

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**Diplomová práce**

**Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny – návrh lokální  
úpravy sítě vn**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr ZEMAN  
Osobní číslo: E11N0197P  
Studijní program: N2644 Aplikovaná elektrotechnika  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Název tématu: Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny - návrh lokální úpravy sítě vn  
Zadávatel katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

Diplomová práce "Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny - návrh lokální úpravy sítě vn" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte základní vlastnosti provozu uzlu sítě.
2. Zaznamenejte jakým způsobem se provádí kompenzace jalového výkonu a nabíjecího výkonu kabelového vedení.
3. Proveďte návrh s ohledem na minimalizaci ztrát.
4. Uvedené poznatky a návrh doložte na konkrétních případech.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Přednášky z předmětu OZE, Elektroenergetika II
2. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Dle uvážení a pokynů udá konzultant
3. Internetové podklady
4. Platné ČN a předpisy


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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013

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

L.S.

  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na problém při volbě transformátoru u fotovoltaických elektráren z hlediska kupní ceny a nákladů na provoz transformátoru během životnosti elektrárny. Dále řeší problémy týkající se kompenzace zvoleného transformátoru u zadané fotovoltaické elektrárny.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaická elektrárna, transformátor, kompenzace, vysoké napětí, přenosová soustava, distribuční soustava, účinník

## **Abstract**

This diploma thesis is focuses on the problem of the choice of transformer in photovoltaic power plants in terms of purchase price and operating costs over the life of the transformer. Also addresses issues relating to the compensation specified in the selected transformer photovoltaic power plants.

## **Key words**

Solar power plant, transformer, compensation, high voltage, transmission grid, distribution grid, power factor

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 5.5.2013

Petr Zeman

.....

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytla při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Františku Žákovi ze společnosti EGE, s.r.o. za poskytnutí podkladů k mé diplomové práci a za odborné rady k zadané problematice. Také bych chtěl poděkovat celému pedagogickému sboru Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni za získání odborných znalostí během mého studia.

## Obsah

Obsah .....	8
Úvod .....	10
Seznam symbolů .....	11
1 Elektrizační soustava v České republice .....	12
1.1 Části elektrizační soustavy .....	12
1.1.1 Elektrařenská soustava .....	13
1.1.2 Přenosová soustava .....	13
1.1.3 Distribuční soustava .....	13
1.2 Druhy elektrických vedení .....	14
1.2.1 Venkovní vedení .....	14
1.2.2 Kabelové vedení .....	15
2 Základní vlastnosti provozu uzlu sítě .....	17
2.1 Síť s izolovaným uzlem .....	18
2.2 Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku .....	19
2.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor .....	21
2.4 Síť s účinně uzemněným uzlem .....	21
3 Připojování zdrojů do distribuční soustavy .....	23
3.1 Pravidla provozování distribuční soustavy .....	23
3.2 Přihlašovací řízení .....	23
3.3 Studie připojitelnosti .....	24
3.3.1 Projektová dokumentace .....	24
3.4 Parametry zdrojů připojovaných do sítě vn .....	25
3.4.1 Požadavky na zdroje připojované do sítě vn .....	25
4 Řízení a regulace jalového výkonu .....	26
4.1 Spotřebiče jalového výkonu .....	26
4.2 Důsledky odběru výkonu se špatným účinníkem .....	27
4.3 Dělení kompenzačního zařízení .....	28
4.4 Zapojení statických kompenzátorů .....	29
4.5 Spínání statických kompenzátorů nn .....	30
4.6 Řízení účinníku a kompenzace jalového výkonu na FVE .....	31
4.6.1 Problémy s kompenzací u FVE .....	32
4.6.2 Vznik kapacitního jalového výkonu u FVE .....	32
4.6.3 Dekompenzace .....	33
5 Volba transformátoru na FVE .....	34
5.1 Ztráty na transformátoru .....	34
5.1.1 Ztráty naprázdno .....	34
5.1.2 Ztráty nakrátko .....	34



5.2 Výběr transformátoru .....	35
5.3 Výpočet ceny nákladů na provoz transformátoru za N let provozu .....	37
6 Kompenzace transformátoru .....	40
6.1 Popis situace .....	40
6.2 Náhradní schéma transformátoru .....	41
6.3 Postup výpočtu .....	41
6.4 Výpočet dodávaného výkonu .....	43
6.5 Výpočet kompenzačních výkonů .....	44
6.5.1 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos\varphi=1$ .....	44
6.5.2 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos\varphi=0,95$ a $\cos\varphi=0,97$ .....	45
6.5.3 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos\varphi=-0,95$ a $\cos\varphi=-0,97$ .....	45
6.6 Návrh způsobu kompenzace .....	49
Závěr .....	51
Seznam obrázků.....	52
Seznam tabulek.....	52
Seznam použité a citované literatury.....	54

## Úvod

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou fotovoltaických elektráren. Celá práce je rozdělena do šesti kapitol. V první kapitole popisují elektrizační soustavu v České republice, kde uvádím části elektrizační soustavy a dále je popisují. V druhé části první kapitoly jsem se zaměřil na druhy elektrických vedení a popsal jsem zde venkovní a kabelové vedení. Dále se v druhé kapitole zabývám vlastnostmi provozu uzlu sítě. V této části uvádím různé způsoby provozu uzlu sítě i s přiloženými obrázky. V další části práce, tj. ve třetí kapitole, jsem se zabýval stručným popisem problému připojování fotovoltaické elektrárny do distribuční soustavy. Jsou zde uvedeny limitní hodnoty, které provozovatel elektrárny musí před připojením a při provozu splnit. Ve čtvrté kapitole řeším problém s řízením a regulací jalového výkonu. Zde zaznamenávám spotřebiče jalového výkonu, jaké jsou důsledky odběru výkonu se špatným účínkem a dále zde rozdělují kompenzační zařízení. V další části této kapitoly uvádím problémy s kompenzací u fotovoltaické elektrárny. Uvádím zde, jak vzniká kapacitní jalový výkon a zabývám se zde dekompenzací. Pátá a šestá kapitola je zaměřena na samostatný výpočet zadaného problému. V páté kapitole ukazuji výhodnost koupě dražšího transformátoru s menšími ztrátami. Tyto výpočty jsem provedl pro zadanou fotovoltaickou elektrárnu a pro jedenáct různých transformátorů od různých výrobců. V poslední kapitole této diplomové práce počítám kompenzaci zvoleného transformátoru, který je umístěn na zadané fotovoltaické elektrárně. Tyto výpočty ukazují, jak transformátor v průběhu denního cyklu výroby mění účínek. Na konci této kapitoly jsem navrhl způsob kompenzace a dekompenzace tohoto transformátoru.

## Seznam symbolů

ES	elektrizační soustava
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
FVE	fotovoltaická elektrárna
C	kapacita
DS	distribuční soustava
ERU	Energetický regulační úřad
PS	přenosová soustava
$X_L$	induktivní reaktance [ $\Omega$ ]
R	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$\Delta P_0$	činné ztráty naprázdno [W]
$u_k$	napětí nakrátko [%]
$\Delta P_k$	činné ztráty nakrátko [W]
G	svod
$\cos \varphi$	účinník [-]
L	indukčnost
B	kapacitní susceptance

# 1 Elektrizační soustava v České republice

Elektrizační soustava (ES) je vzájemně propojený soubor zařízení zahrnující výrobu (elektrárny), zařízení pro přenos, transformaci a distribuci elektrické energie, systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a také spotřebiče elektrické energie. Úkolem ES je zásobovat v požadovaném množství místa spotřeby s co nejvyšší hospodárností a kvalitou. Části ES jsou spojeny pomocí vedení.

## 1.1 Části elektrizační soustavy

Elektrizační soustava se dělí do různých napěťových hladin.

- zvlášť vysoké napětí (zvn) – 400kV
- velmi vysoké napětí (vvn) – 220kV,  
110kV
- vysoké napětí (vn) – 35kV,  
22kV,  
15kV,  
10kV,  
6kV,  
3kV,  
1kV
- nízké napětí (nn) – 0,5kV,  
0,4kV

Uvedené hodnoty jsou jmenovité sdružené velikosti napětí třífázové soustavy. Napěťové hladiny mají různou oblast použití. S hladinami zvn a vvn se používají v přenosových soustavách. Napěťové hladiny 35 a 22kV a větší část hladiny 110kV jsou využívány v distribučních soustavách. S ostatními hladinami vysokého napětí se lze setkat například ve velkých průmyslových závodech nebo pro napájení menších obcí. V domácnostech pak využíváme napětí 400/230V, tj. 400V sdružené a 230V fázové napětí.[1]

### 1.1.1 Elektrárenská soustava

Do elektrárenské soustavy patří všechny zdroje elektrické energie (elektrárny). Jako zdroje elektrické energie se nejčastěji v České republice používají uhelné, jaderné, vodní a plynové (paroplynové) elektrárny. Současný trend je používat elektrárny, které využívají obnovitelné zdroje energie např. elektrárny na biomasu, solární (fotovoltaické) elektrárny a větrné elektrárny. U přímořských států se využívá i síly přílivu a odlivu a budují se zde přílivové elektrárny. Výkon z elektráren je přes blokové transformátory připojen do přenosové nebo rozvodné (distribuční) soustavy. [2]

### 1.1.2 Přenosová soustava

Základním úkolem přenosových soustav je propojení uzlů, do kterých je elektrická energie přiváděna z elektráren a uzlů, ze kterých je přenášena do distribučních soustav tak, aby rozložení výkonu bylo v celé oblasti optimální z hlediska nákladů na výrobu i přenos. Tato síť je vzhledem ke svému dominantnímu postavení nazývána přenosová (nadřazená) soustava. Přenosová soustava slouží pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. Propojuje všechny významné části ES. Je propojena s evropskou sítí UCTE. Připojují se sem všechny velké elektrárny. U nás jsou linky přenosové soustavy stavěny a provozovány na napěťové hladině 400kV a 220kV. Součástí PS jsou i některá vedení na hladině 110kV. Do této soustavy jsou připojeny velké bloky elektráren o výkonech v řádu stovek a více megawatt (MW). V České republice celou přenosovou soustavu spravuje společnost ČEPS, a.s. [2]

### 1.1.3 Distribuční soustava

Rozvodná (distribuční) soustava umožňuje přivedení elektrické energie ke koncovým uživatelům. Do těchto sítí jsou připojovány pouze výrobní zdroje malých výkonů do desítek MW. Jsou to malé průmyslové elektrárny, kogenerační jednotky a obnovitelné zdroje využívající energii vody, větru, biomasy, slunce. Základním zdrojem elektrické energie pro distribuční síť je nadřazená soustava. Soustava je provozována na hladinách 110kV, vn a nn.

## 1.2 Druhy elektrických vedení

Elektrické vedení představuje soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí určených pro přenos elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě, to znamená mezi jejími uzly. Elektrická vedení se dělí na kabelová a venkovní.

### 1.2.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení jsou složená z holých vodičů, které jsou nad zemí (terénem) vedeny pomocí vhodných stožárů a podpěrných izolátorů. Používá se zejména na hladinách zvn, vvn a nemalé části sítí vn popřípadě i nn. Používají se tam, kde je pro ně dostatek prostoru, a hlavně tam, kde není nadměrná hustota zastavěných obytných ploch. Při výstavbě nových rozvodných sítí jsou venkovní vedení preferována. Významnou roli při rozhodování o výstavbě nové rozvodné sítě hrají investiční náklady. Ty jsou u venkovních vedení v porovnání s vedením kabelovým značně nižší. Další výhodou venkovního vedení je jednodušší vyhledávání poruch. Ty jsou častější než u kabelového vedení, ale většinou se jedná o přechodné poruchy, které řeší automatika opětovného zapnutí. Popřípadě se jedná o jednofázové poruchy typu zemní spojení. Jako vodiče se nejčastěji používají AlFe lana, kde nosný drát (duše) je z oceli a dráty pláště jsou z hliníku.

Dle hladiny napětí se venkovní vedení dělí na:

#### **Vedení 400kV a 220kV**

Používá se v přenosové soustavě. Je tvořeno konstrukčně i provozně okružní sítí. V tomto případě se používají svazkové vodiče, tři vodiče na jednu fázi. Tím se dosáhne snížení ztrát korunou, snížení činných ztrát a zmenšení indukčnosti vedení.

#### **Vedení 110 kV**

Slouží k přenosu velkých výkonů z místa propojení s přenosovou soustavou do míst s velkou koncentrací odběrů. Délky těchto vedení mohou činit i několik desítek kilometrů. Tato vedení musí být vysoce spolehlivá. S tím souvisí jejich poměrně vysoké investiční a provozní náklady. Tato vedení bývají většinou dvojitá a provozují se jako okružní rozvod. Tvoří je holá ocelohliníková AlFe lana.

## Vedení vn

Využívají se pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, jako jsou obce, města a také do velkých závodů a výroben. Tato vedení jsou kratší než vedení vvn. Rovněž se u nich vyžaduje vysoká spolehlivost dodávky, ovšem ne tak velká, jaká je požadovaná u vedení 110 kV. Provozují se jako okružní i paprskové sítě. Pro vedení vn se používají ocelohliníkové vodiče ALFe, jednoduché izolované vodiče AFXz nebo SAX a slané izolované vodiče SAXKA nebo DISTRI.

## Vedení 400 V

Má omezené možnosti přenosu výkonu na určitou vzdálenost, která je limitovaná zejména úbytkem napětí na vedení. Pro tato vedení se používají obvykle holé vodiče ALFe, izolované vodiče nebo závěsné kabely.

### 1.2.2 Kabelová vedení

Kabelová vedení se uplatňují hlavně tam, kde nelze z prostorových, bezpečnostních nebo jiných důvodů (silná námrazová oblast, chemicky agresivní prostředí) použít vedení venkovní. Pořizovací náklady kabelových vedení jsou oproti venkovním vedením podstatně vyšší. Na kabelových vedeních dochází také k výrazně menšímu počtu poruch, které jsou však často trvalého charakteru. Ve srovnání s venkovním vedením mají mnohonásobně vyšší kapacitu. U kabelů se věnuje větší pozornost nabíjecímu proudu a výkonu při malém zatížení. Velikost nabíjecího proudu je převážně dána provozní kapacitou vedení. Platí následující vztahy pro nabíjecí proud a nabíjecí výkon:

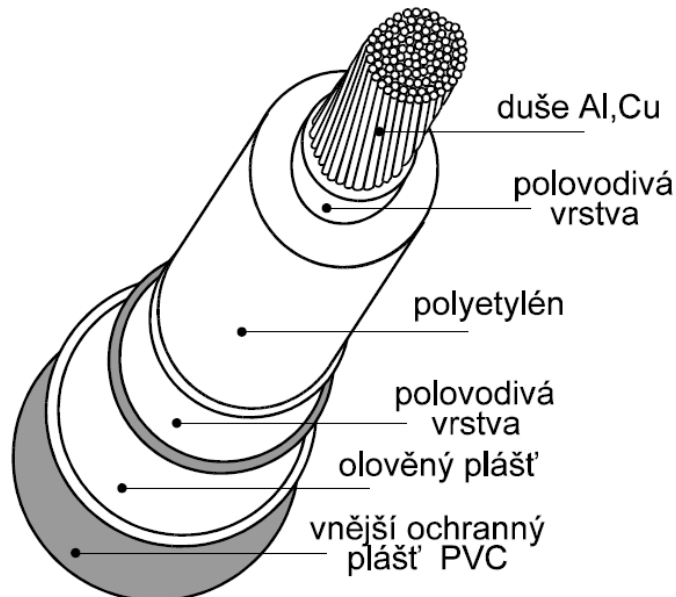
$$I_{nab} = I_C = \omega \cdot C \cdot U_f [A] \quad (1-1)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_C = 3 \cdot U_f \cdot I_C [VAr] \quad (1-2)$$

## Kabely vvn

Díky zvyšování spotřeby elektrické energie ve velkých městech i v průmyslu je kladen nárok na přenos elektrické energie až do centra spotřeby při co největším napětí. V současné době už není postačující rozvod vn. Rozvodnou síť nelze řešit v městských a průmyslových lokalitách venkovními vedeními, je proto nutné použití kabelů.

Používají se převážně kabely s polyetylenovou izolací v jednožilovém provedení. Duše bývá z hliníku nebo mědi a její průřez může dosáhnout až  $1300\text{mm}^2$ . Jakmile průřez přesáhne  $630\text{mm}^2$ , skládá se duše ze segmentů lehce navzájem odizolovaných. To má za cíl prakticky vyloučit ztráty vznikající vlivem efektu přiblížení. Na duši je vylisováno vodivé pouzdro, které má vyloučit vliv pramenů a také zabránit ionizaci vzduchu na povrchu duše. Vodivé pouzdro je vylisováno také na izolačním obalu z polyetylénu. Izolační obal polyetylénu je tedy uložen mezi dvěma vodivými pouzdry. Na vnějším vodivém pouzdru je kovový kryt, který tvoří měděná vlákna nebo pásy, popřípadě olověné pouzdro. Vnější ochranu kabelu zabezpečuje pouzdro z polyvinylchloridu, které vzdoruje stárnutí. Umístění kabelového vedení vvn je realizováno převážně v kolektorech. Málokdy je možné využít instalaci kabelového vedení vvn ve volném terénu. [3]



Obr. 1.1 Řez polyetylenovým kabelem vvn



### **Kabely vn**

Jsou zastoupeny v kabelových rozvodech velkých měst. Nejčastěji se provozují jako okružní nebo paprsková síť. Jsou na ně kladeny velké nároky, co se týče pronikání vlhkosti. Mezi nejčastěji používané kabely patří tyto typy: AXEKCY, AXEKVCEY, CXEKVCY a CXEKVCEY. V sítích vn se stále v nemalé míře vyskytují i olejové kabely.

### **Kabely nn**

Slouží k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až do rozvodné skříně spotřebitele. Doposud se v distribuční soustavě nejčastěji používala kabelová vedení typu 1-AYKY-J (A - hliníkové jádro, Y - PVC izolace žil, K - kabel, Y - plášť PVC, J - zelenožlutá žila).

## **2 Základní vlastnosti provozu uzlu sítě**

Uzel sítě je spojení vinutí transformátoru se zemí. Z hlediska technicko-ekonomického je způsob spojení uzlu se zemí jedním z velmi důležitých ukazatelů. Způsob spojení uzlu má vliv na velikost proudu při spojení jedné nebo více fází se zemí, dále ovlivňuje velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí. Velikost napětí mezi vodičem a zemí nám také klade nárok na druh izolace. [1]

Podle způsobu spojení uzlu transformátoru se zemí se v praxi soustava dělí na:

- Síť s izolovaným uzlem
- Síť s nepřímo uzemněným uzlem
  - Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku
  - Síť s uzlem uzemněným přes rezistor
- Síť s přímo uzemněným uzlem

Podle způsobu provozu uzlu sítě se dělí zemní poruchy na dva druhy:

### **Zemní spojení**

Vzniká při spojení jedné fáze se zemí. Při poruše lze síť dále provozovat, ale musí být dimenzována na sdružené napětí. Místem spojení teče proud kapacitního charakteru, velikost závisí na činném odporu.

### **Zemní zkrat**

Zkrat mezi vodičem vedení a zemí v síti s účinně uzemněným uzlem nebo s uzlem uzemněným přes impedanci (ale musí být dostatečně malá).

## **2.1 Síť s izolovaným uzlem**

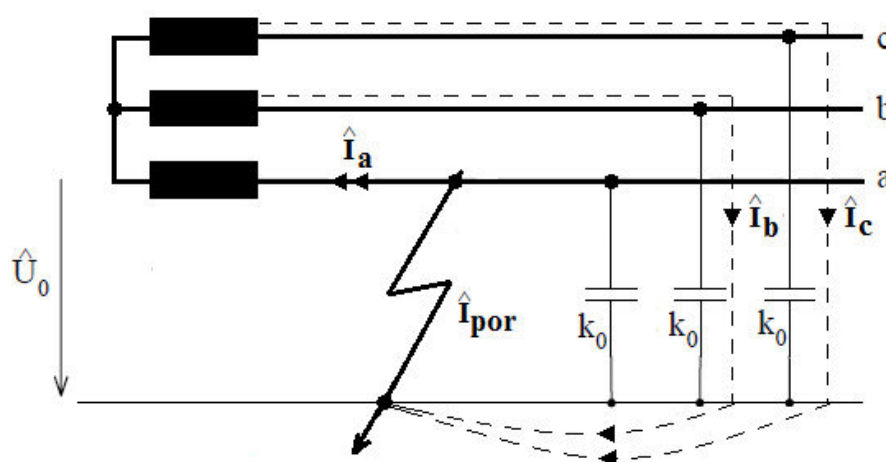
U těchto sítí nejsou mezi uzlem a zemí ani mezi fázemi a zemí zapojeny žádné impedance. Výjimkou jsou jednofázové přístrojové transformátory napětí, síťové kapacity proti zemi a svodové odpory vedení. Ve zdravé síti jsou kapacity fází jednotlivých vedení proti zemi i svodové odpory přibližně symetrické a při napájení ze symetrického zdroje jsou i napětí fází proti zemi stejně velká a uzel má proti zemi prakticky nulové napětí. Stejně velké jsou i proudy síťových kapacit proti zemi v jednotlivých fázích a vzhledem k jejich posunutí o 120 stupňů je jejich součet nulový.

Při poruše se symetrie impedancí proti zemi, a tím i napětí proti zemi, poruší. Ke změně dojde i u velikostí kapacitních proudů v jednotlivých fázích. Místem poruchy teče do země proud, který se vrací přes kapacity zdravých fází a přes napájecí transformátor.

Pro zemní spojení s malým přechodovým odporem ( $R_p \rightarrow 0$ , kovové zemní spojení) platí, že napětí uzlu proti zemi se rovná fázovému napětí, tedy  $U_0 = U_f$  a poruchový proud má kapacitní charakter ( $C_0$  je kapacita proti zemi jedné fáze uvažované celkové délky sítě, tj. délky všech vedení připojených k příslušnému uzlu) a jeho velikost se tedy označuje jako kapacitní proud sítě  $I_{kap}$  a je i měřítkem pro volbu způsobu provozu uzlu (z hlediska neúčinného uzemnění). [3]

$$\bar{I}_{por} = j3\omega \cdot C_0 \cdot \bar{U}_f \quad (2-1)$$

Velikost kapacitních proudů u sítí se určuje obvykle výpočtově podle délky jejich vedení a měrných velikostí kapacitních proudů. U kabelových vedení jsou měrné kapacity mnohonásobně vyšší než u venkovních vedení. Používání izolovaného uzlu je omezeno na malé sítě. Norma připouští mezní rozsah 20 A kapacitního proudu, od rozsahu 10 A již doporučuje kompenzaci zemních kapacitních proudů. Výhodou sítí s izolovaným uzlem je jednoznačné vyhodnocení vývodu se zemním spojením a možnost provozování sítě se zemním spojením po dobu vyhledání poruchy.



Obr. 2.1 Síť s izolovaným uzlem při poruše

## 2.2 Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku

Při spojení uzlu sítě se zemí přes zhašecí tlumivku, a při nesymetrii fázových napětí proti zemi, protéká zhašecí tlumivkou proud, který má induktivní charakter. Vhodnou velikostí indukčnosti zhašecí tlumivky její proud snižuje výsledný proud místem zemní poruchy při zemní poruše, kompenzuje součet proudů fázových kapacit  $C$ . Výsledný poruchový proud má složku danou rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhašecí tlumivky. Zhašecí tlumivka se používá v sítích, kde převažuje venkovní vedení.

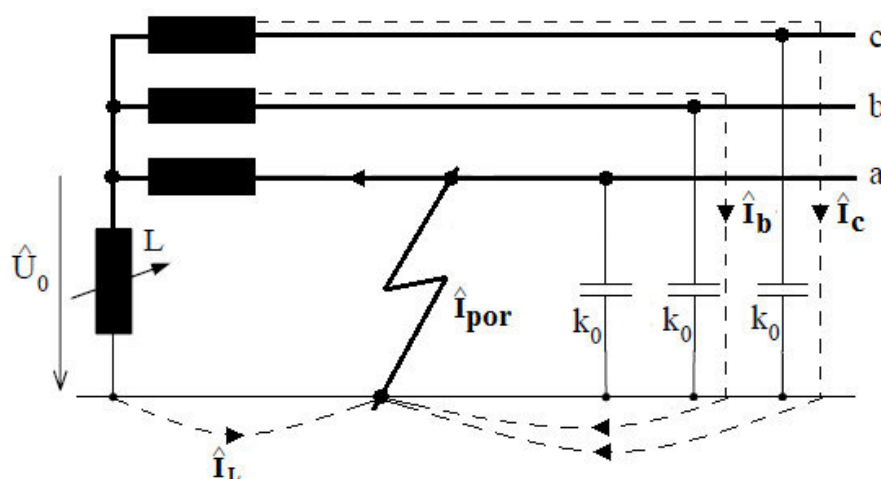
Poruchový proud je u dobře vyladěné kompenzované sítě mnohem nižší než kapacitní proud sítě. U obloukových zemních poruch jsou tím výrazně zlepšeny podmínky pro jejich samozhášení, oblouk se přerušuje bez znovuzápalů. Pro  $R_p = 0$  je  $U_0 = U_f$ .

Pro proud v místě poruchy pak platí:

$$\bar{I}_{por} = \bar{U}_f \cdot j \cdot \left( 3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega \cdot L} \right) \quad (2-3)$$

Tento vztah též vyjadřuje základní funkci zhášecí tlumivky, tj. snižování proudu místem zemního spojení kompenzací zemních kapacitních proudů. Pro  $I_{kap} = I_L$  má poruchový proud nejmenší velikost danou ztrátami ve zhášecí tlumivce a svodovými odpory sítě, které nebyly uvažovány. V praxi se však  $I_{kap}$  nerovná  $I_L$ , neladí se úplně do 0, ale s 1% rozladěním, aby se dalo identifikovat zemní spojení.

Sítě s kompenzovaným uzlem se používají u venkovních sítí vn s kapacitním proudem větším než 10 A. Jejich nevýhodou jsou náklady na zhášecí tlumivku a automatiku ladění. Pro docílení příznivých účinků kompenzace na samozhášení poruch je zapotřebí udržovat vyladěný stav sítě. Výhodou je možnost provozu se zemním spojením.[3]



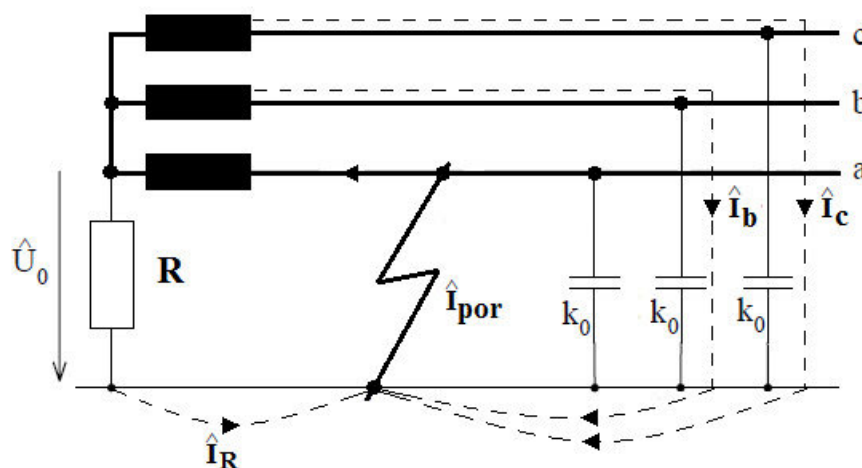
Obr. 2.2 Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku při poruše

## 2.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor

U kabelových sítí vn se výhody kompenzace zemních kapacitních proudů neprojevují tak jednoznačně jako u sítí venkovních. Většina poruch je trvalá, takže se zmenšení poruchového proudu nemůže projevit v „samozhášení“ poruch jako při obloukových poruchách u venkovních vedení. Zhášecí tlumivka neomezuje přepětí při vzniku zemních spojení, provoz při zemním spojení namáhá izolaci zdravých fází zvýšeným napětím a přináší riziko vícenásobných poruch.

Z těchto důvodů se v kabelových sítích používá uzemnění uzlu přes rezistanci. Jeho velikost se volí tak, aby omezoval proudy zemních poruch na hodnoty přijatelné s ohledem na účinky poruchových proudů, ale přitom zabezpečoval tlumení přepětí při zemních poruchách a umožňoval použití jednoduchých zemních ochran.

$$\frac{U_f}{R} \geq 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0 \Rightarrow R \leq \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0} \quad (2-4)$$



Obr. 2.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor při poruše

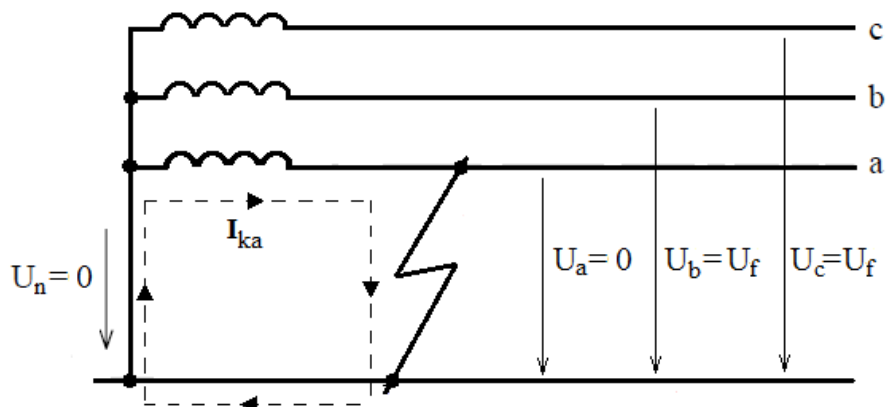
## 2.4 Síť s účinně uzemněným uzlem

Přímo uzemněný uzel se používá v přenosových soustavách 400 kV i 220 kV, v distribučních sítích 110 kV a v sítích nn (třífázové obvody), kde má uzemnění uzlu také význam pro jednofázové rozvody. Na všech těchto napětěových úrovních jsou uzly vinutí transformátoru spojeny přímo se zemí nebo přes malou impedanci. Napětí uzlů vinutí transformátorů zůstává vůči zemi prakticky nulové a napětí zdravých fází zůstává na fázové

hodnotě. Z tohoto důvodu jsou vedení dimenzována na jmenovitá fázová napětí, při provozu získáváme nižší hodnoty přepětí. To je z ekonomického hlediska velmi výhodné, díky tomu máme nižší nároky na izolaci. Další výhodou je jednoznačné vyhodnocení vzniku poruchy, která se projevuje poklesem napětí a zvýšením proudu v porušené fázi. Možné je u sítě vvn použít jednofázový OZ (musí být vybavena vypínači se samostatně ovládanými póly).

Mezi nevýhody se řadí velké hodnoty poruchových proudů, které vedou k nebezpečným hodnotám dotkových a krokových napětí. Z tohoto důvodu se tato síť během poruchy nesmí dále provozovat, musí dojít k okamžitému vypnutí.

Vzhledem k tomu, že velikost zkratové impedance závisí na místě zkratu v dané síti, bude i velikost zkratového proudu závislá na místu vzniku zkratu. Čím blíže ke zdroji vznikne zkrat, tím bude větší zkratový proud v daném místě.[3]



Obr. 2.4 Jednofázový zkrat

### 3. Připojování zdrojů do Distribuční Soustavy

Pro připojování zdrojů do sítí vn nebo i nn slouží Pravidla pro provozování distribučních soustav (PPDS), zejména pak příloha č.4 specifikující pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele DS. Soubor těchto pravidel si zpracovávají samotní provozovatelé distribučních soustav na základě vyhlášky č.401/2010 Sb., která také popisuje obsahové náležitosti PPDS. Dále je předkládají ke schválení Energetickému regulačnímu úřadu (ERU). Mezi náležitosti přihlašovacího řízení patří např. žádost o připojení, posouzení žádosti o připojení, studie připojitelnosti, a další dokumenty.

#### 3.1 Pravidla provozování distribuční soustavy

Dokument je tedy zpracován samotným provozovatelem distribuční soustavy. Účelem je vypracovat a zveřejnit předpisy stanovující minimální technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatele k DS a pro její užívání. Uživateli DS v rámci PPDS jsou provozovatelé přenosové soustavy (PPS), provozovatelé sousedních nebo lokálních distribučních soustav, výrobci elektrické energie a obchodníci s elektrickou energií. PPDS navazují na Pravidla provozování přenosové soustavy (PPPS) tak, aby společně zajistily průhledné podmínky pro rozvoj a spolehlivý provoz elektrizační soustavy ČR a dodávky elektrické energie v potřebné kvalitě. Cílem je, aby se provozovatel i každý uživatel DS spravedlivě podílel na udržování sítě v dobrých provozních podmínkách, zabránění vzniku poruch nebo omezení jejich šíření dále do soustavy.[7]

#### 3.2 Přihlašovací řízení

Aby se výrobná mohla přihlásit, je nutné předat žádost o připojení dle vyhlášky č.51/2006 Sb. provozovateli DS. Také se musí přiložit dotazník s technickými údaji o zařízení. Lhůta pro rozhodnutí o připojení zdroje do napěťové hladiny vn je 60 dní od podání úplné žádosti o připojení nebo ode dne předání studie připojitelnosti. Nejsou-li dány důvody stanovené energetickým zákonem, pro které nelze zařízení žadatele připojit k distribuční soustavě, PDS předloží žadateli návrh smlouvy o připojení nebo návrh smlouvy o budoucím připojení výrobní. Přílohou smlouvy jsou stanovené technické podmínky pro připojení výrobní k DS.

Nelze-li zařízení žadatele připojit z důvodů stanovených energetickým zákonem, PDS tuto skutečnost sdělí žadateli písemnou formou do 30-ti dnů od podání žádosti o připojení i předložení studie připojitelnosti.[8][9]

### 3.3 Studie připojitelnosti

Studie připojitelnosti je hlavní součástí tzv. přihlašovacího řízení. U výroben s instalovaným výkonem do 30kW připojovaných do sítí nn se tato studie nevyžaduje. Při žádosti o připojení je třeba přiložit dokumenty, které jsou uvedeny v pravidlech provozu distribuční soustavy. Jedním z nejzákladnějších dokumentů je žádost o připojení, která se předloží provozovateli DS. Další dokumenty, které jsou součástí smlouvy, se uvádějí v pravidlech pro paralelní provoz zdrojů provozovatele distribuční soustavy v příloze č.4. K žádosti o připojení výroby do sítě se musí provozovatel vyjádřit ve smyslu zda-li je potřeba ověřit připojitelnost studií či nikoliv. Záleží na charakteru výroby a hlavně návrhu přípojného místa. Platí, že u menších výroben (malé FVE připojované k síti nn) není studie připojitelnosti zapotřebí.

Rozsah studie záleží na daných podmínkách PDS i na regionu, ve kterém se výroba připojuje. V případě připojování do sítě vn je rozsah dán stanicí s napájecím transformátorem a vedením, na kterém je místo připojení do sítě od příslušného PDS.

#### 3.3.1 Projektová dokumentace

Projektová dokumentace vychází z vyhlášky 499/2006 Sb. V tomto dokumentu je zaznamenána celková problematika pro vyvedení výkonu z výroby. Rozumíme tím hlavně návrh parametrů vedení (délka, typ, průřez) mezi výrobnou a místem připojení k DS, jsou zde také uvedeny parametry transformátorů a také možné řešení připojení výroby k distribuční síti. Jsou zde uvedeny i parametry a navržené hodnoty elektrických ochran, které souvisí s DS, implementace obchodního měření nebo také údaje pro dálkové přenosy pomocí komunikačních tras mezi PDS a zařízením žadatele o připojení.



### 3.4 Parametry zdrojů připojovaných do sítě vn

Zdroje, které slouží pro připojení do sítě, musí být při dodávce činného výkonu  $P$  vybaveny pro některý z následujících režimů řízení jalového výkonu v předacím místě a to dodržovat hodnoty stanovené normou PPDS. Musí udržovat pevné hodnoty zadaného účinníku  $\cos \varphi$  a udržovat hodnoty účinníku  $\cos \varphi = f(P)$ . Dále musí udržovat zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagram) a v neposlední řadě udržovat napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu DS) v rámci omezení daných PQ diagramem stroje.[7][10]

#### 3.4.1 Požadavky na zdroje připojované do sítě vn

Pro paralelní provoz zdrojů se sítí vn nebo nn se zaměřuje příloha č.4 z Pravidel pro provozování distribučních soustav (PPDS).

Výrobná musí být schopna dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí účinníku 0,85 až 1 při dodávce jalového výkonu a 1 až 0,95 při odběru jalového výkonu, a to při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru 5% z jmenovitého napětí a při frekvenci v rozmezí 48,5 až 50,5Hz. Tento základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu může být modifikován, zúžen nebo rozšířen. Hlavním důvodem této případné modifikace bývá např. odlišná potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě DS, nebo zvláštní technologické důvody např. u FVE. U takové modifikace se uzavírá zvláštní dohoda mezi provozovatelem výrobní a PDS. Parametry u fotovoltaických elektráren, kde se předpokládá jako postačující rozsah účinníků nižší, a to v hodnotách účinníku 0,95 až 1 při dodávce jalového výkonu a 1 až 0,95 pro odběr jalového výkonu. Při nižších hodnotách činného výkonu se dovolené hodnoty jalového výkonu zjistí podle tzv. „Provozních diagramů“, které musí být součástí provozně-technické dokumentace zdroje.[10]

U kompenzačního zařízení zdrojů je zapotřebí přihlížet ke způsobu provozu vlastní výrobní, proto se sledují zpětné vlivy na napájecí síť. Při silně kolísajícím výkonu pohonu musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a rychle regulována. Kompenzační kondenzátory nesmějí být připínány před zapnutím generátoru. Při vypínání generátoru musí být odpojeny současně.[10]

## 4. Řízení a regulace jalového výkonu

Řada elektrických spotřebičů provozovaných v elektrické síti odebírá kromě činného výkonu také výkon jalový, ve většině případů induktivního charakteru. Zanedbáme-li další složky výkonu (deformační, pulzační a skrytý), můžeme definovat účinník odběru jako poměr výkonu činného  $P$  a zdánlivého  $S$ , tj.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (4.1)$$

Činný výkon je definován

$$P = S \cdot \cos\varphi, \quad (4.2)$$

jalový výkon

$$Q = S \cdot \sin\varphi. \quad (4.3)$$

Kompenzací jalového výkonu pak rozumíme snížení odběru induktivního jalového výkonu pomocí dodatečných technických opatření na předepsanou hodnotu, tj. požadovaný účinník v rozmezí  $\cos\varphi = 0,95-1$ .

### 4.1 Spotřebiče jalového výkonu

#### *Asynchronní motory*

Asynchronní motory jsou jedním z rozhodujících spotřebičů jalového induktivního výkonu potřebného k vytvoření točivého magnetického pole statoru a k pokrytí rozptylového magnetického toku. Štítkový údaj účinníku se vztahuje ke jmenovitému zatížení, hodnota závisí na konstrukci motoru. Podstatné je zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru, zvláště při chodu naprázdno (60-70% příkonu motoru při plném zatížení).

#### *Asynchronní generátory*

Asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro vytvoření magnetického pole.

#### *Transformátory*

Celkový odebíraný jalový výkon  $Q$  je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno  $Q_0$ , který je asi 1-3,5% jmenovitého výkonu transformátoru a z proměnného jalového výkonu pro pokrytí rozptylového magnetického toku. Hodnota účinníku při chodu transformátoru

naprázdno je velmi malá,  $\cos\varphi_0 = 0,1-0,2$ , tj. čistě jalové zatížení. Proto se vyžaduje kompenzace jalového proudu naprázdno transformátorů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru. Při průměrném zatížení 70% se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje 4-6% jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru.[12]

### ***Výkonové polovodičové měniče***

Jedná se o řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem, přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače apod. Různé typy měničů se z hlediska odběru jalového výkonu liší, např. řízený polovodičový usměrňovač pro řízení ss motorů pracuje s účínkem  $\cos\varphi = 0,5$  i horším, avšak střídač s neřízeným usměrňovačem na vstupu a ss napět'ovým meziobvodem s šířkovou pulsní regulací napětí pro řízení otáček asynchronního motoru může pracovat s účínkem  $\cos\varphi = 0,95$  apod.

### ***Venkvní a kabelová vedení***

Vedení spotřebují poměrně málo jalové energie, a to vlivem své indukčnosti a kapacity. U venkovních vedení (pod 200km mezi rozvodnami) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbatelná. U kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity (kapacita roste, čím větší je průřez žil). Tato vlastnost kabelových sítí může vést při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních (tj. trvale překompenzovaných) k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích VN.

### ***Ostatní spotřebiče jalového výkonu***

Jedná se zejména o výbojková a zářivková svítidla, svařovací transformátory, reaktory pro omezení zkratových proudů apod.[12]

## **4.2 Důsledky odběru výkonu se špatným účínkem**

Následkem špatného účínku je v elektrizační soustavě nutný přenos činného i jalového výkonu, tj. tzv. zdánlivého výkonu, který je větší než potřebný výkon činný.

*Tento zdánlivý výkon ve svém důsledku způsobuje:*

- **zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy**, tj. vedení, transformátory, elektrické rozvodny apod. musí být dimenzovány na velikost zdánlivého proudu, který je  $1/\cos\varphi$  krát větší než proud činný,

- **snížení využití generátorů** - jalový induktivní proud odběru zeslabuje buzení generátoru a je třeba zvýšit budící proud, tím dochází ke zvětšení tepelných ztrát v rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. Opačná situace vzniká při překompenzování v odlehčené síti, neboť značně odbuzený stroj by mohl vypadnout ze synchronismu a způsobit zvýšení horní přípustné hodnoty napětí,
- **zvýšení tepelných ztrát** v ohmických odporech prvků el. soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, tj. rostou s druhou mocninou převrácené hodnoty účinnosti (např. při  $\cos\varphi = 0,7$  jsou dvakrát větší než při  $\cos\varphi = 1$ ),
- **zvětšení úbytku napětí v síti** způsobený zdánlivým proudem  $I$  s fázovým posunem  $\varphi$  na impedanci sítě, tj. na činném odporu  $R$  a reaktanci  $X$  je  $\Delta U = RI \cos\varphi + XI \sin\varphi$ ,
- **zhoršení zkratových poměrů v síti** způsobené zvýšením buzení generátorů, tj. dochází ke zvětšení nárazového zkratového proudu a nesymetrické ss složky a v důsledku toho ke zhoršení vypínacích podmínek a namáhání vypínačů.[12]

### 4.3 Dělení kompenzačního zařízení

#### *podle principu činnosti*

- rotační (synchronní kompenzátor)
- statické (kondenzátor připojený přímo na síť nebo hrazený tlumivkou, kompenzační filtr tvořený sérioparalelním zapojením L – C, příp. i rezistorů)
- polovodičové (např. proudový měnič s nucenou komutací a kondenzátorem ve ss obvodu –viz. aktivní filtry)

#### *podle způsobu regulace*

- kompenzátory s konstantním výkonem, tj. neregulované kondenzátorové baterie nebo kompenzační filtry spínané samostatným spínačem nebo společně s kompenzovaným spotřebičem
- kompenzátory se stupňovitou regulací, tzn. samostatně spínané kondenzátory pomocí stykačů nn (speciální stykače pro spínání kapacit) ovládaných regulátorem účinnosti nebo bezkontaktních polovodičových spínačů (pro vn pomocí vakuových vypínačů nebo stykačů)
- kompenzátory s plynulou regulací, jedná se o synchronní kompenzátory, statické kompenzátory (popř. s filtry jednotlivých harmonických) doplněné paralelně připojenou dekompenzační fázově řízenou tlumivkou (TCR+FC), dále se jedná o polovodičové kompenzátory

- aktivní filtry – nový technický prostředek umožňující eliminovat energetické rušení, zejména kolísání napětí v provozech s výraznými dynamickými odběry jalového výkonu a současně snižovat obsah harmonických. V principu se jedná o sériově nebo paralelně zapojené generátory proudu či napětí tvořené můstkovým zapojením polovodičových spínačů.

#### ***podle umístění kompenzátoru***

- individuální, kdy je kondenzátor připojen přímo na svorkách spotřebiče jalového výkonu nebo je společně s ním připínán k síti samostatným stykačem (vhodné pro velké motory, které pracují delší dobu nebo trvale) – nutná vhodná volba kompenzačního výkonu, nebezpečí samobuzení a přepětových jevů
- skupinová, kdy je regulovaný kompenzátor připojen na přípojnicích rozvaděče skupiny spotřebičů, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší
- centrální, regulovaný kompenzátor je připojen na přípojnice vstupní trafostanice, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon opět menší
- smíšená, tj. kombinace dříve uvedených způsobů[12]

## **4.4 Zapojení statických kompenzátorů**

### ***Nehrazená kondenzátorová baterie***

Je převážně používána v síti s výskytem harmonických, může však docházet k rezonancím s indukčností sítě a ohrožení kondenzátoru i paralelně připojených spotřebičů, není omezena velikost nabíjecího proudu při připnutí k síti. Měrné ztráty jsou max. 0,5W/kVAr.

### ***Hrazená kondenzátorová baterie***

Tvořena sériovou kombinací tlumivky a kondenzátoru, obvod je laděn na rezonanční kmitočet, na kterém se v síti nevyskytují harmonické a hradící účinek tlumivky zabraňuje rezonančním jevům v síti. Měrné ztráty jsou vyšší - max. 5,5 až 7W/kVAr. Kondenzátory nutno dimenzovat na vyšší hladinu napětí, neboť vlivem tlumivky dochází ke zvýšení napětí na kondenzátoru.

### ***Tyristorově řízená tlumivka + pevná kondenzátorová baterie (TCR+FC)***

Zdrojem kapacitního výkonu je soustava paralelně řazených kompenzačních filtrů. Proud paralelně zapojené dekompenzační tlumivky, která odebírá ze sítě jalový induktivní výkon, je regulován fázově řízeným měničem. Výhodou zapojení je plynulá a rychlá regulace kompenzačního výkonu (doba odezvy je 2-10ms). Používá se v sítích nn i vn s použitím speciálního regulátoru pro kompenzování i nesymetrických odběrů.[12]

## **4.5 Spínání statických kompenzátorů NN**

### ***Stykač***

Přechodný proudový děj při spínání kondenzátoru není omezen, závisí na zkratových poměrech v síti, na impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Amplituda nabíjecího proudu jednoho připínaného stupně při zkratovém proudu 10-50kA bývá 200 až 1200A, amplituda nabíjecího proudu dalšího připínaného stupně, kdy je v chodu podstatná část kondenzátorů kompenzačního zařízení, je omezena pouze impedancí vodičů uvnitř rozvaděče bývá 1300-2500A. Stykače pro třídu AC3 dovolují proudové přetížení do výše 10-ti násobku jmenovitého proudu, tj. prakticky do 250 až 1000A, elektrická životnost zařízení je malá (běžně 104 sepnutí při 400V). Proudový ráz při spínání nutno omezit na přijatelnou hodnotu zvýšením impedance přívodů ke kondenzátorům, tj. např. vzduchovou tlumivkou nebo odporem.

### ***Stykač pro spínání kondenzátorů (odporové spínání)***

V současné době je na našem trhu několik typů speciálních stykačů pro spínání kapacit s odporovým omezením nabíjecího proudu kondenzátoru. Spínání probíhá postupně, nejdříve přes odpor pomocí předstihového kontaktu a po odeznění přechodného děje hlavní kontakt přebírá ustálenou hodnotu proudu kondenzátoru.

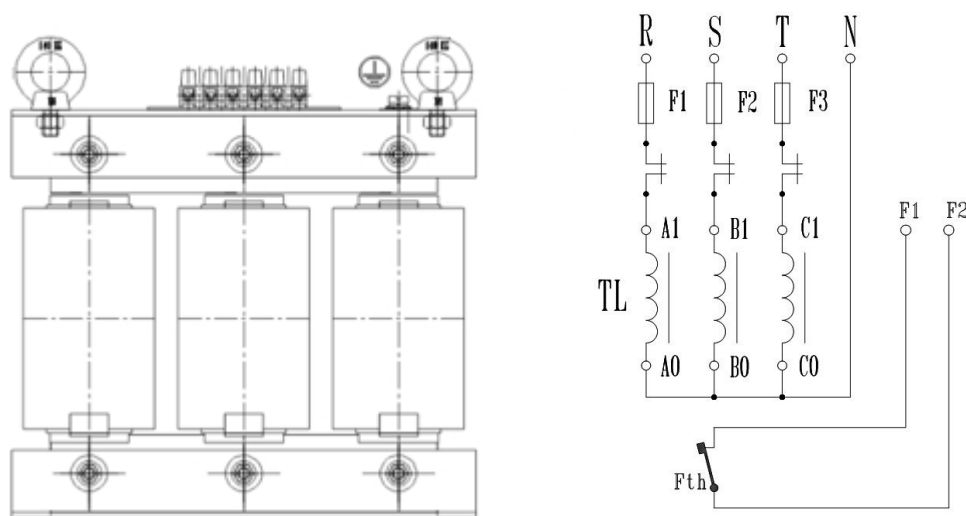
### ***Bezkontaktní polovodičový spínač***

Tyto spínače jsou určeny pro okamžité spínání kondenzátorů ve speciálních tzv. rychlých kompenzátorech. Jejich předností je řízený okamžik sepnutí v okolí průchodu napětí na spínači nulou, spínání probíhá bez přechodného proudového děje a umožňuje opakované sepnutí v časech jedné periody síťového kmitočtu (20ms) při regulaci rychlých impulzních odběrů.

## 4.6 Řízení účinníku a kompenzace jalového výkonu na FVE

Stejně jako u ostatních elektrických zařízení připojovaných ze sítě vysokého napětí je i provozovatel fotovoltaické elektrárny povinen dodržovat tzv. neutrální pásmo účinníku 0,95 ind. až 1,00 (0,95; 0,97; 1). V praxi to znamená, že odběrné místo musí mít vzhledem k distribuční soustavě ohmický, případně mírně induktivní charakter. Požadavek rozvodných závodů je zcela pochopitelný, neboť výkonová bilance jalových výkonů ovlivňuje napěťové poměry v síti a bilance činného výkonu zase ovlivňuje frekvenci sítě. Vzhledem ke skutečnosti, že fotovoltaické elektrárny větších výkonů mají spíše kapacitní charakter, jsou jejich provozovatelé ekonomicky motivováni (dodávka kapacitního reaktivního výkonu do distribuční soustavy je vysoce penalizována) k přijetí opatření pro eliminaci kapacitní reaktivní elektrické práce. Toho lze dosáhnout instalací dekompenzačních tlumivek, kdy je účinník elektrárny přesouván do induktivního kvadrantu. Spínání dekompenzačních tlumivek je řízeno automatickým regulátorem.

V současnosti rozvodné závody pro nově instalované FVE požadují dispečerské řízení účinníku. Provozovatel FVE je povinen učinit taková opatření, aby dispečink distributora mohl dálkově řídit účinník provozovny v rozmezí 0,95 ind. až 1,00. Toto v praxi znamená instalovat dekompenzační a kompenzační rozvaděče o výkonu přibližně rovném jedné třetině maximálního soudobého instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny. Například pro výkon FVE 1 MWp se jedná o instalaci přibližně 350 kVAr dekompenzačních tlumivek a 350 kVAr konvenční kondenzátorové kompenzace.[13]



Obr. 4.1 Dekompenzační tlumivka

### 4.6.1 Problémy s kompenzací u FVE

Pokud distributor nevyžaduje instalaci dispečerského řízení, lze kapacitní reaktivní výkon eliminovat instalací dekompenzačních tlumivek o výkonu pouhých desítek kVAr (vztaženo k instalovanému výkonu 1 MWp). Tuto kapacitní jalovou práci distributor načítá do kvadrantů  $R_c-$  a  $R_i+$ , přičemž za každou dodanou MVarh si účtuje 400 Kč. V praxi se objevují i fotovoltaické elektrárny platící desetitisíce korun měsíčně.

### 4.6.2 Vznik kapacitního jalového výkonu u FVE

Nyní uvedu přehled jednotlivých prvků sítě, ze kterých se výrobná skládá:

- *Střídače* - obecně záleží na výrobci a typu, ve většině případů se jedná o kapacitní zátěž (kladný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu elektrárny)
- *NN vedení střídače na transformátor* - nabíjecí proud pro udržování kabelů pod napětím způsobuje kapacitní charakter této zátěže (kladný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu výrobný)
- *Transformátor* - z pohledu jalového výkonu induktivní zátěž (záporný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu výrobný)
- *Individuální kompenzace transformátoru* - kapacitní zátěž, instalovaný kondenzátor (kladný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu výrobný)
- *Centrální kompenzace výrobný* - automatické kompenzace připínáním kondenzátorů eliminují induktivní jalový výkon (kladný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu výrobný)
- *vn vedení 22 kV* od transformoven k připojovacímu bodu do DS - nabíjecí proud pro udržování kabelů pod napětím způsobuje kapacitní charakter této zátěže (kladný příspěvek k celkovému kapacitnímu reaktivnímu výkonu výrobný)



Z přehledu je zřejmé, že ve výrobně zásadně převažují kapacitní zátěže, jedinou významnější induktivní zátěží jsou transformátory. I když nabíjecí proudy transformátorů a kabelů se pohybují v hodnotách jednotek ampér, nelze je na hladinách vn zanedbávat. Při napětí 22 kV každý jeden ampér znamená 38 kVAr jalového výkonu trojfázově, který je pochopitelně naměřen na obchodním měření distributora. Například nabíjecí proud 1 km kabelu 3 x 1 x AXEKVCE 240 mm<sup>2</sup> je cca 1,3 A, což při daném napětí znamená výkon kapacitní 50 kVAr. Nabíjecí výkon kapacitní kabelu 3 x 1 x AXEKVCE 120 mm<sup>2</sup> je cca poloviční.[13]

### 4.6.3 Dekompensace

Pokud jsou problémy s kapacitou, je vhodné odpojit všechny dostupné nadbytečné kapacity a připojit dodatečnou induktivní zátěž:

- odpojit od sítě individuální kompenzace transformátorů;
- připojit ke každému transformátoru nn řízenou dekompenzaci koncipovanou pro kompenzování kapacitního výkonu střídačů a také přívodního vn vedení.

Řízená dekompenzace spočívá v instalaci menší statické indukční zátěže pro kompenzaci kabelů VN a vyvážení induktivních a kapacitních reaktancí výrobní-transformátor a vedení. I potřeby dekompenzačních výkonů desítek kVAr lze řešit pomocí několika stupňových dekompenzačních rozvaděčů.

Automaticky řízená dekompenzace umožňuje spínáním kombinace dekompenzačních tlumivek jednak posunout účinník výroby do induktivní oblasti, dále pak dosahovat libovolného zadaného účinníku. V případě výroby je žádoucí pouze přesunout účinník do induktivní oblasti, kondenzátory jsou vypuštěny. Dekompenzační rozvaděč je po konfiguraci připraven k automatickému provozu, komplexně řízený regulátorem jalového výkonu, zajišťující spínání induktivních stupňů, bezpečné odpínání, popřípadě řízení nuceného větrání.

*Instalací dekompenzačních rozvaděčů na FVE je možné:*

- Eliminovat přítomný kapacitní reaktivní výkon, a tím odstranit penalizaci ze strany rozvodných závodů. Návrh opatření lze stanovit pomocí dosažených ekonomických výsledků instalace, obecně se pohybuje na úrovni jednoho roku a méně;

- Realizovat dispečerské řízení účinníku instalace. Tato investice je u některých výroben mandatorní (vyžadována pro připojení výroby k distribuční soustavě), provozovatel tedy vybírá z nejvýhodnější cenové nabídky soutěžících v tendru.[13]

## 5. Volba transformátoru na FVE

Po konzultaci s panem Ing. Žákem se v této části mé diplomové práce budu zabývat volbou transformátoru na FVE. Konkrétně na FVE s výkonem 800kWp. Transformátor budu volit z hlediska ztrát a ekonomičnosti provozu po dobu životnosti FVE. Protože u dražších transformátorů s menšími ztrátami se v budoucnu na provozu ušetří.

### 5.1 Ztráty na transformátoru

Navzdory skutečnosti, že transformátory jsou vysoce účinná elektrická zařízení (účinnost bývá vyšší jak 99%), je během jejich dlouhé životnosti nevyhnutelně nějaká energie přeměněna na ztráty. Tato energetická ztráta sestává ze sumy ztrát naprázdno a ztrát nakrátko. Tyto ztráty jsou přeměněny na teplo, které musí být odvedeno.

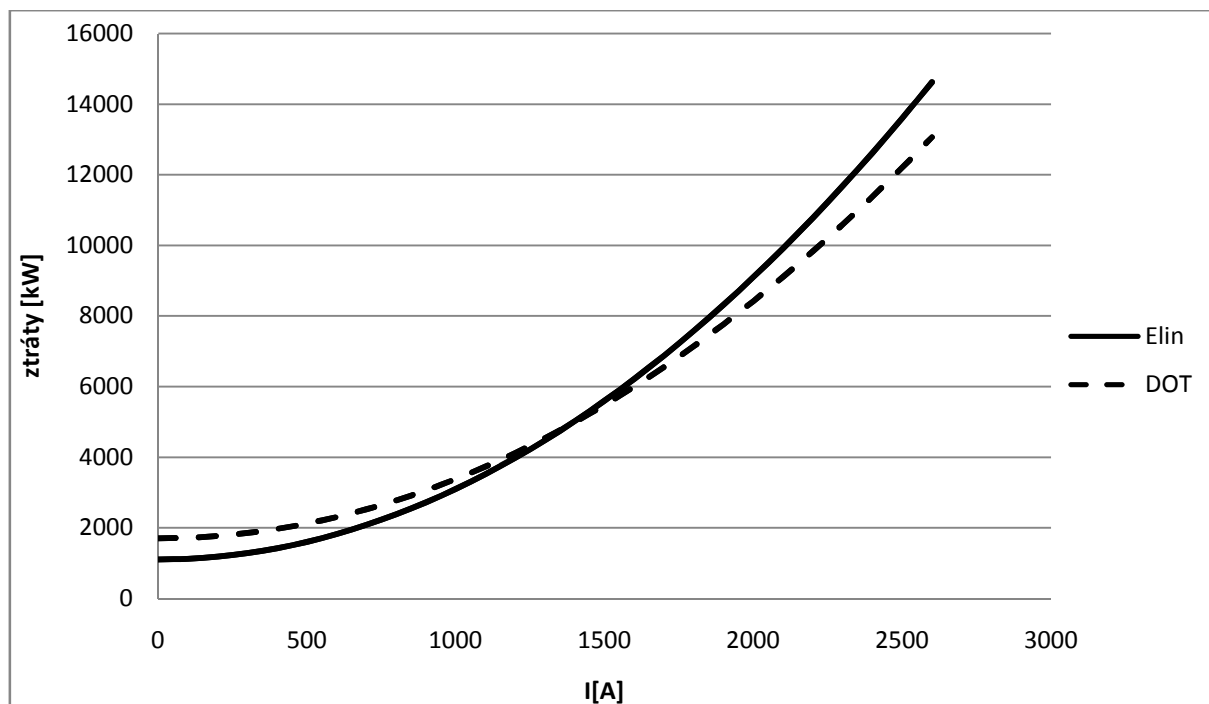
#### 5.1.1 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno (zvané také jako ztráty v železe) vznikají v materiálu jádra z důvodu hysterezí a vířivých proudů, a jsou přítomny téměř konstantně, pokud je transformátor připojen k elektrizační soustavě. Hysterezní ztráty jsou úměrné frekvenci a indukci. Ztráty vířivými proudy jsou také úměrné kmitočtu a indukované amplitudě, ale hlavně také tloušťce magnetické oceli.

#### 5.1.2 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko (zvané také jako ztráty v mědi) vznikají ve vinutích, připojovacích vodičích a nádobě transformátoru. Jsou způsobeny efekty Jouleova zákona (ohmické ztráty), vířivými proudy a rozptylovými toky. Ohmické ztráty se rovnají kvadrátu proudu a odporu vodiče. Tyto ztráty jsou úměrné kvadrátu zatížení. Obecně nižší ztráty vždy vyžadují použití většího množství materiálu nebo cenově nákladnějších materiálů, což způsobí nárůst ceny

transformátoru. Nicméně jeho vlastní spotřeba energie, a proto i jeho provozní náklady, budou nižší.



Obr. 5.1 Závislost ztrát na proudu u transformátorů ELIN a DOT

Na obrázku 5.1 jsou zaznamenány průběhy ztrát v závislosti na proudu. Tyto průběhy jsou sestrojeny pro transformátory 22/0,4kV:

	ELIN	DOT
S [kVA]	1000	1000
$\Delta P_0$ [kW]	1100	1700
$\Delta P_k$ [kW]	11600	10500
$u_k$ [%]	6	6
cena [Kč]	328000	320000

Tab. 5.1 Parametry transformátorů

## 5.2 Výběr transformátoru

Při výběru transformátoru je důležité cenu porovnávat s vlastnostmi, kterými daný stroj disponuje (ztráty naprázdno  $P_0$  a ztráty nakrátko  $P_k$ ) jelikož při předpokládaném provozu elektrárny 20 let se může cena provozu jednoho transformátoru lišit až v řádech milionů korun.

Ve FVE se standardně používají olejové transformátory značek:

- SGB (DOT, DOTEL, DOTUL, DOTUL-30, DOTXL)
- EXIMET (STANDART, REDUKOVANÉ ZTRÁTY)
- AREVA (BA', AC', CC')
- KONCAR (8TBNO)

Pro FVE o výkonu 800kWp jsem zvolil transformátor 1000kVA, 22/0,4kV. V tabulce 5.2 jsou uvedeny transformátory různých výrobců i typů. Dále ztráty naprázdno, ztráty nakrátko a kupní ceny těchto strojů.

Výrobce	Typ	$P_o$ [kW]	$P_k$ [kW]	$T_r$ [Kč]
SGB	DOT	1,7	10,5	320 000
	DOTEL	1,1	10,5	359 000
	DOTUL	1,1	9,5	370 000
	DOTUL-30	0,77	9,5	415 000
	DOTXL	0,6	7,5	530 000
EXIMET	STANDARD	2,2	13	350 000
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	1,7	10,5	380 000
AREVA	BA'	1,7	13	340 000
	AC'	1,1	10,5	370 000
	CC'	0,75	9,5	420 000
KONCAR	8TBNO	1,1	10,5	300 000

Tab. 5.2 Olejové transformátory 1000kVA

$P_o$	ztráty transformátorů naprázdno	(kW)
$P_k$	ztráty transformátorů nakrátko	(kW)
$T_r$	prodejní cena transformátoru	(Kč)

Z tabulky 5.2 lze vidět, že cena transformátoru je závislá na jeho parametrech (ztráty naprázdno a ztráty nakrátko) a rozdíl v kupní ceně může být až 210 000 Kč.

Pro výpočet nákladů na provoz transformátoru jsem použil následující vztah.

$$T_r = N[t_s \cdot (P_0 + P_K) \cdot A_V + t_z \cdot P_0 \cdot A_0] \quad (5-1)$$

kde:

$T_r$  cena nákladů na provoz transformátoru za N let provozu [Kč]

$N$  doba používání transformátoru [rok]

$t_s$  průměrný počet hodin v roce, kdy na krajinu dopadají sluneční paprsky [h]

$A_V$  výkupní cena vyrobené energie [Kč]

$t_z$  průměrný počet hodin v roce, kdy na krajinu slunce nesvítí [h]

$A_0$  cena odebírané energie při provozu elektrárny naprázdno [Kč]

Průměrný počet hodin v roce, kdy na krajinu dopadají sluneční paprsky a průměrný počet hodin v roce, kdy na krajinu slunce nesvítí je pro každou lokalitu jiný. Pro Českou republiku je to 950h a 7810h. Výkupní cenu vyrobené energie stanovuje Energetický regulační úřad, pro rok 2013 je tato cena 12,18Kč (FVE byla postavena v roce 2012). Cena odebírané energie při provozu elektrárny naprázdno je smluvní cena s distributorem elektrické energie, v praxi bývá 3Kč. Pro FVE se počítá s dobou používání transformátoru 20 let. V mé práci, pro ilustraci, počítám s roky 5, 7, 10 a 20 let provozu.

### 5.3 Výpočet ceny nákladů na provoz transformátoru za N let provozu

Výpočet pro transformátor SGB DOT za 5 let provozu:

$$T_r = N[t_s \cdot (P_0 + P_K) \cdot A_V + t_z \cdot P_0 \cdot A_0] = 5[950 \cdot (1,7 + 10,5) \cdot 12,18 + 7810 \cdot 1,7 \cdot 3] \\ = 909\,043\text{Kč}$$

Výrobce	Typ	$T_r$ [Kč]	$T_{r5}$ [Kč]	$T_r+T_{r5}$ [Kč]
SGB	DOT	320 000	909043	1229043
	DOTEL	359 000	803840	1162840
	DOTUL	370 000	745653	1115653
	DOTUL-30	415 000	687791	1102791
	DOTXL	530 000	541609	1071609
EXIMET	STANDARD	350 000	1142180	1492180
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	380 000	909043	1289043
AREVA	BA´	340 000	1054511	1394511
	AC´	370 000	803840	1173840
	CC´	420 000	684284	1104284
KONCAR	8TBNO	300 000	803840	1103840

Tab. 5.3 Náklady za 5 let provozu

Z tabulky 5.3 lze vidět, že nákup nejdražšího transformátoru se vyplatí již při provozu 5 let. V tabulce  $T_{r5}$  znamená cena nákladů na provoz transformátoru za 5 let provozu a ve sloupci  $T_r+T_{r5}$  je k tomuto připočtena cena transformátoru.

Výrobce	Typ	$T_r$ [Kč]	$T_{r7}$ [Kč]	$T_r+T_{r7}$ [Kč]
SGB	DOT	320 000	1272660	1592660
	DOTEL	359 000	1125376	1484376
	DOTUL	370 000	1043914	1413914
	DOTUL-30	415 000	962908	1377908
	DOTXL	530 000	758252	1288252
EXIMET	STANDARD	350 000	1599052	1949052
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	380 000	1272660	1652660
AREVA	BA'	340 000	1476316	1816316
	AC'	370 000	1125376	1495376
	CC'	420 000	957998	1377998
KONCAR	8TBNO	300 000	1125376	1425376

Tab. 5.4 Náklady za 7 let provozu

Po sedmi letech provozu je nejvyšší rozdíl mezi transformátory už skoro 700 000Kč.

Výrobce	Typ	$T_r$ [Kč]	$T_{r10}$ [Kč]	$T_r+T_{r10}$ [Kč]
SGB	DOT	320 000	1818085	2138085
	DOTEL	359 000	1607680	1966680
	DOTUL	370 000	1491305	1861305
	DOTUL-30	415 000	1375582	1790582
	DOTXL	530 000	1083218	1613218
EXIMET	STANDARD	350 000	2284360	2634360
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	380 000	1818085	2198085
AREVA	BA'	340 000	2109023	2449023
	AC'	370 000	1607680	1977680
	CC'	420 000	1368569	1788569
KONCAR	8TBNO	300 000	1607680	1907680

Tab. 5.5 Náklady za 10 let provozu

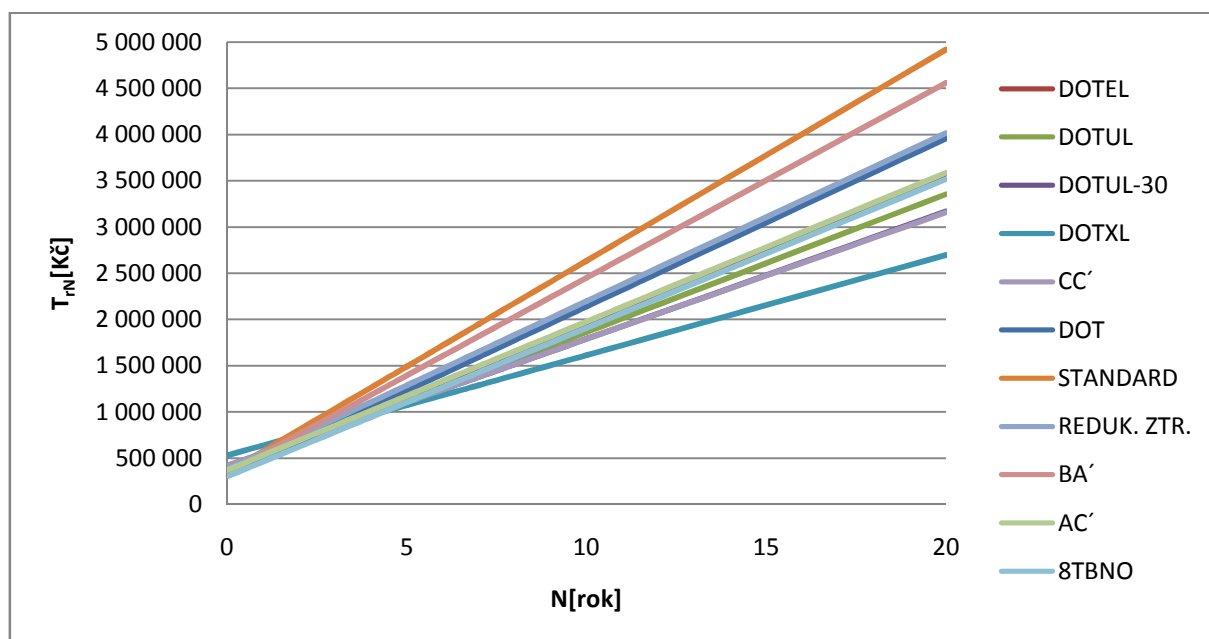
Výrobce	Typ	$T_r$ [Kč]	$T_{r20}$ [Kč]	$T_r+T_{r20}$ [Kč]
SGB	DOT	320 000	3636170	3956170
	DOTEL	359 000	3215360	3574360
	DOTUL	370 000	2982610	3352610
	DOTUL-30	415 000	2751165	3166165
	DOTXL	530 000	2166435	2696435
EXIMET	STANDARD	350 000	4568720	4918720
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	380 000	3636170	4016170
AREVA	BA´	340 000	4218045	4558045
	AC´	370 000	3215360	3585360
	CC´	420 000	2737138	3157138
KONCAR	8TBNO	300 000	3215360	3515360

Tab. 5.6 Náklady za 20 let provozu

V tabulce 5.6 jsou uvedeny náklady na provoz transformátoru za 20 let. Tyto hodnoty jsou nejdůležitější pro volbu transformátoru, jelikož průměrná životnost fotovoltaické elektrárny se uvádí právě 20 let. Dále v tabulce 5.7 jsou uvedeny hodnoty za 5, 7, 10 a 20 let.

Výrobce	Typ	$T_r$ [Kč]	$T_r+T_{r5}$	$T_r+T_{r7}$	$T_r+T_{r10}$	$T_r+T_{r20}$
SGB	DOT	320 000	1229043	1592660	2138085	3956170
	DOTEL	359 000	1162840	1484376	1966680	3574360
	DOTUL	370 000	1115653	1413914	1861305	3352610
	DOTUL-30	415 000	1102791	1377908	1790582	3166165
	DOTXL	530 000	1071609	1288252	1613218	2696435
EXIMET	STANDARD	350 000	1492180	1949052	2634360	4918720
	REDUKOVANÉ ZTRÁTY	380 000	1289043	1652660	2198085	4016170
AREVA	BA´	340 000	1394511	1816316	2449023	4558045
	AC´	370 000	1173840	1495376	1977680	3585360
	CC´	420 000	1104284	1377998	1788569	3157138
KONCAR	8TBNO	300 000	1103840	1425376	1907680	3515360

Tab. 5.7 Náklady za 5, 7, 10, 20 let provozu



Obr. 5.2 Náklady na jednotlivé typy transformátorů

Z obrázku 5.2 a tabulky 5.7 je patrné, že se vyplatí koupě dražšího transformátoru s lepšími parametry. Tato investice se může vrátit již po pěti letech provozu transformátoru. Po dvaceti letech může být rozdíl v nákladech na provoz až 2 300 000Kč.

## 6 Kompenzace transformátoru

Z předešlých částí mé diplomové práce vyplývá, že výkon dodávaný z FVE do místa připojení k DS musí být říditelný a mít požadovaný účinník. V další části diplomové práce se budu zabývat kompenzací jalového výkonu transformátoru tak, aby bylo možno dosáhnout požadovaného účinníku v rámci třístupňové regulace při různé dodávce činného výkonu.

### 6.1 Popis situace

Po dohodě s panem Ing. Žákem jsme se rozhodli pro výpočet kompenzace transformátoru na fotovoltaické elektrárně s výkonem 800kWp. Pro výpočty jsem zvolil transformátor od výrobce DOT 22/0,4kV, parametry tohoto stroje jsou v tabulce 6.1.

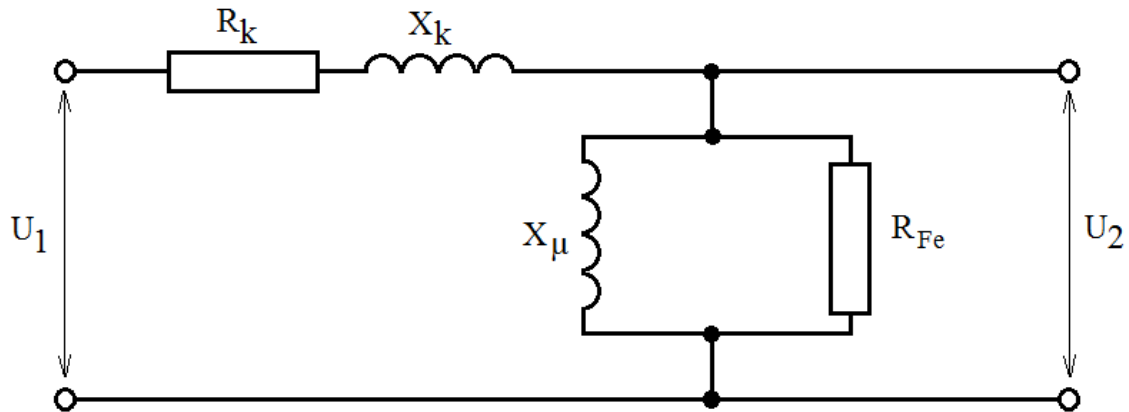
DOT	S [kVA]	$\Delta P_0$ [kW]	$\Delta P_k$ [kW]	$u_k$ [%]	$i_0$ [%]
	1000	1700	10500	6	0,6

Tab. 6.1 Parametry transformátoru DOT



## 6.2 Náhradní schéma transformátoru

Před samotnými výpočty jsem nejprve zhotovil náhradní schéma transformátoru (obr. 6.1). V tomto schématu jsem jednotlivé části transformátoru nahradil jejich parametry potřebnými k výpočtu. Po konzultaci s panem Ing. Žákem uvažuji jednotkový převod.



Obr. 6.1 Náhradní schéma transformátoru

## 6.3 Postup výpočtu

Pro výpočty jsem zvolil tabulkový editor MS Excel, který mi umožnil automatizovat veškeré výpočty. Nejprve jsem vypočítal náhradní parametry transformátoru. Hodnoty těchto parametrů jsem přepočítal na stranu nízkého napětí, tj. 0,4kV.

$$X_k = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 0,06 \cdot \frac{400^2}{1000000} = 0,0096\Omega \quad (6-1)$$

$$R_k = \Delta P_k \cdot \left(\frac{U_N}{S_N}\right)^2 = 10500 \cdot \left(\frac{400}{1000000}\right)^2 = 0,0017\Omega \quad (6-2)$$

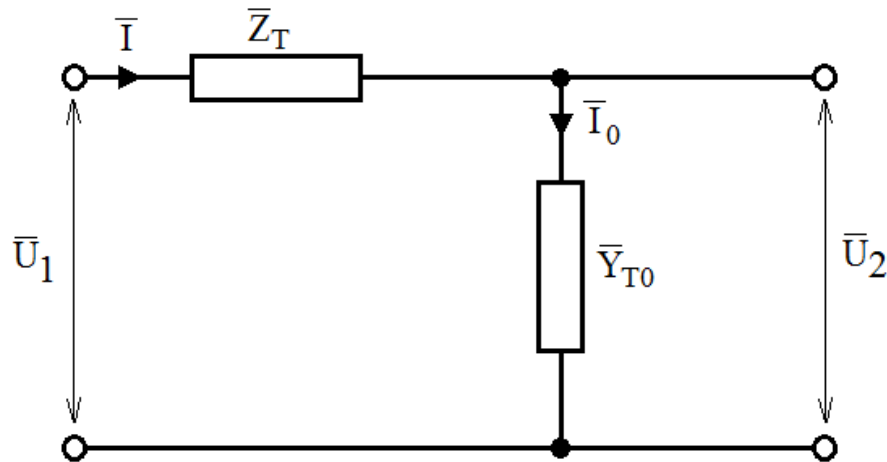
$$Z_k = \sqrt{X_k^2 + R_k^2} = \sqrt{0,0096^2 + 0,0017^2} = 0,0097\Omega \quad (6-3)$$

$$Y_P = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = 0,006 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 0,0375 \text{ S} \quad (6-4)$$

$$G_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} = \frac{1700}{400^2} = 0,0106 \text{ S} \rightarrow R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} = 94,12\Omega \quad (6-5)$$

$$B_m = \sqrt{Y_P^2 - G_{Fe}^2} = \sqrt{0,0375^2 + 0,0106^2} = 0,0359 \text{ S} \rightarrow X_\mu = \frac{1}{B_m} = 27,8\Omega \quad (6-6)$$

Dále jsem pro další výpočty převedl parametry v náhradním schématu na komplexní impedance a admittance (obr.6.2).



Obr. 6.3 Náhradní schéma s komplexními impedancemi a admitancemi

$$\bar{Z}_T = R_k + jX_k = 0,0017 + j0,0096 = 0,0097 \angle 80^\circ \Omega \quad (6-7)$$

$$\bar{Y}_{T0} = G_{Fe} - jB_m = 0,0106 - j0,0359 = 0,0375 \angle -73,5^\circ S \quad (6-8)$$

Dále mohu spočítat proud  $I_0$ , který prochází příčnou větví přes admittance  $Y_{T0}$ . Poté i sdružené ztráty na této větvi. Proud  $I$  se mění s denní dobou a podle klimatických podmínek. Výpočet jsem provedl pomocí Excelu, kde jsem nejprve zvolil osm hodnot dodávaných výkonů v kilowattech. Z výkonů jsem následně dopočítal proud, který je ve fázi se síťovým napětím. Následné výpočty jsou provedeny pro maximální výkon FVE.

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_2}{(\bar{Y}_{T0})^{-1}} = \frac{230 \angle 0^\circ}{(0,0375 \angle -73,5^\circ)^{-1}} = 8,625 \angle -73,5^\circ A \quad (6-9)$$

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_2} = \frac{800000}{3 \cdot 230} = 1159,4 A \rightarrow \bar{I} = 1159,4 \angle 0^\circ A \quad (6-10)$$

$$\bar{\Delta S}_0 = \frac{I_0^2}{\bar{Y}_{T0}} = \frac{8,625^2}{0,0375 \angle -73,5^\circ} = 1983,75 \angle 73,5^\circ = 563,4 + j1902,1 VA \quad (6-11)$$

$$\bar{\Delta S}_T = \bar{Z}_T \cdot I^2 = 0,0097 \angle 80^\circ \cdot 1159,4^2 = 13039,3 \angle 80^\circ = 2264,2 + j12840,7 VA \quad (6-12)$$

Výsledné hodnoty představují větvové ztráty na jedné fázi. Celkové třífázové ztráty jsou tedy součtem těchto dílčích ztrát vynásobený třemi.

$$\overline{\Delta S}_{\text{celk.3f}} = 3 \cdot (\overline{\Delta S}_0 + \overline{\Delta S}_T) = 3 \cdot (563,4 + j1902,1 + 2264,2 + j12840,7) = 8482,8 + j44228,4 \text{ VA} \quad (6-13)$$

Celkové třífázové ztráty pro různé hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce 6.2.

P[kW]	I[A]	$\Delta S_{\text{celk.3f}}$ [VA]
0	0	1690,2+j5706,3
100	144,9	1796,3+j6308,2
200	289,9	2114,7+j8114,0
300	434,8	2645,4+j11123,7
400	579,7	3388,4+j15337,2
500	724,6	4343,6+j20754,6
600	869,6	5511,1+j27375,8
700	1014,5	6890,9+j35200,9
800	1159,4	8482,8+j44228,4

Tab. 6.2 Celkové třífázové ztráty v závislosti na dodávaném výkonu.

## 6.4 Výpočet dodávaného výkonu

Střídač dodává proud ve fázi s napětím v síti, tj. s účinníkem  $\cos \varphi = 1$ . Proto dále uvažuji, že dodávaný činný výkon je roven zdánlivému. Tento výkon je třífázový. Výsledný dodávaný výkon z FVE do sítě bude tedy roven rozdílu výkonu dodávaného a celkových ztrát, které jsem již spočítal.

$$\overline{S} = \overline{\Delta S}_{\text{celk}} - \overline{\Delta S} = 800000 - (8482,8 + j44228,4) = 791517,2 - j44228,4 \text{ VA} \quad (6-14)$$

Dále vím, že komplexní tvar mohu dále rozdělit. Reálná část představuje činný výkon a část imaginární výkon jalový.

$$\overline{S} = P + jQ \quad (6-15)$$

Při spotřebičové orientaci se jedná o velikost dodávaného činného ( $P$ ) a jalového ( $Q$ ) výkonu ze sítě do spotřebiče. Přičemž kladná hodnota představuje spotřebu a záporná hodnota představuje dodávku výkonu ze spotřebiče do sítě. Výsledný výkon, který jsem spočítal, má však zdrojovou orientaci. V příloze č.4 k PPDS je doporučeno používat jednotně spotřebičovou orientaci, a tak výsledný dodávaný výkon z FVE do sítě má opačná znaménka.

$$\overline{S} = -791,5 + j44,2 \text{ kVA}$$

Z toho tedy vyplývá, že při maximálním výkonu bude FVE dodávat do sítě činný výkon 791,5kW a odebírat ze sítě jalový induktivní výkon 44,2kVAr.

Důležitým faktorem je, jaký účinník  $\cos \varphi$  má dodávaný výkon. Ten je dán jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{791,5^2 + 44,2^2} = 792,7 \text{ kVA}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{-791,5}{792,7} = -0,9985$$

P[kW]	I[A]	S[kVA]	P[kW]	Q[kVAr]	cos $\varphi$	$\Delta P$ [kW]
0	0	5,95	1,69	5,71	0,284034	1,69
100	144,9	98,41	-98,20	6,31	-0,99794	1,80
200	289,9	198,05	-197,89	8,11	-0,99916	2,11
300	434,8	297,56	-297,35	11,12	-0,9993	2,65
400	579,7	396,91	-396,61	15,34	-0,99925	3,39
500	724,6	496,09	-495,66	20,75	-0,99912	4,34
600	869,6	595,12	-594,49	27,38	-0,99894	5,51
700	1014,5	694,00	-693,11	35,2	-0,99871	6,89
800	1159,4	792,7	-791,5	44,23	-0,99849	8,50

Tab. 6.3 Výsledné dodávané výkony z transformátoru do sítě ve spotřebičové orientaci.

## 6.5 Výpočet kompenzačních výkonů

FVE musí být schopna dodávat výkon s účinníkem 0,95 – 0,97 – 1 pro odběr jalového výkonu a 1 – 0,97 – 0,95 pro dodávku jalového výkonu. Proto v této části budu počítat kompenzaci transformátoru pouze pro tyto hodnoty účinníku. Pro dosažení těchto hodnot účinníku je potřeba připojit kompenzační zařízení, které bude schopno dodat potřebný jalový výkon. Toto zařízení mění pouze jalové složky celkového výkonu, a tudíž činná složka zůstává stejná.

### 6.5.1 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos \varphi=1$

Kompenzace na  $\cos = 1$ , znamená úplné vykompenzování jalové složky celkového výkonu. Je třeba dodat kompenzační výkon o stejné velikosti, jako jalový výkon před kompenzací, v opačném charakteru. Ukázkové výpočty jsem provedl pro stav, kdy je transformátor v režimu naprázdno a při plném zatížení.

$$S_{k(1)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1,69}{1} = 1,69 \text{ kVA} \quad (6-16)$$

$$Q_{k(1)} = \sqrt{S_{k(1)}^2 - P^2} = \sqrt{1,69^2 - 1,69^2} = 0 \text{ kVAr} \quad (6-17)$$

$$Q_{\text{komp}(1)} = Q_{k(1)} - Q = 0 - 5,71 = -5,71 \text{ kVAr} \quad (6-18)$$

$$S_{k(1)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{-791,5}{1} = -791,5 \text{ kVA}$$

$$Q_{k(1)} = \sqrt{S_{k(1)}^2 - P^2} = \sqrt{791,5^2 - 791,5^2} = 0 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{komp}(1)} = Q_{k(1)} - Q = 0 - 44,23 = -44,23 \text{ kVAr}$$

P[kW]	I[A]	P[kW]	Q[kVAr]	S <sub>k</sub> [kVA]	Q <sub>k</sub> [kVAr]	Q <sub>komp</sub> [kVAr]
0	0	1,69	5,71	1,69	0	-5,71
100	144,9	-98,20	6,31	-98,20	0	-6,31
200	289,9	-197,89	8,11	-197,89	0	-8,11
300	434,8	-297,35	11,12	-297,35	0	-11,12
400	579,7	-396,61	15,34	-396,61	0	-15,34
500	724,6	-495,66	20,75	-495,66	0	-20,75
600	869,6	-594,49	27,38	-594,49	0	-27,38
700	1014,5	-693,11	35,2	-693,11	0	-35,2
800	1159,4	-791,50	44,23	-791,50	0	-44,23

Tab. 6.4 Kompenzační výkony pro  $\cos\varphi=1$ 

V tabulce 6.4 jsou uvedeny vypočtené kompenzační výkony (pro  $\cos\varphi=1$ ) pro různé hodnoty zatížení transformátoru. Z tabulky je patrné, že při kompenzaci na  $\cos\varphi=1$  je nutné dodat kapacitní kompenzační výkon.

### 6.5.2 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos \varphi=0,95$ a $\varphi=0,97$

$$S_{k(0,95)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1,69}{0,95} = 1,779 \text{ kVA}$$

$$Q_{k(0,95)} = \sqrt{S_{k(0,95)}^2 - P^2} = \sqrt{1,779^2 - 1,69^2} = 0,555 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{komp}(0,95)} = Q_{\text{k}(1)} - Q = 0,555 - 5,71 = -5,155\text{kVAr}$$

$$S_{\text{k}(0,95)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{-791,5}{0,95} = -833,16\text{kVA}$$

$$Q_{\text{k}(0,95)} = \sqrt{S_{\text{k}(0,95)}^2 - P^2} = \sqrt{833,16^2 - 791,5^2} = 260,15\text{kVAr}$$

$$Q_{\text{komp}(0,95)} = Q_{\text{k}(0,95)} - Q = 260,15 - 44,23 = 215,92\text{kVAr}$$

Z výsledků je patrné, že při chodu transformátoru naprázdno (FVE nevyrobí energii) je pro kompenzace na  $\cos\varphi=0,95$  zapotřebí dodat kapacitní kompenzační výkon o velikosti 5,155kVAr. Při plném zatížení transformátoru je nutno dodat kompenzační výkon 215,92kVAr induktivního jalového výkonu.

P[kW]	I[A]	P[kW]	Q[kVAr]	S <sub>k</sub> [kVA]	Q <sub>k</sub> [kVAr]	Q <sub>komp</sub> [kVAr]
0	0	1,69	5,71	1,78	0,56	-5,15
100	144,9	-98,20	6,31	-103,37	32,28	25,97
200	289,9	-197,89	8,11	-208,30	65,04	56,93
300	434,8	-297,35	11,12	-313,00	97,74	86,62
400	579,7	-396,61	15,34	-417,49	130,36	115,02
500	724,6	-495,66	20,75	-521,74	162,91	142,16
600	869,6	-594,49	27,38	-625,78	195,40	168,02
700	1014,5	-693,11	35,2	-729,59	227,81	192,61
800	1159,4	-791,50	44,23	-833,16	260,15	215,92

Tab. 6.5 Kompenzační výkony pro  $\cos\varphi=0,95$ 

P[kW]	I[A]	P[kW]	Q[kVAr]	S <sub>k</sub> [kVA]	Q <sub>k</sub> [kVAr]	Q <sub>komp</sub> [kVAr]
0	0	1,69	5,71	1,74	0,42	-5,29
100	144,9	-98,20	6,31	-101,24	24,61	18,30
200	289,9	-197,89	8,11	-204,01	49,59	41,48
300	434,8	-297,35	11,12	-306,55	74,52	63,40
400	579,7	-396,61	15,34	-408,88	99,40	84,06
500	724,6	-495,66	20,75	-510,99	124,22	103,47
600	869,6	-594,49	27,38	-612,88	148,99	121,61
700	1014,5	-693,11	35,2	-714,55	173,71	138,51
800	1159,4	-791,50	44,23	-815,98	198,37	154,14

Tab. 6.6 Kompenzační výkony pro  $\cos\varphi=0,97$ 

V tabulkách 6.5 a 6.6 je přehled kompenzačních výkonů pro  $\cos\varphi=0,95$  a pro  $\cos\varphi=0,97$ .

### 6.5.3 Výpočet kompenzačních výkonů pro $\cos \varphi = -0,95$ a $\varphi = -0,97$

V této části počítám kompenzační výkon pro dosažení kapacitních účinníků. Jelikož je nyní požadavek na dodávku kapacitního jalového výkonu, musel jsem obrátit znaménko výsledného jalového výkonu po kompenzaci. Příklady výpočtů jsou opět provedeny pro stav naprázdno a při plném zatížení transformátoru.

$$S_{k(-0,97)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1,69}{-0,97} = -1,74 \text{ kVA}$$

$$Q_{k(-0,97)} = -\sqrt{S_{k(-0,97)}^2 - P^2} = -\sqrt{1,74^2 - 1,69^2} = -0,42 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{komp}(-0,97)} = Q_{k(-0,97)} - Q = -0,42 - 5,71 = -6,13 \text{ kVAr}$$

$$S_{k(-0,97)} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{-791,5}{-0,97} = 815,98 \text{ kVA}$$

$$Q_{k(-0,97)} = -\sqrt{S_{k(-0,97)}^2 - P^2} = -\sqrt{815,98^2 - 791,5^2} = -198,37 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{komp}(-0,97)} = Q_{k(-0,97)} - Q = -198,37 - 44,23 = -242,6 \text{ kVAr}$$

Z výpočtů je vidět, že pro dosažení kapacitního účinníku  $\cos = -0,97$  při stavu naprázdno je nutno dodat kompenzačním zařízením 6,13 kVAr kapacitního charakteru. A při maximálním dodávaném výkonu je zapotřebí kapacitní kompenzační výkon 242,6 kVAr.

P[kW]	I[A]	P[kW]	Q[kVAr]	$S_k$ [kVA]	$Q_k$ [kVAr]	$Q_{\text{komp}}$ [kVAr]
0	0	1,69	5,71	-1,78	-0,56	-6,27
100	144,9	-98,20	6,31	103,37	-32,28	-38,59
200	289,9	-197,89	8,11	208,30	-65,04	-73,15
300	434,8	-297,35	11,12	313,00	-97,74	-108,86
400	579,7	-396,61	15,34	417,49	-130,36	-145,70
500	724,6	-495,66	20,75	521,74	-162,91	-183,66
600	869,6	-594,49	27,38	625,78	-195,40	-222,78
700	1014,5	-693,11	35,2	729,59	-227,81	-263,01
800	1159,4	-791,50	44,23	833,16	-260,15	-304,38

Tab. 6.7 Kompenzační výkony pro  $\cos \varphi = -0,95$

P[kW]	I[A]	P[kW]	Q[kVAr]	S <sub>k</sub> [kVA]	Q <sub>k</sub> [kVAr]	Q <sub>komp</sub> [kVAr]
0	0	1,69	5,71	-1,74	-0,42	-6,13
100	144,9	-98,20	6,31	101,24	-24,61	-30,92
200	289,9	-197,89	8,11	204,01	-49,59	-57,70
300	434,8	-297,35	11,12	306,55	-74,52	-85,64
400	579,7	-396,61	15,34	408,88	-99,40	-114,74
500	724,6	-495,66	20,75	510,99	-124,22	-144,97
600	869,6	-594,49	27,38	612,88	-148,99	-176,37
700	1014,5	-693,11	35,2	714,55	-173,71	-208,91
800	1159,4	-791,50	44,23	815,98	-198,37	-242,60

Tab. 6.8 Kompenzační výkony pro  $\cos\varphi = -0,97$ 

V tabulkách 6.7 a 6.8 je přehled kompenzačních výkonů pro  $\cos\varphi = -0,95$  a pro  $\cos\varphi = -0,97$ .

P[kW]	Q[kVAr]	Q <sub>komp</sub> [kVAr]				
		$\cos\varphi=0,95$	$\cos\varphi=0,97$	$\cos\varphi=1$	$\cos\varphi=-0,97$	$\cos\varphi=-0,95$
0	5,71	-5,15	-5,29	-5,71	-6,13	-6,27
100	6,31	25,97	18,30	-6,31	-30,92	-38,59
200	8,11	56,93	41,48	-8,11	-57,70	-73,15
300	11,12	86,62	63,40	-11,12	-85,64	-108,86
400	15,34	115,02	84,06	-15,34	-114,74	-145,70
500	20,75	142,16	103,47	-20,75	-144,97	-183,66
600	27,38	168,02	121,61	-27,38	-176,37	-222,78
700	35,2	192,61	138,51	-35,20	-208,91	-263,01
800	44,23	215,92	154,14	-44,23	-242,60	-304,38

Tab. 6.9 Celkový přehled kompenzačních výkonů

V tabulce 6.9 je celkový přehled potřebných kompenzačních výkonů pro různé účinníky. Z tabulky vyplývá, že celkový kompenzační rozsah je tedy 304,38kVAr kapacitního kompenzačního výkonu až 215,92kVAr induktivního dekompenzačního výkonu.



## 6.6 Návrh způsobu kompenzace

V dnešní době existuje několik způsobů kompenzace jalového výkonu. Nejrozšířenějším způsobem je použití kompenzačních rozvaděčů, které obsahují kondenzátory v několika stupních. V těchto rozvaděčích jsou i dekompenzační tlumivky. Dalším způsobem kompenzace je použití statických synchronních kompenzátorů jalového výkonu (např. STATCOM od ABB nebo STELCOM od ELCOM, a.s.). V návrzích se zabývám pouze kompenzací na straně nízkého napětí. Důvodem je potřeba velké dynamiky regulace jalového výkonu u FVE, která při kompenzaci na straně vysokého napětí není příliš dostatečná.

V mém návrhu se zaměřím na volbu kompenzačních rozvaděčů. Kompenzační a dekompenzační rozvaděče jsou připojeny paralelně. Jednotlivé stupně jsou připojovány stykači. Spínání je řízeno automaticky pomocí regulátoru jalového výkonu.

### *Dekompenzace:*

Pro volbu dekompenzačních tlumivek jsem volil výrobky firmy KBH Energy s.r.o. Výrobce nabízí tlumivky ve výrobní řadě s výkony 2kVAr až 60kVAr. Výrobní řada těchto tlumivek je uvedena v příloze A.

Jak vyplývá z tabulky 6.9, při běžném provozu bude zapotřebí přibližně 216kVAr induktivního výkonu. Dále v tabulce 6.10 jsou uvedeny hodnoty dekompenzačních tlumivek, které jsem zvolil. Pro daný transformátor jsem zvolil 11 dekompenzačních stupňů.

Typ tlumivky	$Q_{\text{komp}}$ [kVAr]
DEKOMP2	2
DEKOMP5	5
DEKOMP10	10
DEKOMP12,5	12,5
DEKOMP12,5	12,5
DEKOMP15	15
DEKOMP15	15
DEKOMP20	20
DEKOMP35	35
DEKOMP40	40
DEKOMP50	50
celkem	217

Tab. 6.10 Zvolené dekompenzační stupně

*Kompenzace:*

V případě kompenzačního výkonu je zapotřebí maximálně 305kVAr kapacitního výkonu. Opět jsem vybíral z nabídky firmy KBH Energy s.r.o. (Příloha B). Zvolil jsem kompenzační rozvaděč typu 308/7, tento rozvaděč má 7 kompenzačních stupňů po 44kVAr. Pro jemnější regulaci by se dal použít rozvaděč 330/15, který má 15 kompenzačních stupňů po 22kVAr, nebo dva rozvaděče 154/7, s kterými by se dosáhlo 14 stupňů po 22kVAr.

## Závěr

Tato práce ukázala na problematiku týkající se fotovoltaických elektráren. V dnešní době jsou FVE velmi moderní byznys i přes to, že vláda České republiky snižuje dotace na vyrobenou energii. Problémem obnovitelných zdrojů energie je fakt, že cena vyrobené energie je vyšší než tržní cena. A proto je její podpora dotována.

V teoretické části diplomové práce jsem se úvodem zabýval popisem elektrizačních soustav v České republice. Uvedl a popsal jsem zde elektrárenskou, přenosovou a distribuční soustavu. Zaznamenal jsem i druhy vedení pro tyto soustavy. Zabýval jsem se také vlastnostmi provozu uzlu sítě, s kterými se můžeme nejčastěji setkat. Dále jsem uvedl, co vše je zapotřebí udělat pro správné připojení FVE do distribuční sítě. Důležitou částí je i čtvrtá kapitola, která řeší kompenzaci nejprve komplexně a poté se zaměřením na FVE. U obnovitelných zdrojů energie je kompenzace a dekompenzace velký problém. Důvodem je nekonstantní výkon těchto zdrojů a tedy nutná regulace kompenzace.

V první části výpočtu jsem se zaměřil na volbu transformátoru pro FVE o výkonu 800kWp. Volil jsem mezi transformátory výrobců SGB, EXIMET, AREVA a KONCAR s různými ztrátami o výkonu 1MVA. Zaměřil jsem se na výhodnost koupě dražšího transformátoru, který má lepší vlastnosti. Počítal jsem náklady na provoz uvedených transformátorů po dobu 5, 7, 10 a 20 let. Maximální dobu provozu jsem zvolil proto, že životnost FVE se uvádí právě 20 let. Z výsledků je patrné, že nejdražší transformátor DOTXL od firmy SGB s kupní cenou 530 000 Kč se vyplatí už při provozu pěti let. Náklady na provoz tohoto transformátoru na 20 let činí 2 696 435 Kč. Naopak náklady na provoz transformátoru na 20 let STANDARD od firmy EXIMET (jehož kupní cena je 350 000Kč) jsou 4 918 720 Kč. To je rozdíl 2 222 285 Kč. Záleží na každém zvlášť, zda chce více investovat do transformátoru při koupi, nebo mnohonásobně víckrát při provozu.

V poslední kapitole jsem pro transformátor DOT od výrobce SGB vypočetl potřebný kompenzační výkon. Výpočty jsem prováděl pro transformátor 1MVA, který pracuje s FVE o výkonu 800kWp. Celkový kompenzační rozsah vyšel 304,38kVAr kapacitního kompenzačního výkonu až 215,92kVAr induktivního dekompenzačního výkonu. V poslední části jsem se zabýval návrhem způsobu kompenzace. Zvolil jsem kompenzační rozvaděč, ve kterém jsou umístěny jak kompenzační, tak i dekompenzační jednotky. Rozvaděč jsem vybral od výrobce KBH Energy s.r.o. Zvolil jsem jedenáctistupňovou dekompenzaci a sedmistupňovou kompenzaci (pro jemnější regulaci čtrnácti či patnáctistupňovou).

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Řez polyetylenovým kabelem vvn .....	16
Obr. 2.1 Síť s izolovaným uzlem při poruše .....	19
Obr. 2.2 Síť s uzlem uzemněným přes tlumivku při poruše .....	20
Obr. 2.3 Síť s uzlem uzemněným přes odpor při poruše .....	21
Obr. 2.4 Jednofázový zkrat .....	22
Obr. 4.1 Dekompenzační tlumivka.....	31
Obr. 5.1 Závislost ztrát na proudu u transformátorů ELIN a DOT .....	35
Obr. 5.2 Náklady na jednotlivé typy transformátorů .....	40
Obr. 6.1 Náhradní schéma transformátoru .....	41
Obr. 6.3 Náhradní schéma s komplexními impedancemi a admitancemi .....	42

## Seznam tabulek

Tab. 5.1 Parametry transformátorů .....	35
Tab. 5.2 Olejové transformátory 1000kVA .....	36
Tab. 5.3 Náklady za 5 let provozu .....	37
Tab. 5.4 Náklady za 7 let provozu.....	38
Tab. 5.5 Náklady za 10 let provozu .....	38
Tab. 5.6 Náklady za 20 let provozu .....	39
Tab. 5.7 Náklady za 5, 7, 10, 20 let provozu .....	39
Tab. 6.1 Parametry transformátoru DOT .....	40
Tab. 6.2 Celkové třífázové ztráty v závislosti na dodávaném výkonu .....	43
Tab. 6.3 Výsledné dodávané výkony z transformátoru do sítě ve spotřebičové orientaci.....	44
Tab. 6.4 Kompenzační výkony pro $\cos\varphi=1$ .....	45
Tab. 6.5 Kompenzační výkony pro $\cos\varphi=0,95$ .....	46
Tab. 6.6 Kompenzační výkony pro $\cos\varphi=0,97$ .....	46
Tab. 6.7 Kompenzační výkony pro $\cos\varphi= -0,95$ .....	47
Tab. 6.8 Kompenzační výkony pro $\cos\varphi= -0,97$ .....	48
Tab. 6.9 Celkový přehled kompenzačních výkonů .....	48
Tab. 6.10 Zvolené dekompenzační stupně .....	49

## Použitá literatura

- [1] Schejbal, K.; Mertlová, J.: *Elektroenergetika II*, Skripta ZČU, 1998
- [2] Mertlová, J; Hejtmánková, P.; Tajtl, T.: *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*, Skripta ZČU Plzeň, 2004
- [3] Studijní materiály z předmětu KEE/ELS
- [4] *PowerWiki* [online]. *Zemní spojení v trojfázových soustavách*. Dostupné z WWW: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>.
- [5] Studijní materiály z předmětu KEE/EE2
- [6] Kočí, Jan. *Návrh lokální úpravy sít vn pro vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [7] Pravidla provozování distribučních soustav. In: *Energetická legislativa*.
- [8] Vyhláška .51/2006 Sb.o podmínkách připojení k elektrizační soustavě, ve znění pozdějších předpisů. In: *Energetická legislativa*. 2006.
- [9] Upozornění Energetického regulačního úřadu k přechodným ustanovením vyhlášky č. 81/2010Sb., kterou se mění vyhláška č. 51/2006 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: *Energetická legislativa*. 2010.
- [10] Pravidla pro paralelní provoz zdrojů provozovatele distribuční soustavy příloha č.4
- [11] Buršík, Martin. *Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny-návrh lokální úpravy sítě vn*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [12] Molnár, M.: *Zlepšení účinnosti v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků*. Teplice. Dostupné z WWW: <http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>
- [13] SOLARtechnika [online]. *Řízení účinnosti a kompenzace jalového výkonu na FVE*. Dostupné z WWW: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12010/rizeni-ucinniku-a-kompenzace-jaloveho-vykonu-na-fve.html>
- [14] Základy kompenzace. *KBH - Kompenzace jalového výkonu* - KBH Energy s. r. o. [online]. Dostupné z WWW: <http://www.kbh.cz/kompenzace/zaklady-kompenzace>

## Příloha A

### Výrobní řady tlumivek DEKOMP

Jmenovité napětí 3x400/230V, 50 Hz					
Typ tlumivky	Kompenzační výkon [kVAr]	Indukčnost cívky [mH]	Kompenzovaná kapacita [μF]	Jmenovitý proud [A]	Ztráty tlumivky [W]
DEKOMP 2	2	763,9	39,8	2,9	72
DEKOMP 5	5	305,6	99,5	7,2	155
DEKOMP 10	10	152,8	198,9	14,4	200
DEKOMP 12,5	12,5	122,2	248,7	18	230
DEKOMP 15	15	101,9	298,3	21,6	350
DEKOMP 20	20	76,4	397,9	28,9	400
DEKOMP 25	25	61,1	497,5	36,1	450
DEKOMP 30	30	50,9	597,2	43,3	520
DEKOMP 35	35	43,7	695,6	50,5	530
DEKOMP 40	40	38,2	795,7	57,7	610
DEKOMP 45	45	34	894	64,9	680
DEKOMP 50	50	30,6	993,3	72,2	750
DEKOMP 55	55	27,8	1093,4	79,4	830
DEKOMP 60	60	25,5	1192	86,6	900

## Příloha B

### Výrobní řada kompenzačního rozvaděče

Typ	Výkon kvar	Ztrátový výkon W	Rozměr (v/š/h) v mm	Hmotnost	Přívodní pole typ	Přívodní pole rozměr	Dimenzování přívodního vedení (A)
33/3	33 (3×11)	270	2000/600/600	250	Bez přívodního pole		68
55/5	55 (5×11)	400		280			113
77/7	77 (7×11)	490		310			159
99/9	99 (9×11)	590	2000/800/600	380			204
110/5	110 (5×22)	630	2000/600/600	360			227
121/11	121 (11×11)	720	2000/800/600	400			250
154/7	154 (7×22)	850		430			317
198/9	198 (9×22)	1070	2150/800/600	500	PP-400-6	2150/ 600/600	408
242/11	242 (11×22)	1330		700	PP-500-6		498
264/6	264 (6×44)	1450		720	PP-630-6		544
286/13	286 (13×22)	1550	2150/2×600/600	760			589
308/7	308 (7×44)	1665		780			634
330/15	330 (15×22)	1770		850	PP-800-6		680
352/8	352 (8×44)	1880		840			725
374/17	374 (17×22)	1990	2150/600+800/600	900			770
396/9	396 (9×44)	2100		940			816
418/19	418 (19×22)	2210		990	PP-1000-6		861
440/10	440 (10×44)	2365		1010			906
484/11	484 (11×44)	2580	2150/2×800/600	1190			997
528/12	528 (12×44)	2800		1280	PP-1250-6		1088
572/13	572 (13×44)	3020	2150/800+2×600/600	1390			1178
616/14	616 (14×44)	3240		1440	PP-1600-6		1269
660/15	660 (15×44)	3460	2150/2×800+600/600	1530			1360
704/16	704 (16×44)	3680	2150/3×800/600	1680			1453