jsou pak 25 kW.



Obrázek 5.4 Závislost ztrát na proudu dodávaném FVE.



Obrázek 5.5 Závislost napětí FVE na dodávaném proudu.

Na obrázku 5.5 je zobrazeno napětí FVE, které roste s dodávaným proudem téměř lineárně.

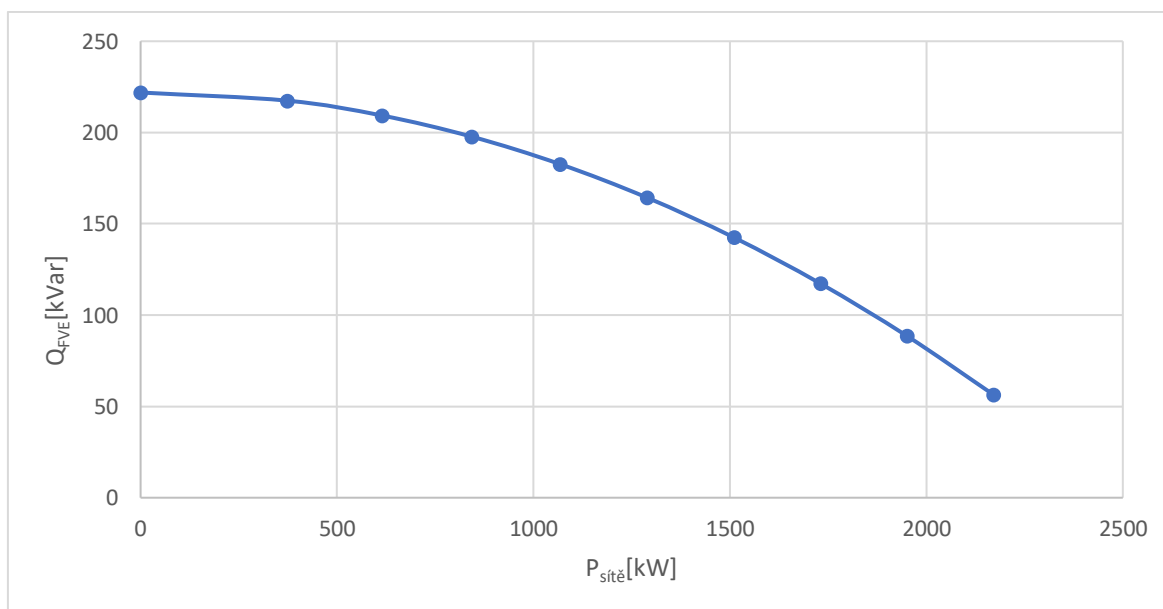
Následně jsem začal měnit úhel proudu dodávaný z FVE, abych zjistil, kdy bude FVE dodávat pouze činný výkon v předávacím místě sítě. Tyto úhly pro konkrétní proudy jsem vypočetl z rovnic grafů. Následně jsem zhotovil analogické výpočty výkonů jako v předchozím případě pro hodnoty proudů a jejich úhlů pro  $\cos \varphi = 1$  v předávacím místě.



Tabulka 5.4 hodnota výkonů pro  $\cos \varphi = 1$  v předávacím místě.

Úhel FVE [°]	$I_{FVE}$ [A]	$S_{FVE}$ [kVA]	$P_{FVE}$ [kW]	$Q_{FVE}$ [kVar]	$S_{sítě}$ [kVA]	$P_{sítě}$ [kW]	$Q_{sítě}$ [kVar]
0	0	0	0	0	224	-2	224
89,513	5,84	222	2	-222	0	0	0
30,851	11,4	434	376	-217	373	373	0
20,0083	17,1	652	617	-209	614	614	0
14,88145	22,8	870	848	-198	842	842	0
11,8655	28,5	1089	1074	-183	1067	1067	0
9,87375	34,2	1309	1299	-164	1289	1289	0
8,4585	39,9	1530	1523	-142	1510	1510	0
7,4005	45,6	1751	1747	-117	1730	1730	0
6,57935	51,3	1973	1971	-88	1950	1950	0
5,92344	57	2195	2195	-56	2170	2170	0

Z tabulky 5.4 je patrné, že nabíjecí výkon této FVE nastane pro hodnotu proudu 5,84 A s úhlem téměř  $90^\circ$ . Z toho lze odvodit, že pokud klesne proud FVE pod hodnotu 5,84 A a úhel zůstane  $90^\circ$ , FVE se v předávacím místě stává zátěží a síť musí dodávat do obvodu FVE jalový výkon i činný výkon. Dále je zde vidět, že s rostoucím proudem klesá i potřebný úhel z FVE pro udržení konstantního účinníku  $\cos \varphi = 1$  v předávacím místě, což značí zmenšující se dodávaný výkon z FVE. Toto chování je zapříčiněno rostoucím proudem procházejícím přes podélné indukčnosti.

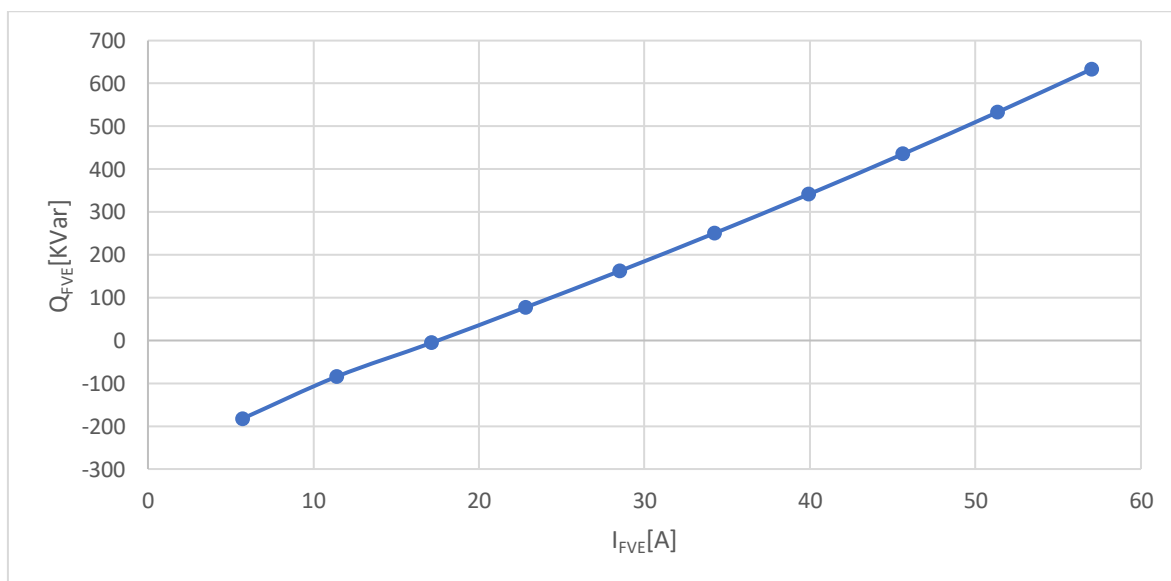
Obrázek 5.6 Dodávaný jalový výkon z FVE při  $\cos \varphi = 1$ .

Na obrázku 5.6 je znázorněn zmenšující se dodávaný jalový výkon z FVE od okamžiku, kdy do sítě dodáváme nulový činný výkon.

Tabulka 5.5 Hodnota výkonů pro  $\cos \varphi = 0,95$  induktiv. charakteru v předávacím místě

Úhel FVE [°]	$I_{FVE}$ [A]	$S_{FVE}$ [kVA]	$P_{FVE}$ [kW]	$Q_{FVE}$ [kVar]	$S_{sítě}$ [kVA]	$P_{sítě}$ [kW]	$Q_{sítě}$ [kVar]
0	0	0	0	0	224	-2	224
55,450	5,84	222	127	-183	131	125	39
12	11,4	436	428	-84	446	425	133
1,813	17,1	657	657	-6	684	653	203
-3,314	22,8	879	876	77	912	870	275
-6,330	28,5	1103	1091	162	1137	1083	345
-8,321	34,2	1329	1305	250	1359	1294	414
-9,737	39,9	1556	1518	341	1580	1504	483
-10,795	45,6	1785	1731	435	1800	1714	552
-11,616	51,3	2016	1944	533	2020	1923	621
-12,272	57	2248	2157	633	2240	2131	689

V tabulce 5.5 u proudu 17,1 A z FVE dodává elektrárna nejmenší jalový výkon o hodnotě 6 kVar, aby zajistila účinek  $\cos \varphi = 0,95$  induktivního charakteru v předávacím místě. Při hodnotě proudu vyšší než  $I_{FVE} = 17,1$  A začíná odebírat jalový výkon ze sítě, aby dosáhla požadovaného účinku.

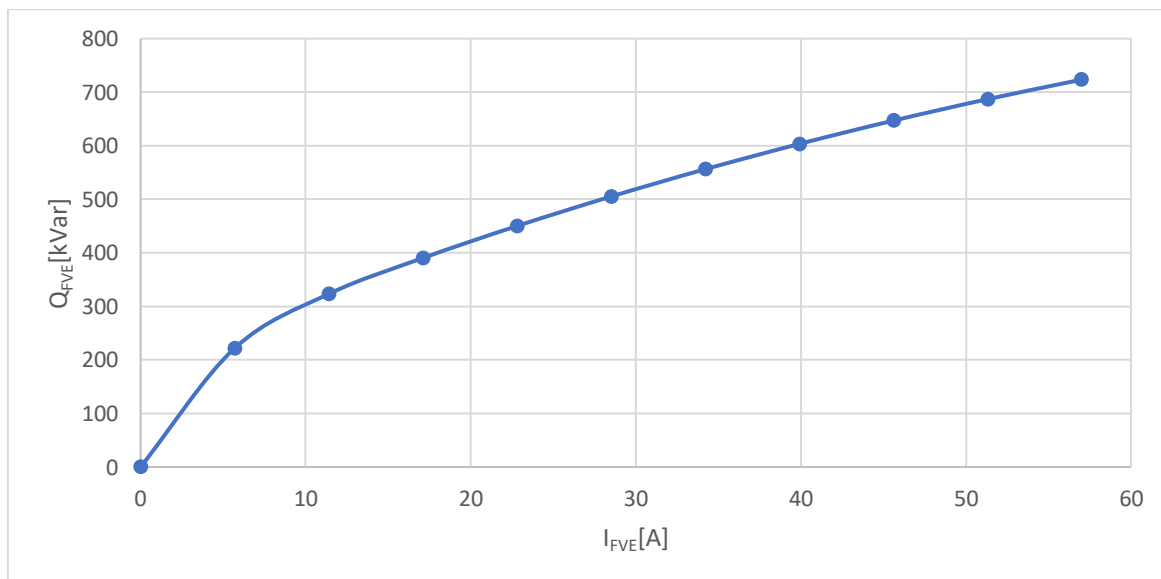
Obrázek 5.7: Dodávaný jalový výkon z FVE pro  $\cos \varphi = 0,95$  induk. charakteru.

Na obrázku 5.7 je znázorněn dodávaný jalový výkon z FVE od hodnoty proudu 5,84 A pro  $\cos \varphi = 0,95$  induktivního charakteru v předávacím místě sítě.

Tabulka 5.6 Hodnoty výkon. pro  $\cos \varphi = 0,95$  kapacit. charakteru v předávacím místě.

Úhel FVE [°]	$I_{FVE}$ [A]	$S_{FVE}$ [kVA]	$P_{FVE}$ [kW]	$Q_{FVE}$ [kVar]	$S_{sítě}$ [kVA]	$P_{sítě}$ [kW]	$Q_{sítě}$ [kVar]
0	0	0	0	0	224	-2	224
89,51	5,84	222	2	-222	0	0	0
49,0460	11,4	432	287	-323	304	284	-106
38,203	17,1	647	517	-390	544	513	-181
33,076	22,8	862	735	-450	773	730	-252
30,061	28,5	1076	950	-505	997	943	-323
28,0688	34,2	1290	1164	-556	1219	1155	-392
26,654	39,9	1503	1377	-603	1440	1365	-461
25,6	45,6	1716	1590	-647	1661	1574	-530
24,774	51,3	1929	1802	-687	1881	1783	-599
24,118	57	2141	2015	-723	2100	1992	-667

Z hodnot v tabulce 5.6 vyplývá, že při proudu 5,84 A z FVE je úhel roven téměř  $90^\circ$  stejně jako pro  $\cos \varphi = 1$ . To je zapříčiněno tím, že FVE dodává maximální výkon, který se rovná nabíjecímu výkonu a nemůže dále navyšovat výkon na účinník  $\cos \varphi = 0,95$  kapacitního charakteru.

Obrázek 5.8: Dodávaný jalový výkon pro  $\cos \varphi = 0,95$  kapacit. charakteru.

Na obrázku 5.8 je znázorněn dodávaný jalový výkon z FVE pro  $\cos \varphi = 0,95$  kapacitního charakteru v předávacím místě sítě.

## Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval připojováním obnovitelných zdrojů do distribuční sítě a řízením jejich provozu. Evropská směrnice 2009/28/ES o podpoře OZE stanovuje pro Českou republiku podíl OZE v roce 2030 na 22,5 % z celkové vyrobené energie. Důsledkem toho je cena za energii z obnovitelných zdrojů vyšší než její skutečná užitečná hodnota, protože je v rámci plnění cílů této směrnice je výkupní cena energie z obnovitelných zdrojů dotována. Nárůst počtu malých fotovoltaických elektráren připojených do distribuční sítě zapříčinil nutnost regulace malých výkonů, na což zareagovala evropská legislativa a do evropských směrnic RFG zahrnula i zdroje od 800 W výše. Provozovatelé distribučních soustav museli tato nařízení implementovat do svých pravidel distribuční sítě, jelikož směrnice RFG jsou nadřazeny PPDS. Vzhledem k pravděpodobnému budoucímu vývoji lze předpokládat, že se tato nařízení budou i nadále zpřísňovat.

Další část práce je zaměřena na způsob řízení napětí respektive jalového výkonu v uzlových bodech soustavy. Byly popsány také mechanismy podpůrných služeb elektrizační soustavy dle rychlosti dodání výkonu.

V poslední kapitole jsem se zabýval připojením konkrétní FVE elektrárny do distribuční sítě a jejím řízením s požadovaným účínkem v předávacím místě. Tato elektrárna měla výkon 2,2 MW. Nejdříve jsem si vypočítal náhradní prvky reprezentující vedení, transformátor, střídač a kompenzaci. Byly použity tři transformátory, každý o výkonu 800 kVA a tudíž také tři vedení. Výhodou použití tří transformátorů je možnost jejich odpojení v závislosti na dodávaném výkonu z FVE, což v důsledku může znamenat snížení provozních ztrát. Na fotovoltaické elektrárny jsou provozovateli distribuční sítě kladeny nároky z hlediska hodnoty účínku, který se musí pohybovat v hodnotách 0,95 až 1 induktivního nebo kapacitního charakteru. Pro účíník  $\cos \varphi = 1$  v předávacím místě jsem vypočítal nabíjecí kapacitní výkon FVE, který je roven 221,93 kVar. Z vypočtených hodnot v předchozí kapitole je tedy patrné, že pro hodnoty výkonu FVE menší než 2 kW je nutné připojit tlumivku, která kompenzuje výkon ze střídače a tím udržuje požadovanou hodnotu účínku  $\cos \varphi = 1$  v předávacím místě. Pro hodnoty proudu nad 5,84 A ztrácí tlumivka v tomto případě svou funkci, a proto je vhodné ji z obvodu odpojit.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TESAŘOVÁ, Miloslava. Přednášky Energetika 2 [online]. [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/ee2>
- [2] ZEMAN, Petr. *Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny – návrh lokální úpravy sítě vn.* Plzeň, 2013. Dostupné také z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/10064/1/Diplomova%20prace%20Petr%20Zeman.pdf>. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
- [3] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Výroční zpráva 2018* [online]. 2019 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c)
- [4] TOMEŠ, Martin. *KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V PRAXI.* Brno, 2012. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54659](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54659). Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Vedoucí práce Doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.
- [5] ČEZ DISTRIBUTUCE. *Provozní instrukce* [online]. 2018 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/distribucni\\_soustava/cezdistribuce\\_provozni-instrukce\\_0038r00\\_pozadavky-na-regulaci-vyroben.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/distribucni_soustava/cezdistribuce_provozni-instrukce_0038r00_pozadavky-na-regulaci-vyroben.pdf)
- [6] E.ON DISTRIBUTUCE: *Pravidla provozování distribuční soustavy* [online]. 2018 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2019-01/příloha%204%20Pravidla%20pro%20paralelní%20provoz%20výroben%20a%20akumulačních%20zařízení%20-11%202018.pdf>
- [7] GALETKA, Martin. *Přenosová soustava elektrické energie* [online]. 2016 [cit. 2020-10-06]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [8] HABRYCH, Richard. *Automatická sekundární regulace napětí.* Časopis Energetika 5/2015 [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: [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)

- [9] ŠROM, Jakub. *Kodex přenosové soustavy* [online]. 2009 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/12-srom.pdf>
- [10] NOHÁČ, Karel. *Řízení elektrizační soustavy* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf>
- [11] DVORSKÝ, Emil. *Měření regulace řízení ES* [online]. 2018 [cit. 2020-10-06]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/mr/o-predmetu.html>
- [12] Energetický regulační úřad. *Kodex přenosové soustavy* [online]. 2011 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/488335/castII\\_11\\_k\\_prip\\_rev2.pdf/09a76487-d49f-412f-9491-c43234fca325](https://www.eru.cz/documents/10540/488335/castII_11_k_prip_rev2.pdf/09a76487-d49f-412f-9491-c43234fca325)
- [13] ČEZ DISTRIBUCE, *Podniková norma energetiky* [online]. 2011 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [file:///D:/stažené%20soubory/PNE\\_33-3430-3-3.v-tisk.pdf](file:///D:/stažené%20soubory/PNE_33-3430-3-3.v-tisk.pdf)
- [14] MEJDA, František. *Individuální kompenzace jalového výkonu* [online]. 2009 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/individualni-kompenzace-jaloveho-vykonu--11095>
- [15] KBH ENERGY. *Kompenzace* [online]. 2018 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/o-kompenzaci/zaklady-kompenzace>
- [16] ČEZ DISTRIBUCE. *Pravidla provozování distribuční soustavy-příloha 7* [online]. 2011 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011\\_priloha-7.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-7.pdf)
- [17] ČEZ DISTRIBUCE. *Pravidla provozování distribuční soustavy-příloha 4* [online]. 2018 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018\\_priloha-4.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf)
- [18] ČEPS. *Požadavky na výrobní elektřiny* [online]. 2016 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>

- [19] OENERGETICE. *Podíl OZE v ČR* [online]. 2018 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/podil-oze-v-cr-se-musi-zvysit-na-225-aby-byl-dosazen-celoevropsky-cil-do-roku-2030>
- [20] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Podíl obnovitelných zdrojů energie* [online]. 2018 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2018/12/SHARES-2010-17.pdf>
- [21] WIKIPEDIA. *Watt peak* [online]. 2019 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Watt-peak>
- [22] E.ON DISTRIBUCE. *Co jsou to obnovitelné zdroje energie?* [online]. 2015 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/obnovitelne-zdroje-energie>
- [23] ČEPS. *Podpůrné služby* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby>
- [24] ČEPS. *Kodex přenosové soustavy* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY. [7].....	13
OBRÁZEK 2.1 PŘIPOJENÍ VÝROBNY DO DS. [6] .....	18
OBRÁZEK 2.2 SNÍŽENÍ ČINNÉHO VÝKONU PŘI PODFREKVENCÍ. [6] .....	20
OBRÁZEK 2.3 PROFIL SCHOPNOSTI VÝROBNÍCH MODULŮ PŘEKLENOUT PORUCHU. UPRAVENO Z [18] .....	21
OBRÁZEK 3.1 TROJÚHELNÍK VÝKONŮ. [4] .....	22
OBRÁZEK 3.2 ZÁVISLOST JALOVÉHO VÝKONU NA NAPĚTÍ. [6].....	23
OBRÁZEK 4.1 REGULÁTOR SE ZPĚTNOU VAZBOU. ....	26
OBRÁZEK 4.2 PRIMÁRNÍ, SEKUNDÁRNÍ A TERCIÁLNÍ REGULACE. [11].....	29
OBRÁZEK 4.3 ZMĚNA FREKVENCE PŘI ZMĚNĚ ZATÍŽENÍ ČI ZMĚNĚ VÝKONU ZDROJE. [9].....	30
OBRÁZEK 5.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU. ....	33
OBRÁZEK 5.2 OBVOD SE ZDROJEM DISTRIBUČNÍ SÍTĚ. ....	35
OBRÁZEK 5.3 OBVOD ZE STRANY FVE. ....	37
OBRÁZEK 5.4 ZÁVISLOST ZTRÁT NA PROUDU DODÁVANÉM FVE. ....	40
OBRÁZEK 5.5 ZÁVISLOST NAPĚTÍ FVE NA DODÁVANÉM PROUDU. ....	40
OBRÁZEK 5.6 DODÁVANÝ JALOVÝ VÝKON Z FVE PŘI $\cos \phi = 1$ . ....	41
OBRÁZEK 5.7: DODÁVANÝ JALOVÝ VÝKON Z FVE PRO $\cos \phi = 0,95$ INDUK. CHARAKTERU. ....	42
OBRÁZEK 5.8: DODÁVANÝ JALOVÝ VÝKON PRO $\cos \phi = 0,95$ KAPACIT. CHARAKTERU. ....	43

## Seznam Tabulek

TABULKA 2.1 DOBA, PO KTEROU MUSÍ VÝROBNA VYRÁBĚT ENERGIÍ PŘI ZMĚNĚ FREKVENCE. [17].....	19
TABULKA 5.1 PARAMETRY TRANSFORMÁTORU DOTEK 800H/20. ....	32
TABULKA 5.2 PARAMETRY KABELU. ....	34
TABULKA 5.3 HODNOTY VÝKONŮ PRO RŮZNÉ HODNOTY PROUDU PŘI STEJNÉ HODNOTĚ ÚHLU $0^\circ$ . ....	39
TABULKA 5.4 HODNOTA VÝKONŮ PRO $\cos \phi = 1$ V PŘEDÁVACÍM MÍSTĚ. ....	41
TABULKA 5.5 HODNOTA VÝKONŮ PRO $\cos \phi = 0,95$ INDUKTIV. CHARAKTERU V PŘEDÁVACÍM MÍSTĚ .....	42
TABULKA 5.6 HODNOTY VÝKON. PRO $\cos \phi = 0,95$ KAPACIT. CHARAKTERU V PŘEDÁVACÍM MÍSTĚ. ....	43



## Přílohy

### Příloha A – Tabulka výkonů pro úhel ze zdroje 0°

Úhel zdroje [°]	IFVE [A]	SFVE [kVA]	PFVE [kW]	QFVE [kVar]
0	0	0	0	0,000
0	5,84	218,597+1,539i	218,597	1,539
0	11,4	437,652+6,496i	437,652	6,496
0	17,1	657,166+14,871i	657,116	14,871
0	22,8	877,138+26,663i	877,138	26,663
0	28,5	1097,569+41,872i	1097,569	41,872
0	34,2	1318,458+60,499i	1318,458	60,499
0	39,9	1539,805+82,543i	1539,805	82,543
0	45,6	1761,611+108,004i	1761,611	108,004
0	51,3	1983,875+136,884i	1983,875	136,884
0	57	2206,598+169,18i	2206,598	169,18

Ssítě [kVA]	Psítě [kW]	Qsítě [kVar]
-2,075+223,67i	-2,075	223,670
216,292+223,839i	216,292	223,839
434,640+224,009i	434,640	224,009
653,028+224,178i	653,028	224,178
871,396+224,347i	871,396	224,347
1089,764+224,516i	1089,764	224,516
1308,131+224,686i	1308,131	224,686
1526,499+224,855i	1526,499	224,855
1744,867+225,024i	1744,867	225,0,24
1963,235+225,194i	1963,235	225,194
2181,603+225,363i	2181,603	225,363

**Příloha B – Tabulka výkonů pro  $\cos \varphi = 1$** 

Uhel zdroje [°]	IFVE [A]	SFVE [kVA]	PFVE [kW]	QFVE [kVar]
0	0	0	0	0
89,513	5,84	1,968-221,931i	1,968	-221,931
30,851	11,4	375,682-217,416i	375,682	-217,416
20,0083	17,1	617,452-209,246i	617,452	-209,246
14,88145	22,8	847,667-197,639i	847,667	-197,639
11,8655	28,5	1074,065-182,608i	1074,065	-182,608
9,87375	34,2	1298,876-164,157i	1298,876	-164,157
8,4585	39,9	1523004-142,286i	1523,004	-142,286
7,4005	45,6	1746,884-116,997i	1746,884	-116,997
6,57935	51,3	1970,757-88,289i	1970,757	-88,289
5,92344	57	2194,763-56,165i	2194,763	-56,165

Ssítě [kVA]	Psítě [kW]	Qsítě [kVar]
-2,075+223,67i	-2,075	223,67
0+0i	0	0
373,037+0i	373,037	0
613,661+0i	613,661	0
842,272+0i	842,272	0
1066,608+0i	1066,608	0
1288,898+0i	1288,898	0
1510,046+0i	1510,046	0
1730,489+0i	1730,489	0
1950,466+0i	1950,466	0
2170,117+0i	2170,117	0

**Příloha C – Tabulka pro  $\cos \varphi = 0,95$  induktivního charakteru**

Uhel zdroje [°]	IFVE [A]	SFVE [kVA]	PFVE [kW]	QFVE [kVar]
0	0	0	0,000	0,000
55,450	5,84	126,981-182,576i	126,981	-182,576
12	11,4	428,038-84,298i	428,038	-84,298
1,818	17,1	656,822-5,858	656,822	-5,858
-3,309	22,8	875,717+77,150i	875,717	77,150
-6,325	28,5	1091,006+162,247i	1091,006	162,247
-8,317	34,2	1304,811+250,126i	1304,811	250,126
-9,732	39,9	1517,987+341,068i	1517,987	341,068
-10,790	45,6	1730,952+435,208i	1730,952	435,208
-11,611	51,3	11943,932+532,621i	1943,932	532,621
-12,267	57	2157,063+633,349i	2157,063	633,349

Ssítě [kVA]	Psítě [kW]	Qsítě [kVar]
-2,075+223,670i	-2,075	223,670
124,951+39,496i	124,951	39,496
425,186+133,198i	425,186	133,198
652,715+203,448i	652,715	203,448
869,896+274,832i	869,896	274,832
1083,014+344,882i	1083,014	344,882
1294,190+414,292i	1294,190	414,292
1504,281+483,346i	1504,281	483,346
1713,701+552,180i	1713,701	552,180
1922,679+620,868i	1922,679	620,868
2131,348+689,455	2131,348	689,455

**Příloha D – tabulka pro  $\cos \varphi = 0,95$  kapacitního charakteru**

U <sub>hel</sub> zdroje [°]	IFVE [A]	SFVE [kVA]	PFVE [kW]	QFVE [kVar]
0	0	0	0	0
89,48	5,84	1,968-221,93i	21,968	-221,930
49,0505	11,4	286,92-323,225i	286,92	-323,225
38,208	17,1	516,542-390,171i	516,542	-390,171
33,081	22,8	735,216-449,931i	735,216	-449,931
30,065	28,5	950,289-504,931i	950,289	-504,931
28,0734	34,2	1163,878-555,874i	1163,878	-555,874
26,658	39,9	1376,84-603,04i	1376,84	-603,04
25,6	45,6	1589,592-646,567i	1589,592	-646,567
24,779	51,3	1802,359-686,53i	1802,359	-686,53
24,123	57	2015,276-722,975i	2015,276	-722,975

Ssítě [kVA]	Psítě [kW]	Qsítě [kVar]
-2,075+223,67i	-2,075	223,670
0+0i	0	0
284,439-105,946i	284,439	-105,946
513,032-181,081i	513,032	-181,081
730,213-252,465i	730,213	-252,465
943,331-322,514i	943,331	-322,514
1154,507-391,926i	1154,507	-391,926
1364,597-460,979i	1364,597	-460,979
1574,018-529,813i	1574,018	-529,813
1782,996-598,501i	1782,996	-598,501
1991,665-667,088i	1991,665	-667,088