

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTRONENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza provozu fotovoltaické elektrárny
s výkonem větším než 1 MW**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš HOŘKÝ**
Osobní číslo: **E13N0041K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Analýza provozu velké fotovoltaické elektrárny s výkonem větším než 1 MW**
Zadávací 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 "Analýza provozu velké fotovoltaické elektrárny s výkonem větším než 1 MW" bude zaměřena na tyto body:

1. Zpracujte optimalizaci provozu takovéto fotovoltaické elektrárny.
2. Zpracujte informaci o způsobu minimalizace ztrát této fotovoltaické elektrárny.
3. Proveďte výpočty změny účinnosti v závislosti na dodávaném výkonu.
4. Vypočtete velikosti nabíjecích proudů, navrhnete kompenzaci a řízení účiníku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Skripta z předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.
2. Platné ČN.
3. Internetové podklady.
4. Dle uvážení a pokynů udá sám konzultant.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je analýzou provozu velké fotovoltaické elektrárny se zaměřením zejména na vyšetření napěťových a proudových poměrů v transformačním obvodu elektrárny. Základním nástrojem pro vyřešení úkolů zadání je matematický model, který byl sestaven pro všechny významné prvky elektrárny. Model byl dále využit pro simulaci napěťových a proudových poměrů při jednotlivých výkonových úrovních výroby. V práci jsou takto stanoveny nabíjecí proudy a dodávka činného a jalového výkonu při různých výkonových úrovních výroby v elektrárně. Zvláštní pozornost je věnována účinnosti dodávaného výkonu a změnám jeho charakteru. V práci jsou stanoveny potřebné kompenzační výkony a navrženo technické řešení kompenzace pro dosažení požadovaných účinností. Závěrečná část je věnována účinnosti přeměny energie v elektrárně a možnostem jejího zvýšení.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, účinnost, ztráty, kompenzace, nabíjecí proudy, výkon elektrárny

Abstract

The master theses presents the analysis of the big photovoltaic power plant with focus to analyze the current and voltage situation in the transformation circuit of the plant. As the basic tool for solving of the given tasks was chosen the mathematical model of all important electrical parts of the power plant. This model was used for simulation of currents and voltages in the power plant circuit. There are also determined the charging currents and supply of active and reactive power at changing levels of the photovoltaic power as well. Special focus was given at parameters of the output power and their changes. In the thesis are calculated the necessary compensation powers and is proposed the compensation of the power factor. Final part describes the efficiency of energy transformation and possibilities of its optimization.

Key words

Photovoltaic power plant, efficiency, power factor, compensation, charging currents, power of the power plant

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 30.4.2015

Lukáš Hořký

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. a konzultantovi práce za Ing. Františku Žákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	8
1. LEGISLATIVNÍ A TECHNICKÉ PROSTŘEDÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY	12
1.1 LEGISLATIVA	12
1.1.1 <i>Zákonné předpisy</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Podzákonné přepisy – regulatorní a prováděcí vyhlášky</i>	<i>12</i>
1.2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	13
1.2.1 <i>Přenosová soustava a způsob provozu.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Distribuční soustava a způsob provozu.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Vlastnosti venkovních vedení</i>	<i>18</i>
1.2.4 <i>Vlastnosti kabelových vedení</i>	<i>18</i>
1.3 REGULACE	19
1.3.1 <i>Principy regulace</i>	<i>19</i>
1.3.2 <i>Regulace fotovoltaických elektráren.....</i>	<i>20</i>
2. FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	22
2.1 PRINCIP ČINNOSTI A VÝVOJ	22
2.2 FOTOVOLTAICKÉ PANELE	24
2.2.1 <i>Monokrystalické panely</i>	<i>24</i>
2.2.2 <i>Polykrystalické panely</i>	<i>25</i>
2.2.3 <i>Ostatní typy</i>	<i>25</i>
2.3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A ÚČINNOST	26
2.4 TOPOLOGIE FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	27
2.5 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA	28
3. PROVOZ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY A ÚČINNOST	30
3.1 ZPŮSOB PROVOZU FVE.....	30
3.2 PŘIPOJENÍ DO DS	31
3.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA A MATEMATICKÝ MODEL	32
3.3.1 <i>Stanovení vlastností pasivních prvků</i>	<i>33</i>

3.4	NAPĚTÍ A PROUDY V OBVODU	39
3.4.1	<i>Matematický model</i>	39
3.4.2	<i>Napětí v uzlech obvodu</i>	41
3.4.3	<i>Proudy ve větvích obvodu</i>	42
3.5	VÝKON A ZTRÁTY	43
3.6	NABÍJECÍ PROUDY	46
3.7	ÚČINNOST	47
4.	KOMPENZACE A OPTIMALIZACE PROVOZU	50
4.1	KOMPENZACE	50
4.1.1	<i>Metody kompenzace</i>	51
4.1.2	<i>Návrh kompenzace pro analyzovanou FVE</i>	52
4.2	OPTIMALIZACE PROVOZU	54
	ZÁVĚR.....	56
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM TABULEK	61
	PŘÍLOHY	I

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotka	Význam
FVE		Fotovoltaická elektrárna
VTE		Větrná elektrárna
OZE		Obnovitelný zdroj energie
FV		Fotovoltaický
HDO		Hromadné dálkové ovládání
PS		Přenosová soustava
DS		Distribuční soustava
VN		Vysoké napětí
NN		Nízké napětí
ERU		Energetický regulační úřad
PPDS		Pravidla provozování distribučních soustav
DTS		Distribuční trafostanice
UCTE		Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
R	(Ω)	Činný odpor
R_v	(Ω)	Činný odpor vedení
R_k	(Ω)	Činný vodičů v transformátoru
R_0	(Ω)	Odpor reprezentující ztráty v železe transformátoru.
G	(S)	Svod
L	(H)	Indukčnost
L_v	(H)	Indukčnost vedení
X_L	(Ω)	Induktivní reaktance
X_{LV}	(Ω)	Induktivní reaktance vedení
X_k	(Ω)	Magnetizační reaktance transformátoru
X_0	(Ω)	Rozptylová reaktance transformátoru
C	(C)	Kapacita
C_v	(C)	Kapacita vedení
B_C	(S)	Kapacitní susceptance
$\cos \varphi$	(-)	Účinník
Z, \bar{Z}	(Ω)	Impedance, Komplexní impedance
Z_{NN}	(Ω)	Impedance kabelu nízkého napětí

Z_{VN}	(Ω)	Impedance kabelu vysokého napětí
Z_V	(Ω)	Impedance kabelu vysokého napětí do rozvodny vn/vvn
Z_T	(Ω)	Podélná impedance transformátoru
Z_{T2}	(Ω)	Podélná impedance transformátoru v rozvodně vn/vvn
Y, \bar{Y}	(S)	Admitance, Komplexní admitance
Y_{NN0}	(S)	Příčná admitance kabelu nízkého napětí
Y_{VN0}	(S)	Příčná admitance kabelu vysokého napětí
Y_{T0}	(S)	Příčná admitance transformátoru
Y_{VN0}	(S)	Příčná admitance vn kabelu do rozvodny vn/vvn
I, \bar{I}, \bar{I}^*	(A)	Proud – velikost, komplexní tvar, komplexně sdruž. tvar
U, \bar{U}, \bar{U}^*	(V)	Napětí – velikost, komplexní tvar, komplexně sdruž. tvar
U_{N1}, U_{N2}	(V)	Jmenovité napětí transformátoru
U_1, U_2, U_2	(V)	Napětí v jednotlivých uzlech výpočtového obvodu
U_s	(V)	Napětí nadřazené soustavy
S, P, Q	(VA, W, VAr)	Zdánlivý, činný a jalový výkon
$\Delta P_0, \Delta P_k$	(W)	Činné ztráty naprázdno a nakrátko
u_k, i_0	(p.j.)	Napětí nakrátko a proud naprázdno
p	(-)	Převod transformátoru
ω	(rad/s)	Úhlová rychlost
W_p	(W)	Watt-peak – jednotka, ve které se udává špičkový výkon

1. Legislativní a technické prostředí elektrizační soustavy České republiky

1.1 Legislativa

1.1.1 Zákoné předpisy

Energetické prostředí České republiky se kromě obecných právních předpisů řídí především zákonem č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon. Tento zákon nastavuje základní pravidla pro výrobce, distributory, obchodníky i zákazníky odebírající elektřinu, plyn a teplo. Zákon zároveň vymezuje působnost Energetické regulačního úřadu, jako nezávislého orgánu provádějícího regulaci a dohled nad trhem s energiemi.

Speciálně oblast obnovitelných zdrojů upravují ještě zákony 165/2012 Sb. O podporovaných zdrojích energie a zákon 180/2005 o podpoře výroby elektřiny z OZE.

1.1.2 Podzákoné předpisy – regulatorní a prováděcí vyhlášky

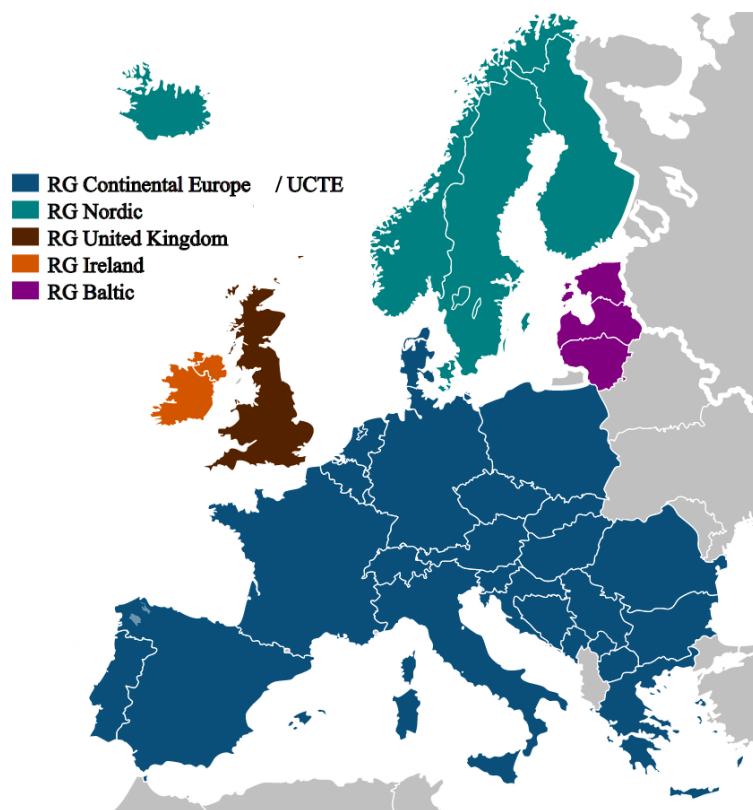
K výše zmíněnému energetickému zákonu existuje řada podzákoných předpisů, především prováděcích vyhlášek vydávaných Ministerstvem průmyslu a obchodu a nařízení ERU. Jedná se zejména o následující vyhlášky:

1. Vyhlášku o 541/2005 „o Pravidlech trhu s elektřinou“, která upravuje zejména oblast fungování vlastního trhu s elektřinou organizovaného společnostmi OTE ČR a také oblast procesů nutných ke změně dodavatele elektřiny ze strany zákazníka.
2. 540/2005 „O kvalitě dodávek elektřiny“
3. 51/2006 „O podmínkách připojení k elektrizační soustavě“
4. 401/2010 O obsahových náležitostech Pravidel provozování distribuční soustavy (PPDS) na základě které pak jednotlivý provozovatelé distribuční soustavy vydávají stejnojmenný dokumenty, který popisuje všechny detailní podmínky pro připojení a povinnosti pro subjekty připojené k DS. Pro oblast FVE je nejdůležitější příloha č. 4 k tomuto dokumentu, které detailně specifikuje proces povolování připojení FVE, vypracování studie připojitelnosti a všechny další podmínky provozu zdroje paralelně s distribuční sítí.

Na tyto předpisy ještě navazují stanoviska a cenová rozhodnutí ERU, kterým stanovuje např. regulované ceny za distribuci, výkupní ceny elektřiny z OZE a podobně.

1.2 Elektrizační soustava

Aktuální stav elektrizační soustavy České republiky ale v podstatě stejně tak celé Evropy je výsledkem přibližně stoletého vývoje. Tento vývoj měl ale několik odlišných fází. V počátcích elektrifikace byly základními prvky soustavy malé lokální zdroje, připojené samostatným vedením k nějaké stejně lokální spotřebě. S rozvojem spotřeby



obr. 1 : Mapa členů ENTSO-E [5]

domácností a průmyslu byly stavěny stále větší a výkonnější zdroje a docházelo k stále většímu propojování takových lokálních soustav mezi sebou. Tento vývoj vedl v druhé polovině 20. století k vytvoření propojených synchronně pracujících soustav na území celých skupin států (státy Varšavská smlouvy, západní Evropa, severní Evropa). Vrcholem tohoto propojování bylo na přelomu tisíciletí sdružení většiny evropských zemí do

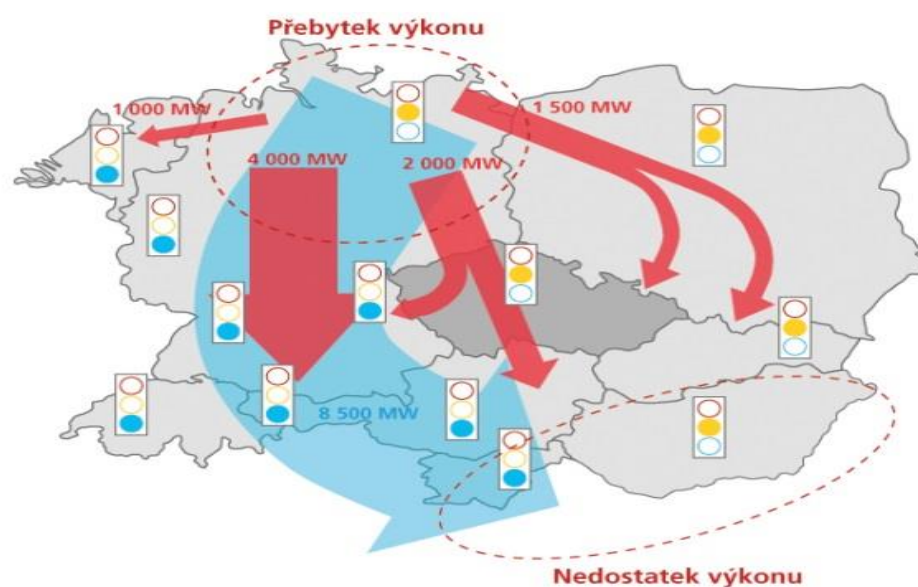
synchronně pracující soustavy sdružení UCTE. Dnešním pokračovatelem je sdružení **ENTSO-E** (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*) sdružující všechny členy EU a některé další státy. Sdružení obsahuje několik regionálních synchronně pracujících skupin. Česká republika je součástí regionu kontinentální Evropy.

Všechny, po celou dobu budované, elektrizační soustavy byly projektovány s obdobnou logikou. Základem byly přenosové soustavy, zajišťující přenos a přerozdělování výkonu z do nich připojených velkých zdrojů (stovky až tisíce MW

výkonu). Z přenosových soustav jsou napájeny distribuční soustavy, realizované jako paprskové. Objem výroby a spotřeby v jednotlivých geografických oblastech byl stálý a mohlo mu být přizpůsobeno dimenzování těchto sítí. Stávající architektura tedy počítala s tokem výkonu především jedním směrem od velkých, dobře regulovatelných a vysoce centralizovaných zdrojů, směrem do distribučních soustav a dále ke spotřebitelům. Přenos výkonu v distribučních soustavách byl takřka výhradně jednosměrný.

Rozvoj obnovitelných zdrojů na začátku nového tisíciletí, zejména fotovoltaických elektráren, větrných elektráren a v poslední době i bioplynových stanic a různých kogeneračních jednotek, přinesl nutnost přizpůsobit se při provozu elektrizační soustavy novým skutečnostem, z nichž nejdůležitější jsou:

- **Decentralizace výroby:** Vzniká velké množství výroben elektřiny, které jsou dislokovány obecně kdekoli, i v místech, kde dříve byla čistá spotřeba (rodinné domy). Počet těchto zdrojů je v řádu tisíců a desítek tisíc a jsou připojovány zejména do sítí NN a do sítí VN distribuční soustavy. V místech s vysokou koncentrací takových zdrojů, nebo v případě velkých zdrojů dochází ke změně směru toku výkonu v distribučních soustavách oproti minulosti.
- **Dislokace zdrojů a spotřebičů:** Rozvoj obnovitelných zdrojů energie v posledních letech byl nejsilnější tam, kde byla nejvhodnější kombinace politických, ekonomických a přírodních podmínek. Výsledkem je vysoká koncentrace obnovitelných zdrojů v určitých částech Evropy (VTE- sever Německa, Beneluxu, FVE – Německo, ČR). V posledních několika letech dochází k situacím, kdy



obr. 2 : Toky energie v Evropě [9]

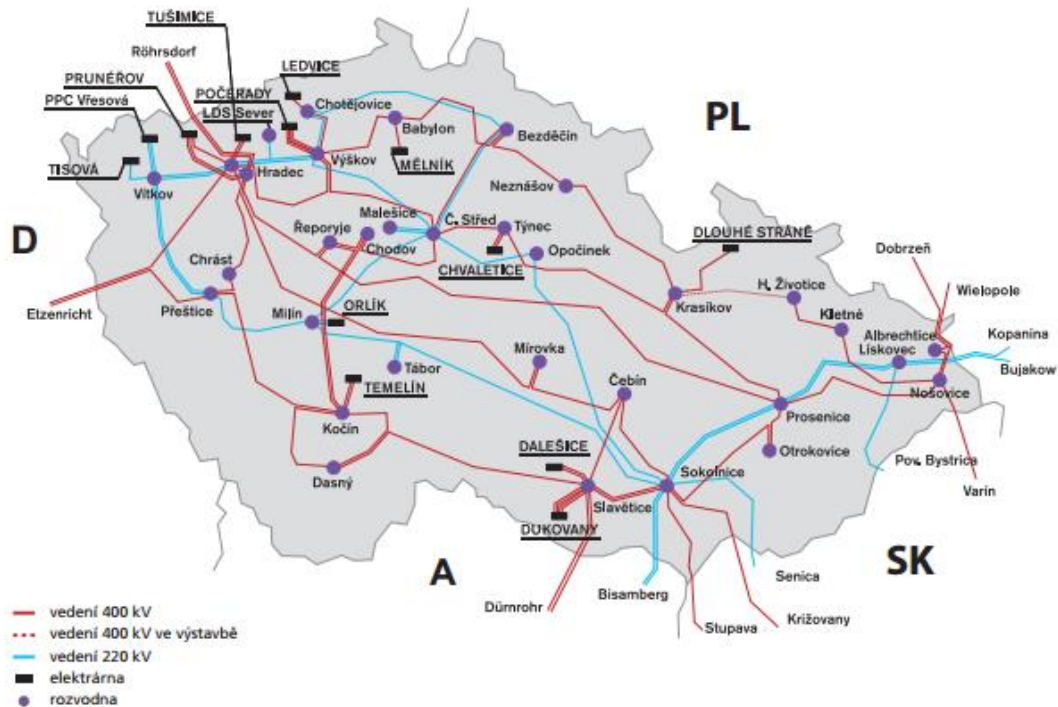
vlivem počasí (vítr, slunce) je značný přebytek výkonu v severní části evropské synchronní soustavy a ze stejných důvodů (teplo- klimatizace) nedostatek výkonu v jižní části. V takových případech je nutné transferovat velké výkony severojižním směrem prostřednictvím soustav, které na to ale nejsou dimenzovány. Dalším faktorem, který tuto skutečnost posiluje, je otevírání evropského trhu s elektřinou, který nyní umožňuje obchodní transfery výkonu napříč kontinentem.

- **Regulace:** Obecně všechny zdroje, rozšířené před nástupem FVE a VTE byly plně regulovatelné ve velkém rozsahu svého jmenovitého výkonu. Dynamika této regulace není u velkých zdrojů vysoká, ale tomu byla přizpůsobena struktura dalších zdrojů, které mají dobrou dynamiku regulace a dokázaly poskytovat dostatek systémových služeb pro zajištění chodu elektrizační soustavy. Kromě mimořádných situací (havárie, kalamity) byl vývoj potřebného výkonu v soustavě dobře predikovatelný. OZE, využívající přírodní zdroje, jsou „regulovány“ jimi. Dodávaný výkon z OZE tedy kolísá v podstatě náhodně a je nutné zcela jinak přistupovat ke strategii zajištění systémových služeb než v minulosti. V minulosti byly FVE dokonce zcela bez možnosti regulace, tu zavádí až legislativa přijatá v posledních letech (viz 1.1).

1.2.1 Přenosová soustava a způsob provozu

Přenosová soustava České republiky je tvořena především vedením 400 kV a 220 kV a vybrané linky 110 kV a spojuje všechny oblasti s koncentrovanou výrobou (severozápadní Čechy, jaderné elektrárny) a velká sídelní nebo průmyslová centra. Prostřednictvím přenosové soustavy je realizováno i propojení do soustav sousedních států. Všechny velké zdroje, tedy tepelné elektrárny nad 200 MW, včetně jaderných, jsou připojeny do přenosové soustavy o napěťové úrovni 400 kV. Výjimku tvoří elektrárny Tisová a Vřesová, které jsou připojeny do napěťové úrovně 200 kV. Hlavní funkcí přenosové soustavy je přenos výkonu uvnitř státu a mimo a také základní regulační funkce – tedy udržení výkonové rovnováhy, resp. frekvence. Regulační funkci realizuje provozovatel přenosové soustavy ČEPS a.s. prostřednictvím nákupu regulační energie a dispečerským řízením.

Na území ČR je PS tvořena 3510 km vedení 400 kV a 1909 km vedení 200 kV; přibližně 40% těchto vedení je dvojitých případně vícenásobných tak, aby byla zajištěna vysoká spolehlivost přenosové soustavy. V 41 rozvodnách zapojených do PS pracují 4 transformátory 400/220 kV, 46 transformátorů 400/110 kV a 21 ks 220/110 kV.

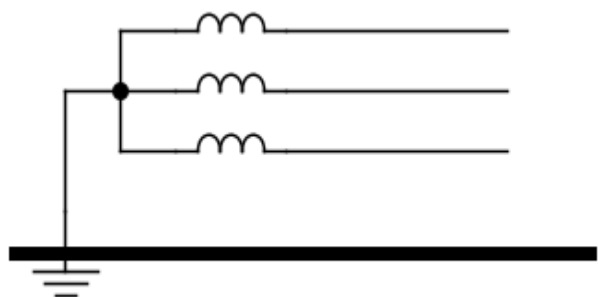


obr. 3: Mapa přenosové soustavy ČR [5]

Celkový transformační výkon transformátorů v PS je 20 380 MVA [5].

Vedení přenosové soustavy je výlučně venkovní, realizováno svazkovými vodiči, transponované a symetrizované. Soustava je provozována s účinně uzemněným uzlem, schéma tohoto provozu je na obr. 4.

Důvodem pro tento způsob provozu je zejména zajištění toho, že na jednotlivých fázích nemůže vzniknout větší než fázové napětí (na rozdíl od izolovaných nebo kompenzovaných, kde může vzniknout sružené). Dimenzování sítě – stožárů, izolátorů atd. na vyšší napětí by přineslo extrémní zvýšení nákladů. Druhou důležitou vlastností tohoto způsobu provozu je okamžitá indikace poruchy na konkrétní fázi, při které ale vznikají velké zemní proudy, proto je nutné vedení okamžitě vypnout.



obr. 4: Síť s účinně uzemněným uzlem

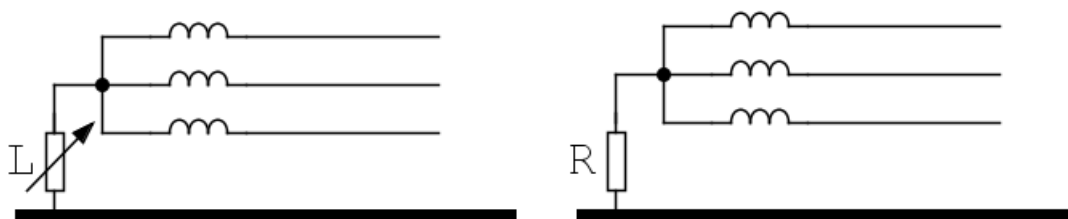
1.2.2 Distribuční soustava a způsob provozu

Distribuční soustava ČR je provozována na napětíových úrovních vvn (110 kV), vn (6, 10, 22 nebo 35 kV) a nn (0,4 kV, 0,5 kV). Celkem je k 31. 12. 2013 v provozu více

jak 13 000 kilometry vedení 110 kV a 70 000 km vedení vn a více jak 140 000 km vedení nn [5]. Provozovateli veřejných distribučních soustav v ČR jsou ČEZ Distribuce a.s., PRE Distribuce a.s. a E. ON Distribuce a.s. . Kromě sítí těchto distributorů existuje ještě řada lokálních distribučních soustav, provozovaných zejména v lokalitách dříve uzavřených průmyslových areálů. Distribuční soustava byla v minulosti určena takřka výhradně k transferu výkonu odebíraného z přenosové soustavy k odběratelům (na vn i nn). Od rozveden, z nichž ty hlavní jsou často součástí jednoho komplexu s rozvodnami přenosové soustavy je DS vn vedena jako paprsková s případnými zálohami pro důležité lokality/odběratele. Na úrovni VN, kde převládá venkovní vedení je toto vedení provozováno jako kompenzovaná neúčinně uzemněná soustava – tedy mezi uzlem transformátoru a zemí je zapojena tlumivka, která kompenzuje proudy kapacitami při případném zemním spojení. Nespornou výhodou tohoto způsobu provozu je možnost provozovat síť bez vypnutí i v případě jednofázového zemního spojení (pak jsou ale na zdravých fázích sružená napětí).

V prostředí s intenzivní zástavbou se distribuční síť na úrovni vn provozuje jako kabelová s uzlem transformátoru spojeného se zemí přes velký činný odpor. Taková konfigurace zajistí omezení poruchového proudu při spojení 1f se zemí.

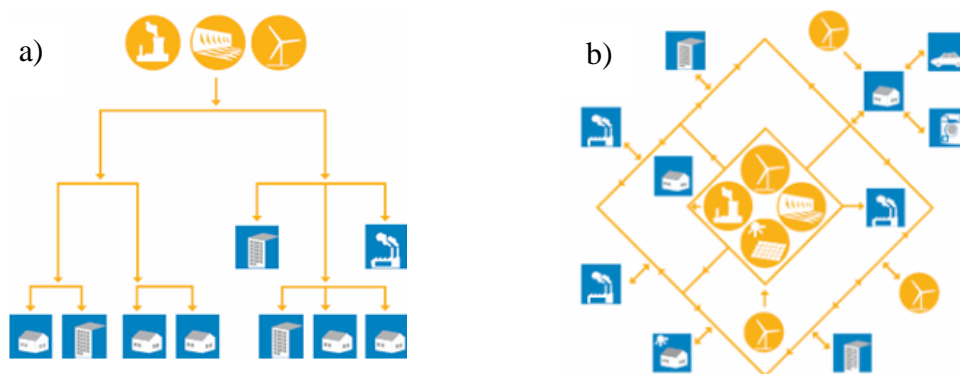
Distribuční sítě na úrovni nn jsou již ve většině kabelové a vždy mají uzemněný uzal tak, aby měl spotřebitel k dispozici i fázové napětí 0,23 kV.



obr. 5 : Síť s neúčinně uzemněným uzlem a) přes tlumivku , b) přes impedanci

Do distribuční soustavy na úrovni VN jsou nejčastěji připojeny výrobní OZE, včetně fotovoltaických elektráren. Tato skutečnost není novinkou, již dříve byla do DS připojeny např. malé vodní elektrárny, ale jejich výkon byl v porovnání se současnými FVE a VTE zanedbatelný. Skokový nárůst připojeného výkonu do DS, který často znamenal i změnu směru toku výkonu v DS, znamená potřebu přehodnotit způsob jejich provozu. V současné době probíhají úvahy o možnostech přejít z tradiční „kaskádové“ struktury na strukturu „smart grids“, ve které by kooperovali spotřebitelé a malé zdroje

a ve které by byla zajištěna automatická regulace a řízení již na lokální úrovni vn síť. Významným akumulacním prvkem v takové síti se mají stát baterie elektromobilů.



obr. 6 : Koncepte distribučních soustav a) tradiční b) smart-grid [9]

1.2.3 Vlastnosti venkovních vedení

Přenosová soustava zcela a distribuční soustava z většiny je tvořena venkovními vedeními. Vedení tvoří skupina vodičů (nejméně 3) uspořádaných v obecných ale vždy alespoň částečně souměrných geometrických uspořádáních. Pasivními parametry vodičů jsou:

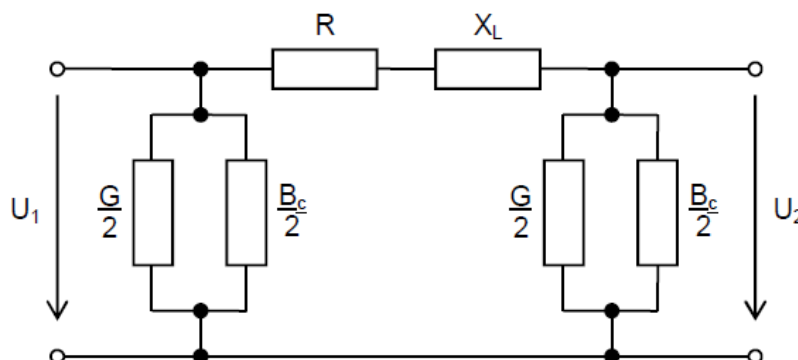
- odpor R ,
- induktivní reaktance X_L , kde se projevuje vzájemná indukčnost vodičů a která závisí na míře symetrie uspořádání,
- svod G – nedokonalost izolace
- kapacitní susceptance B_C - Kapacita vedení mezi vodiči a vůči zemi je vždy obecně nesymetrická (zem je jen v jednom směru). V případě různých výšek vodičů může být u dlouhých vedení rozdíl kapacit podstatný, proto se zejména u vedení vvn provádí symetrizace vedení transpozicí jednotlivých vodičů.

Použití venkovních vedení vyžaduje násobně nižší náklady než u kabelových, vzniká na nich více poruch vlivem atmosférických vlivů a porušováním jejich ochranných pásem, ale tyto poruchy nejsou většinou trvalé a často je lze řešit automatikou opětovného zapnutí (OZ).

1.2.4 Vlastnosti kabelových vedení

U kabelových vedení vyšetřujeme obecně stejné pasivní parametry jako u výše zmíněných venkovních. Oproti nim mají ale násobně vyšší kapacitu a proto úbytky napětí na nich vznikající a tedy i jalové ztráty jsou menší. Na druhou stranu je potřeba věnovat pozornost nabíjecím proudům těchto kabelů. Vzhledem k tomu, že kapacita je

příčným prvkem, je potřeba věnovat pozornost správné interpretaci parametrů kabelu – obecně rozložených po jeho délce. Z toho důvodu při výčtech nejčastěji kabel nahrazujeme modelem ve tvaru Π -článku, zobrazeného na obr. 7.



obr. 7 : Náhradní schéma kabelu [4]

1.3 Regulace

Primárním cílem regulace synchronně pracující elektrizační soustavy je především zajistit frekvenci v mezích (primární), zajistit napětí v mezích ve všech místech sítě (sekundární) v daných mezích a zajistit co nejekonomičtější chod a splnění ekonomických zájmů účastníků trhu, kteří soustavu používají.

1.3.1 Principy regulace

Základním principem regulace je snaha o udržení vyrovnané bilance mezi spotřebou a výrobou prvků připojených do soustavy. Obecně je této bilance možno dosáhnout:

- **Regulací na straně spotřeby**

Zde se v nejširší míře používá regulace spotřeby specifických skupin spotřebičů (topení a ohřev vody) u koncových spotřebitelů prostřednictvím systému hromadného dálkového ovládání. Ten umožňuje provozovateli soustavy přímo řídit spotřebu bázi předem stanoveného plánu i operativně. Podružným nástrojem pro regulaci spotřeby jsou tarifní podmínky pro odběratele, které je motivují k nižší spotřebě v určité denní době. Pro velké odběratele ještě existuje systém tzv. regulačních stupňů, kdy pro každý stupeň je stanovena povinnost odběratele snížit o určitou část svůj odběr.

- **Regulací na straně výroby**

Primární regulace (obnovení bilance v ES) a sekundární (obnovení frekvence a salda výkonů) je v běžných podmínkách zajišťována

automaticky změnou výkonů zdrojů – nejčastěji úpravou výkonu turbíny nebo buzení generátoru v tepelných elektrárnách. V případě dalších ručních korekcí toku výkonů ze strany dispečerů, např. pro co nejekonomičtější rozložení výkonu, hovoříme o terciální regulaci.

- **Využíváním akumulčních prvků**

Z pohledu celé soustavy jsou nejdůležitějším akumulčním prvkem přečerpávací vodní elektrárny. Lokálně mohou mít význam i elektrochemické akumulátory.

Obecně všechny dosud používané způsoby regulace předpokládají, že mohou v určitých mezích ovlivnit kromě regulace generátorů i množství primárního zdroje – páry, vody atd. Tento předpoklad v případě obnovitelných zdrojů energie neplatí.

1.3.2 Regulace fotovoltaických elektráren

V počátcích rozvoje obnovitelných zdrojů energie nebyla vůbec uvažována jejich regulace, resp. zapojení do obecné regulace soustavy (frekvence, napětí). U zdrojů nebyl regulován ani činný ani jalový výkon. Regulace ve smyslu nuceného snížení výkonu byla v podstatě zakázaná – bylo nařízeno odebrat/vykoupit vždy celý výkon, který v daném okamžiku mohla elektrárna poskytnout. Z principu zdroje plyne, že regulace směrem ke zvýšení výkonu není možná.

Enormní nárůst instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren a jejich vlivu na chod elektrizační soustavy si vynutil nutnost nastavit způsob řízení činného a jalového výkonu a u těch největších i celkového příkonu jako příspěvek k regulaci frekvence.

Obecně tuto povinnost nastavuje Energetický zákon (458/2000 Sb.) a dále ji specifikují Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS), která vydává příslušný regionální distributor, a jsou schvalována ze strany Energetického regulačního úřadu.

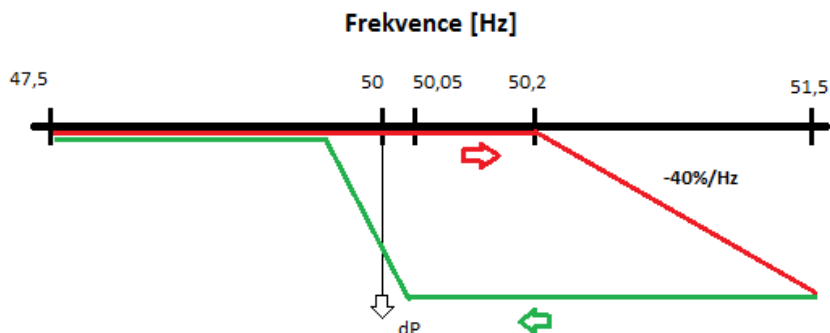
Jako příklad použiji PPDS vydané ČEZ Distribuce a.s. ve verzi 2009. Tato pravidla ve svém článku 9 Řízení jalového výkonu stanovují povinnost zajistit dodávku výkonu s účínkem v rozmezí 0,95 – 1 (induktivní – dodávka jalového výkonu) a 0,95 – 1 (kapacitní – odběr jalového výkonu). Výrobce musí být schopen zajistit alespoň jeden z následujících systémů řízení účínku [6]:

- Udržení pevné hodnoty zadaného účínku $\cos \varphi$,
- Udržování hodnoty účínku jako funkce dodávaného výkonu $\cos \varphi = f(P)$,
- Udržování zadané hodnoty jalového výkonu,
- Udržování napětí v předávacím místě.

Dále je pro obnovitelné zdroje s výkonem vyšším než 15 MW a připojovaných do sítě 110 kV požadováno řízení činného výkonu a to následujícím způsobem:

- Nastavení činného výkonu dle pokynu provozovatele distribuční soustavy (zejména při odstraňování poruch atd.) a to minimálně tempem 10% dostupného výkonu za minutu.
- Snižováním výkonu v případě nadfrekvence a to tak, že po dosažení frekvence 50,2 Hz musí být výkon snižován lineárně s gradientem 40% aktuálně dosažitelného výkonu na 1 Hz.
- Navyšovat zpět instalovaný výkon je možné jen v případě, že frekvence klesne pod 50,05 Hz.
- Při $f < 47,5$ Hz a $f > 51,5$ Hz dochází k odpojení od soustavy

Princip regulace výkonu v závislosti na frekvenci je znázorněn na obr. 8.



obr. 8 : Regulace výkonu v závislosti na frekvenci

Technicky je komunikace mezi dispečerským řízením a výrobnou realizována různými způsoby. Jednodušší řízení může být prostřednictvím HDO, komplexnější formou datového spojení s řídicí elektronikou celé výroby. U nově budovaných výroben je takové řízení už přímo integrováno.

2. Fotovoltaické elektrárny

2.1 Princip činnosti a vývoj

Fotovoltaická elektrárna je zařízení zajišťující přeměnu sluneční energie na elektrickou energii prostřednictvím fotoelektrického jevu polovodičů. Někdy jsou zaměňovány pojmy „fotovoltaická“ a „solární“. Obecně každá fotovoltaická elektrárna je solární (využívá energii slunce), ale vlastní pojem „solární“ je více užíván pro zařízení zajišťující přeměnu sluneční energie na teplo. Jsou to např.

panely zajišťující ohřev vody, nebo i elektrárny, které koncentrují sluneční energii do jednoho místa, kde je ohřívána voda, produkována pára, která dále v turbíně vyrábí elektřinu. Největší taková elektrárna má výkon 380 MW [8].

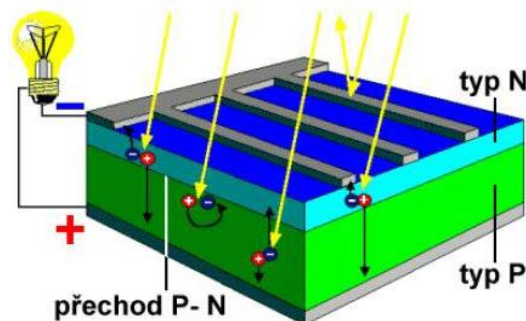
Fotovoltaická elektrárna využívá principu kdy při osvitu polovodičového (nejčastěji křemíkového) PN přechodu dojde fotony slunečního záření k uvolnění elektronů z krystalické mřížky. Tím se vytvoří volné nosiče náboje a po připojení zátěže k elektrodám vzniká stejnosměrný elektrický proud. Jednotkový článek je schopen vytvořit napětí 3 V a proud 0,5 A.



obr. 10 : FVE Olmedilla [16]

Největší fotovoltaická elektrárna současnosti je ve Španělsku u města Olmedilla de Alarcón (obr. 10), byla uvedena do provozu v roce 2008 a její výkon dosahuje 60 MW. Připravují se ale i projekty, kde se uvažuje o výkonu 80 MW a výše. Největší česká FVE je Ralsko s výkonem 38 MW.

Princip fotovoltaické článku je známý již dlouho, a je již dlouhou dobu využíván. Až do

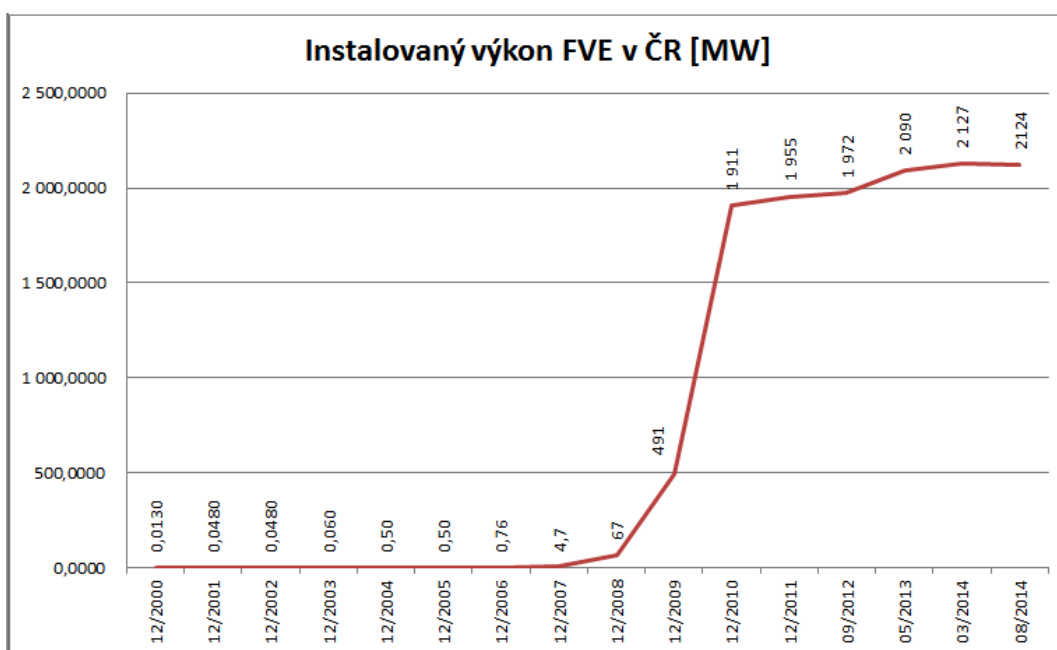


obr. 9 : FV článek [10]

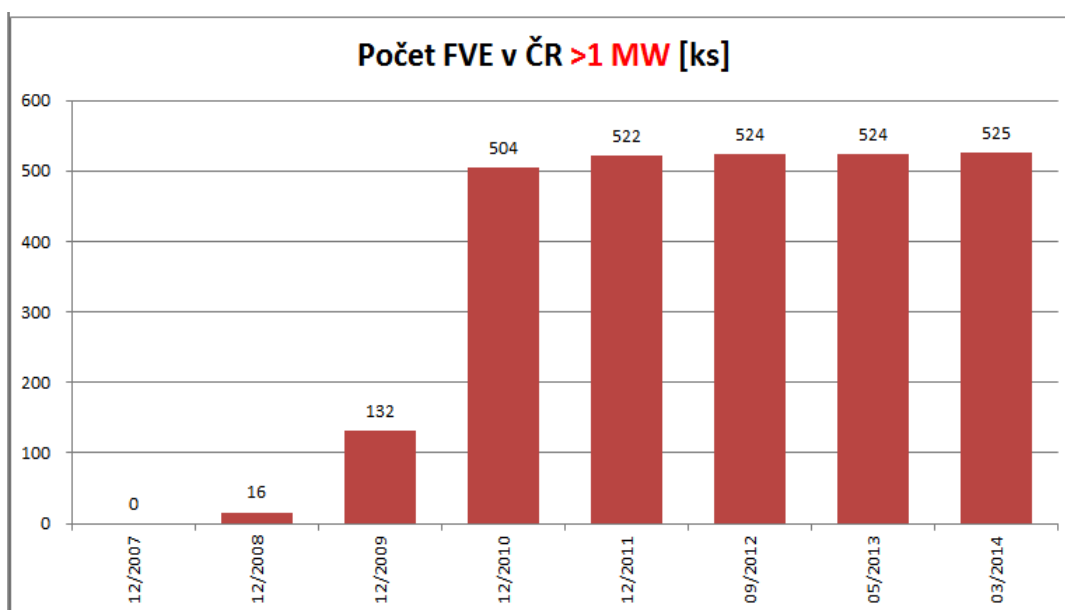
kosmického výzkumu atd.

Rozvoj výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren ve střední a západní Evropě nastal až v posledních přibližně patnácti letech. Přispěl k tomu jednak posun ve vývoji technologií, schopnost zajistit levnou výrobu FV panelů zejména ze strany Číny a v neposlední řadě politické rozhodnutí evropských států, které výrobu elektřiny začaly velmi štedře podporovat a dotovat výkupní cenu.

Jak patrné grafu na obr. 11, dramatické zvýšení instalovaného výkonu FVE v ČR proběhlo mezi lety 2008 a 2010. Obecně je to připisováno prudkému zlevnění FVE



obr. 11 : Graf instalovaného výkonu FVE v ČR [17]



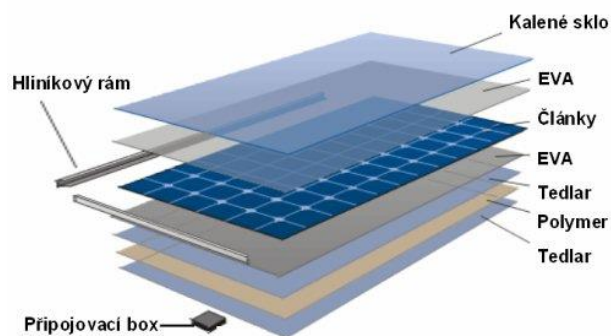
obr. 12 : Graf počtu FVE větších než 1 MW [17]

panelů a chybně nastavené státní podpore, kdy poměr mezi nimi zaručoval vysoké zisky. Polemika nad tím, zda to byla chyba nebo záměr, není předmětem této práce. Důsledky tohoto skokového nárůstu jsou řešeny ale i v dnešní době, nejen z ekonomického pohledu ale také z pohledu jak začlenit výkon této velikost a charakteru do elektrizační soustavy. V tomto období byla také postavena velkých zdrojů s výkonem nad 1MW jak je patrné z obr. 12.

2.2 Fotovoltaické panely

V praktické aplikaci v rámci FVE jsou fotovoltaické články spojovány sériově i paralelně do skupin tvořící fotovoltaické panely. Panel kromě vlastních článků obsahuje i konstrukci, na které jsou upevněné, ochranné prvky článků (*Etylen-Vinyl-Acetat*) a krytí proti atmosférickým vlivům a místo pro připojení vodičů spolu se základní ochrannou elektronikou (obtokové diody atd.).

Výkon běžně používaného panelu je 100 – 180 Wp/m², což je hodnota značící maximální výkon za podmínek, kdy sluneční záření o energii 1000 W/m² dopadá kolmo na panel při teplotě 25°C. Účinnost se tedy pohybuje v rozmezí 10 - 18%, existují ale i výjimky popsané v dalších kapitolách. [9]



obr. 13 : Konstrukce FV panelu [9]

2.2.1 Monokrystalické panely

Panely, jejichž články jsou tvořeny jedním krystalem křemíku. Tyto články se vyrábí tak, že roztavený křemík je tažen do ingotů průřezu cca 10 x 10 cm, které jsou následně řezány na tenké plátky. Taková výroba je velmi energeticky a technologicky náročná a panely vytvořené touto technologií jsou tedy velmi drahé. Jejich účinnost je však také vysoká (až 20 %), ale pouze za předpokladu, že na ně sluneční záření dopadá co nejvíce kolmo. Další dobrou vlastností tohoto typu je pomalá degradace. Vzhledem ke zmíněné vysoké ceně jsou tyto panely používány především v oblastech, kde jsou schopny trvale zajistit vysokou produkci elektřiny (oblasti bez mraků s intenzivním osvitěm).

2.2.2 Polykrystalické panely

V našich podmínkách častěji používané panely. Jejich články se skládají z mnoha neorientovaně umístěných fragmentů z krystalů křemíku. Technologie výroby a tím i cena je řádově jednodušší než v případě monokrystalických panelů. Jejich účinnost se pohybuje obvykle do 15 %, ale existují i typy s účinností až 17%. [10] Účinnost těchto panelů v prvních letech provozu klesne i o 10 %, dále již klesá pomaleji. Tyto panely jsou také méně citlivé na umístění v neideální orientaci vůči slunci. Za předpokladu omezené plochy pro FVE jsou tyto panely neekonomičtější variantou pro podmínky střední Evropy.

2.2.3 Ostatní typy

Kromě výše uvedených existují ještě další varianty FV panelů:

- **Tenkovrstvé** – Hlavním materiálem článků v panelu je amorfnní látka, tedy látka pevného skupenství, která má nepravidelnou krystalovou mřížku. Tyto panely jsou extrémně levné (uvádí se cena pod 1 USD za 1 Wp), ale mají také účinnost nižší než 10 %. Používají se zejména tam, kde už samotné umístění nezaručuje vysokou účinnost a použití účinnějších panelů by bylo neekonomické (fasády budov, střechy, různé nepravidelné povrchy).
- **Vysoce účinné panely** – panely obvykle složené z několika vrstev, účinnost překračuje i 20% a používají se tam, kde je k dispozici velmi intenzivní zdroj záření – typicky s použitím koncentrátorových zrcadel. U těchto typů je nutné chlazení.



obr. 14 : FV Panely. Zleva: amorfnní - polykrystal. - monokrystal. - velkoplošný monokrystal [15]

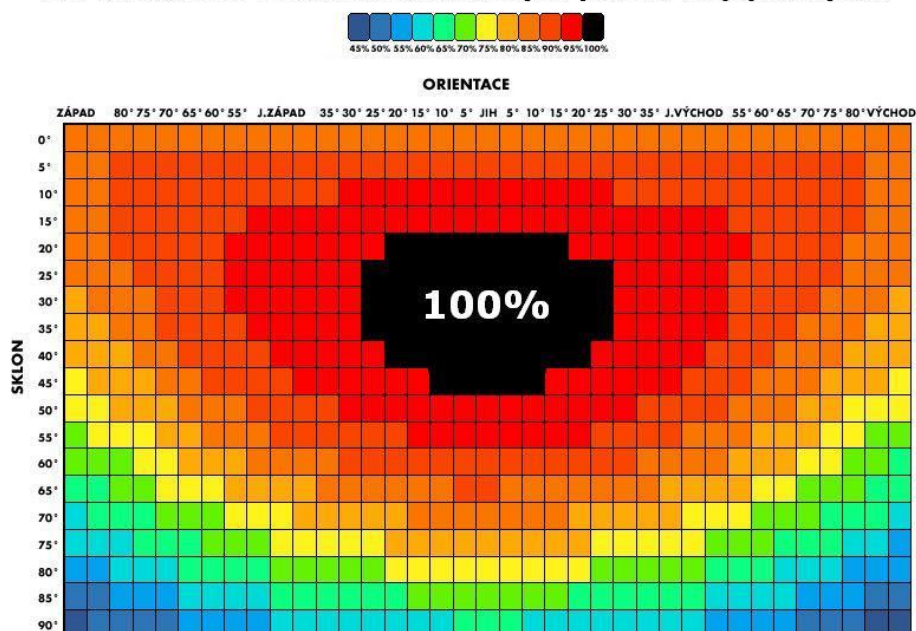
2.3 Konstrukční řešení a účinnost

Vlastní FV panely jsou instalovány na různé druhy konstrukcí. Můžou být integrovány do objektu, na kterém jsou umístěny, nebo stojí na volném terénu. Hlavní úlohou volně umístěných konstrukcí, je zajistit kromě vlastní stability co nejlepší orientaci panelu. Existuje několik pohledů na ideální orientaci panelu:

- Horizontálně musí být každý panel umístěn co nejpřesněji na jih. Odchylka směrem na jiho-východ nebo jiho-západ znamená ztrátu výkonu cca 5%.
- Vertikální umístění závisí na převažujícím využití panelu. Pokud se jedná o elektrárnu, jejímž cílem je maximalizace vyprodukované elektřiny, je potřeba, aby byl panel umístěn ve sklonu 32 %. To je ideální sklon v letním období, kdy na něj dopadá většina slunečního záření. Pokud slouží FVE k ostrovnímu provozu nějakého odběru a je tedy cílem maximalizace okamžitého výkonu v průběhu celého roku, doporučuje se sklon 49%, který dokáže využít i sluneční záření v zimních měsících, kdy je slunce nízko nad obzorem. [11]

Jiný sklon může znamenat pokles výkonu o 20% i více, jak demonstruje diagram na obr. 15.

Vliv orientace a sklonu fotovoltaických panelů na jejich výkon



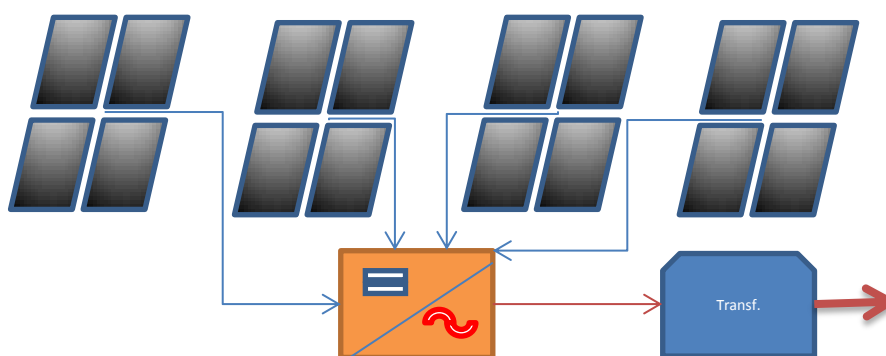
obr. 15 : Vliv umístění FV panelu na jeho výkon [12]

Kromě stacionárních konstrukcí existují i konstrukce, které umožňují zvyšovat výkon panelu jeho natáčením směrem ke slunci. Tato funkce se nazývá SunTracker. V našich podmínkách není ale příliš používáno, pravděpodobně proto, že ekonomický přínos by nevyrovnal zvýšenou investici a pravděpodobně také proto, že velké FVE byly budovány velmi rychle a bylo zapotřebí použít co nejjednodušší postupy.

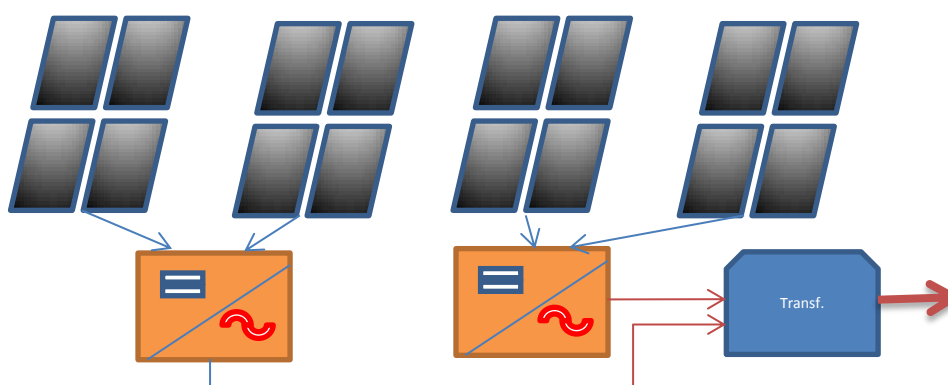
2.4 Topologie fotovoltaické elektrárny

Elektrárny do výkonu v řádu desítek kW jsou vždy tvořeny sadou panelů a jedním centrálním technologickým blokem, zajišťujícím transformaci: střídač – vedení - transformátor-vedení, které končí předávacím místem. Výjimku tvoří pouze případy, kdy terén, na kterém je FVE umístěna vyžaduje jiné řešení

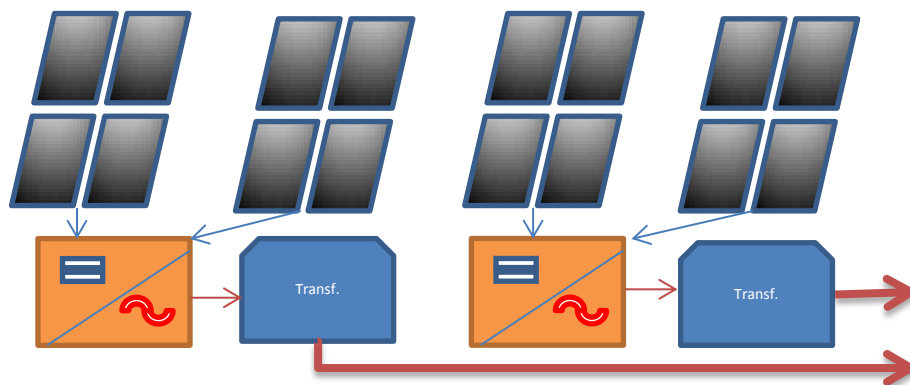
FVE výkonů řádů 100 kW a výše jsou již děleny do více sekcí, kdy každá má samostatný centrální střídač a může mít i samostatný transformátor. Varianty řešení jsou znázorněny na obr. 16, obr. 17 a obr. 18.



obr. 16 : FVE s centrálním střídačem a transformátorem



obr. 17 : FVE se skupinovými střídači a centrálním transformátorem



obr. 18 : FVE se skupinovými střídači a transformátorem

To, jaká varianta bude pro konkrétní elektrárnu zvolena, závisí na řadě hledisek, ale všechny vedou k zajištění maximální účinnosti a minimálních investičních nákladů.

Skutečnosti, které je potřeba vzít do úvahy při návrhu jsou:

- tvar pozemku FVE a jeho specifika, umístění předávacího místa,
- možné umístění technologie (zabezpečení, přístup atd.),
- dostupné výkony transformátorů (výkonové řady) a střídačů,
- očekávaný průběh výkonu v časovém období.

Obecně výhodou více centralizované varianty je nižší investiční náročnost a dosažení vyšší účinnosti lepším vytížením střídače a transformátoru, nevýhodou naopak vyšší ztráty v dlouhých kabelech a především riziko ztráty celého výkonu při poruše jednoho prvku. V analyzované FVE uvažují dva identické bloky o výkonu 550 kWp, každý s centrálním střídačem a vlastním transformátorem 630 kVA spojené v předávacím místě – rozvaděči VN.

2.5 Výkonová elektronika

Základním transformačním prvkem elektrárny je střídač. Na jeho kvalitě závisí spolehlivost provozu a na jeho účinnosti celkový výkon, který se podaří transformovat a následně prodat. Obecně je střídač tvořen řídicí jednotkou, spínacími polovodičovými prvky a částí zajišťující úpravu výstupního napětí (filtry harmonických, nesymetrií atd.).

Z pohledu mé analýzy jsou nejdůležitějšími vlastnosti střídače jeho impedance, kterou vyšetřuji v kapitole 3.3.1.4 a také účinnost.

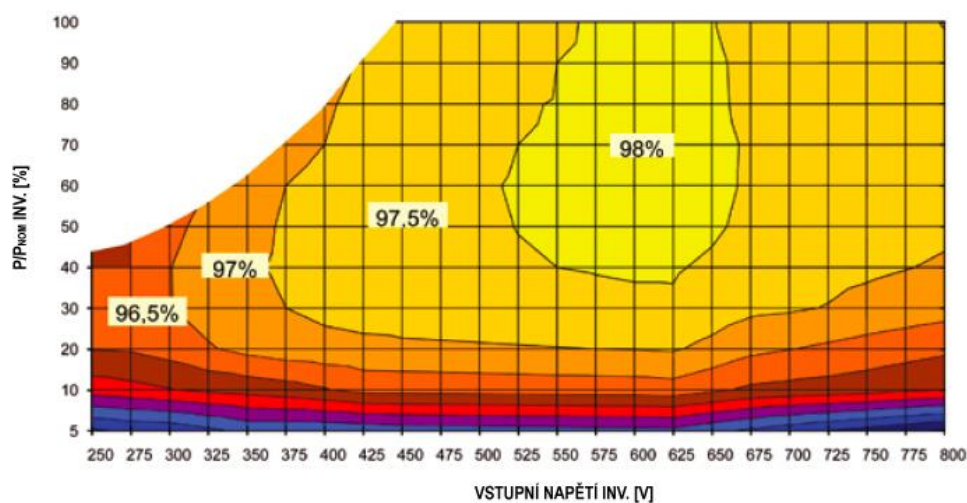
Obecně může účinnost střídače dosahovat 99%, ale to platí pouze pro ideální podmínky. Střídač má tuto nejvyšší účinnost v případě, kdy vstupní napětí stejnosměrné strany je v oblasti 60-80% maximálního vstupního napětí a zároveň vstupní příkon je

vyšší než cca 50% jmenovitého příkonu. Závislost účinnosti střídače na vstupním napětí a příkonu je znázorněna na obr. 20.

Vstupní napětí lze regulovat změnou vstupní impedance. Všechny současné moderní střídače pro FVE mají zabudovanou funkci „MPP tracker“ tedy „sledovač bodu maximálního výkonu“, která analyzuje hodnoty vstupního výkonu a proudu a v reálném čase upravuje vstupní impedanci tak, aby bylo napětí co nepříznivější pro účinnost.



obr. 19 : Střídač 630 W firmy SMA [13]



obr. 20 : Závislost účinnosti střídače na příkonu a napětí [14]

Deklarovaná maximální účinnost není samozřejmě reálně dosažitelná. Pro porovnání jednotlivých modelů byly zavedeny další parametry, jako „evropská účinnost“ a „účinnost CEC“. Evropská účinnost má simulovat provoz střídače v typických podmínkách evropského kontinentu a je definována jako součet účinností při různých zatíženích s různou vahou. Obdobným způsobem je definována účinnost CEC, které je vztažena k jihozápadu Spojených států amerických (CEC = California energy comission).

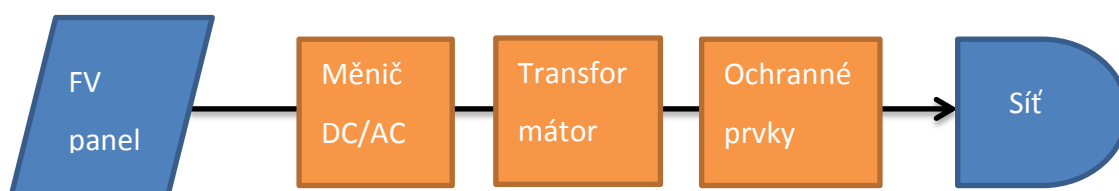
V katalogových listech střídačů pak běžně najdeme hodnoty účinnosti pro všechny tři metody jejího určení např. ve výši 98,6 % / 98,4 % / 98,5 % (max. , Euro, CEC). [13]

3. Provoz fotovoltaické elektrárny a její účinnost

3.1 Způsob provozu FVE

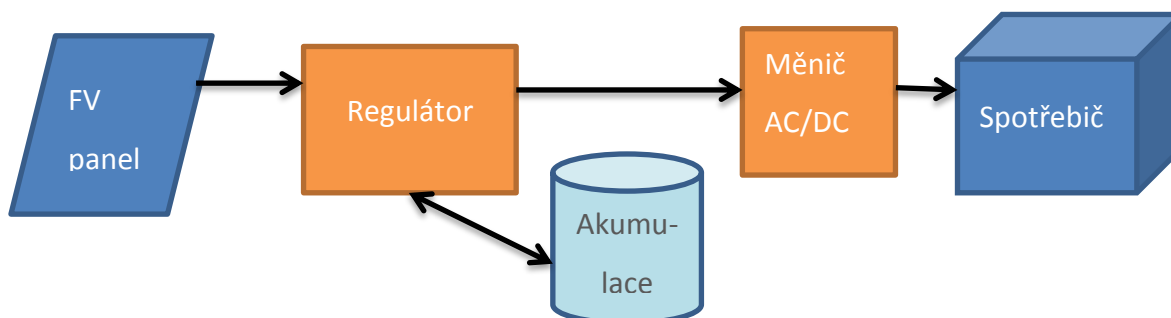
Fotovoltaická elektrárna může pracovat buď jako zdroj energie pro ostrovní systém (tzv. GRID-OFF) nebo jako zdroj připojený a paralelně pracující s elektrizační soustavou.

FV elektrárny s výkonem větším než 1 MW jsou komerční zdroje, jejichž účelem je generovat zisk prodejem elektřiny za dotované ceny, proto jsou vždy provozovány jako GRID-ON. Základními funkční bloky takového systému jsou znázorněny na obr. 21 a detailně se jimi zabývám ve dalších částech své práce.



obr. 21 : Blokové schéma GRID-ON systému

Systémy GRID-OFF jsou obvykle řádově menších výkonů a slouží většinou jako zdroj energie v místech, kde veřejná síť není dostupná.



obr. 22 : Blokové schéma GRID-OFF systému

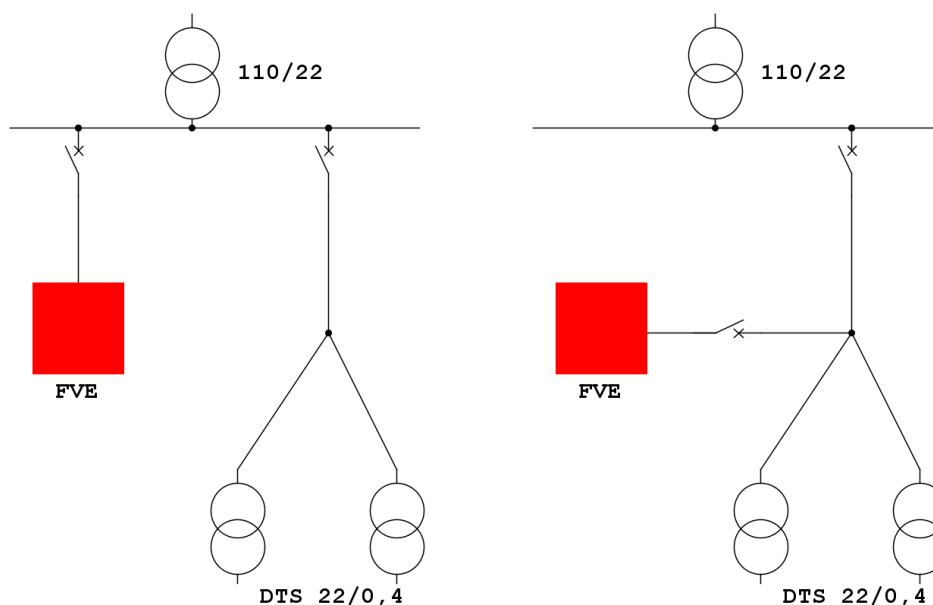
Článkem, který nejvíce omezuje využití ostrovních provozů, jsou akumulční prvky. V současné době se v podstatě výhradně používají elektrochemické akumulátory, které ale pravděpodobně dosáhly svého technologického maxima co do hustoty uskladněné energie. V současné době proto probíhá hledání alternativ. Jednou z nejperspektivnějších alternativ se zdá být využití vodíku, které aktuálně pro tento účel zkoumá např. Ústav jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. (Uvažovaný princip předpokládá využití nespotebované elektřiny z FVE k elektrolytické výrobě vodíku, jeho skladování ve stlačené podobě v tlakové nádrži a následné využití v palivovém článku

pro výrobu elektřiny. Toto řešení se zdá být použitelné jak z pohledu zvládnutí technologie, tak prostorových nároků na její realizaci).

3.2 Připojení do DS

Obnovitelné zdroje energie jsou obecně připojovány do distribuční soustavy na úrovních nn (menší zdroje do výkonu řádu kW) a častěji do vn. Velké FVE a VTE se z principu staví v poměrně odlehlých lokalitách, kde není vysoká penetrace distribuční soustavou. V zásadě existují dvě varianty připojení znázorněné na obr. 23:

- Připojení na zvláštní vývod rozvodny 110/22 kV. Tento způsob je ve většině případů ekonomicky náročný, ale zajišťuje nejmenší vliv na odběratele připojené do DS.
- Připojení do bodu sítě. Nejčastější způsob řešení, je nutné věnovat zvýšenou pozornost vlivu na okolní DS.



obr. 23 : Možnosti připojení FVE do sítě

Specifickou situací je připojování FVE do koncových bodů sítě s využitím původních distribučních trafostanic například v opuštěných průmyslových nebo zemědělských areálech.

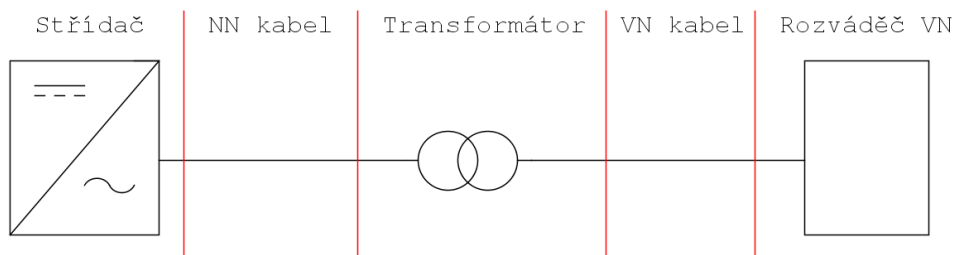
Místo připojení má zásadní vliv na kvalitu elektřiny pro odběratele připojené „dále“ na síti. Je potřeba věnovat pozornost zejména obsahu neharmonických, které se dostanou ze střídače FVE do sítě. Z pohledu úbytku napětí resp. udržení napětí v místě dodávky zákazníkům v dovolených mezích jsou vlastnosti FVE velmi nevýhodné. Výrobní špička se může krýt s jednou ze špiček spotřeby a nastat tak nejméně výhodná

situace z pohledu úbytku napětí na vedení. Tato část distribuční soustavy není obvykle vybavena pro automatickou regulaci napětí, regulace je realizována pouze manuálně – přepínáním odboček na DTS, proto je problematické reagovat na výkyvy výkonu FVE, který je obecně v rozmezí 0-100% a dynamika jeho změny může být až stovky kW / s.

3.3 Náhradní schéma a matematický model

Pro analýzu provozu fotovoltaické elektrárny je potřeba vyšetřit vlastnosti jednotlivých bloků, které tvoří základní funkční celky (střídač, transformátor) nebo na kterých lze očekávat významné jevy ovlivňující napěťové a proudové poměry v elektrárně (kabely).

Pro svoji práci uvažuji analýzu zařízení končících VN rozváděčem, ze kterého je dále připojena distribuční soustava, do které je vyváděn výkon. Vzhledem k tomu, že očekávám, že klíčovým jevem, který bude ovlivňovat provoz, budou zejména toky jalových výkonů, zanedbal jsem ve své analýze stejnosměrná vedení mezi jednotlivými FVE panely a střídačem. Předpokládám, že tyto vodiče jsou dostatečně dimenzovány tak, aby na nich nevznikaly významné ztráty z důvodu oteplení atd. Hlavními funkčními bloky tedy budou střídač, vedení nízkého napětí 0,4 kV mezi střídačem a transformátorem, transformátor a vedení vysokého napětí 22 kV mezi transformátorem a rozvodnou vysokého napětí. Schematicky je znázorněno na obr. 24. Rozváděč VN je zároveň předávacím místem.



obr. 24 : Blokové schéma FVE

V další části práce jsem provedl náhradu každého z bloků ekvivalentním elektrickým schématem, které považuji za dostatečné pro vyšetření provozních stavů elektrárny. Ve vlastním výpočtu napětí v obvodech elektrárny je zahrnuto i vedení mezi předávacím místem (rozdávěčem VN) a rozvodnou 110/23 kV a jeho impedance. Pro účely výpočtu uvažuji síť 110 kV jako dokonale tvrdý zdroj.

3.3.1 Stanovení vlastností pasivních prvků

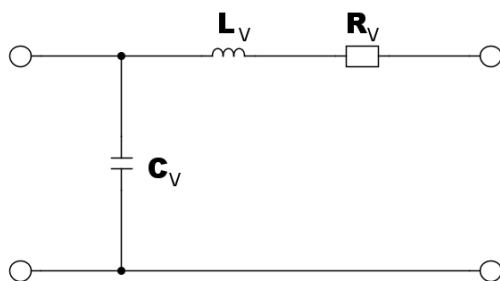
Pro budoucí výpočet napěťových a proudových poměrů v obvodu jsem stanovil elektrické vlastnosti všech pasivních prvků, které je ovlivňují. Z výpočtových důvodů podélné parametry všech prvků vyjadřuji jako komplexní impedance, příčné parametry jako komplexní admittance.

3.3.1.1 Vedení nízkého napětí

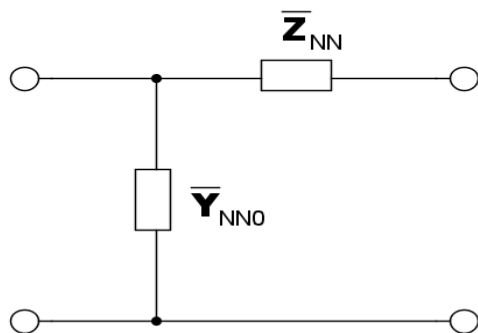
Má-li být nahrazeno obecné kabelové vedení, je potřeba v modelu, kterým jej nahrazujeme, respektovat zejména:

- odpor vodiče,
- indukčnost v podélném směru,
- kapacitu.

Dále je potřeba také respektovat délku vodiče a to, že jeho pasivní parametry jsou obecně funkcí délky a je nutné je uvažovat jako rozložené. Tato skutečnost respektuje náhradou vedení dvojbranem ve tvaru Π -článku, znázorněného na obr. 7. Konkrétně v tomto případě se ale jedná o vedení mezi střídačem a transformátorem, které je



obr. 25 : Náhradní schéma kabelu



obr. 26 : Náhradní schéma pro výpočet

obvykle velmi krátké a bylo by je možné i zanedbat. Já jsem jej ve své práci uvažoval, ale použil jsem jednodušší náhradu dvojbranem ve tvaru Γ -článku, který zjednoduší celkový výpočet. Výpočtem ověřím, zda je příspěvek NN vedení skutečně zanedbatelný. Na obr. 25 je schéma dvojbranu, který jsem pro náhradu použil. Pro výpočty jsem použil kabel 22_AXEKVCE výrobce NTK Cables, specifikovaný v příloze C, jeho parametry jsou: $C=0,5 \mu\text{F}/\text{km}$, $L=0,3 \text{mH}/\text{km}$ a $R=0,125 \Omega/\text{km}$.

Činný odpor kabelu je dán přímo jeho výrobcem v Ω / km . Pro výpočet uvažujeme velmi krátký kabel délky cca 5 m.

$$R_V = R \cdot l = 0,125 \cdot 0,005 = 0,000625 \Omega$$

Indukčnost je také udávána výrobcem

v mH/km. Nejprve jsem stanovil induktivní reaktanci jednoho km a pak celkovou

$$X_L = \omega L = 100 \pi * 0,36 * 10^{-3} = 1,13 * 10^{-1} \Omega \quad (3.1.)$$

$$X_{LV} = X_L \cdot l = 5,65 * 10^{-4} \Omega \quad (3.2.)$$

Celková podélná impedance použitá ve výpočtovém náhradním schématu obr. 26 je tedy:

$$\overline{Z_{NN}} = R_V + jX_{LV} = 0,000625 + j5,65 * 10^{-4} = 0,000625 + j0,000471 \Omega \quad (3.3.)$$

V příčném směru se bude projevovat kapacita kabelu, stanovena výrobcem v $\mu\text{F} / \text{km}$:

$$B_C = \omega C = 100 \pi 0,3 * 10^6 \text{ S} \quad (3.4.)$$

$$B_{CV} = B_C \cdot l = 7,85 * 10^{-7} \quad (3.5.)$$

Celková příčná admitance použitá ve výpočtovém náhradním schématu obr. 26 je tedy

$$\overline{Y_{NN0}} = jB_{CV} = j7,85 * 10^{-7} \text{ S}. \quad (3.6.)$$

3.3.1.2 Vedení vysokého napětí uvnitř FVE

Stanovení parametrů VN kabelu je identické jako v předchozí kapitole. Uvažuji pouze VN kabel do předávacího místa, dlouhý do 100 m, náhrada Γ -článkem bude i v tomto případě dostatečná.

Po dosazení parametrů udávaných výrobcem pro VN kabel jsou příčné a podélné parametry kabelu (přepočteno na hladinu 0,4 kV):

$$\overline{Z_{VN}} = R_V + jX_{LV} = 4,13 \cdot 10^{-6} + j 3,11 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3.7.)$$

$$\overline{Y_{VN0}} = jB_{CV} = j0,047 \text{ S} \quad (3.8.)$$

3.3.1.3 Transformátor

V rámci stanovení náhradního schématu transformátoru jsem respektoval následující vlastnosti:

- R_k** Činný odpor vodičů v induktorech,
- X_k** Magnetizační reaktance hlavního magnetického obvodu,
- X₀** Rozptylová reaktance, respektující, že se ne celý magnetický tok uzavírá hlavním obvodem,

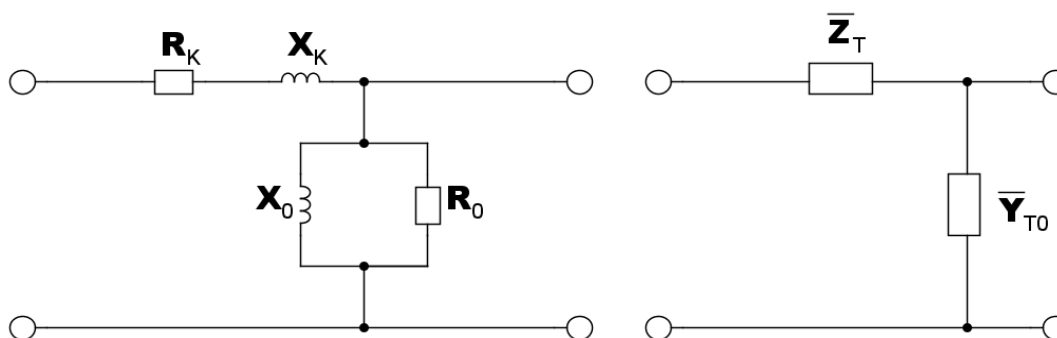
R_0 Odpor reprezentující ztráty v železe, způsobené vířivými proudy a hysterezí magnetického obvodu.

Standardně vyráběné transformátory nemají tyto hodnoty přímo uvedené v dokumentaci, ale je třeba je stanovit z hodnot, které výrobce dodal. (Zejména ztrát na prázdno a na krátko uváděného ve W a napětí na krátko a proudu na prázdno uváděného v %). Typickou sadu štítkových hodnot transformátoru uvádí Tabulka 1, kde jsou zároveň hodnoty, které používám pro výpočet transformátoru 22/0,4 kV použitého v mnou řešené elektrárně.

Parametr	Hodnota
S_n (VA)	6300000
U_{N1} (V)	22000
U_{N2} (V)	400
ΔP_0 (W)	1610
ΔP_k (W)	7010
u_k (-)	6%
i_0 (-)	0,8%
p (-)	55

Tabulka 1 : Štítek transformátoru

Pro další výpočet jsem náhradní elektrické schéma převedl na zjednodušené schéma s jednou impedancí v podélném a jednou admitancí v příčném směru. Obě schémata jsou znázorněna na obr. 27.



obr. 27 : Náhradní a výpočtové schéma transformátoru

Nejprve jsem určil podélné parametry náhradního schématu transformátoru. Impedanci lze určit přímo z napětí na krátko a činný odpor z činných ztrát na krátko.

$$Z_K = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_n} = 0,06 \cdot \frac{400^2}{63000} = 0,0149 \Omega \quad (3.9.)$$

Činný odpor z činných ztrát na krátko:

$$R_k = \Delta P_k \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 = 7010 \cdot \left(\frac{400}{63000} \right)^2 = 0,00284 \Omega \quad (3.10.)$$

Určit podélnou reaktanci je pak již triviální.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 0,0147 \Omega \quad (3.11.)$$

Celková komplexní impedance transformátoru v podélném směru je tedy :

$$\overline{Z}_T = R_k + jX_k = 0,00284 + j0,0147 \Omega \quad (3.12.)$$

Při určení parametrů v příčném směru jsem vyšel z výrobcem uváděných ztrát na prázdno a proudu na prázdno:

$$Y_0 = \frac{i_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = 0,008 \cdot \frac{63000}{400^2} = 0,0315 \text{ S} \quad (3.13.)$$

$$G_0 = \left(\frac{\Delta P_0}{U_n^2} \right) = \left(\frac{1610}{400^2} \right) = 0,0099 \text{ S} \quad (3.14.)$$

Příčná susceptance pak je:

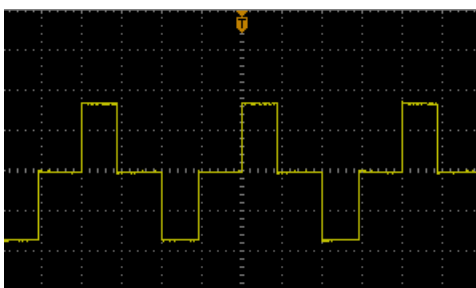
$$Y_0 = \sqrt{G_0^2 + B_0^2} \rightarrow B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} = 0,0299 \text{ S} \quad (3.15.)$$

Celková komplexní admittance transformátoru v příčném je tedy

$$\overline{Y}_{T0} = G_0 + jB_0 = 0,0315 + j0,0299 \text{ S } \Omega \quad (3.16.)$$

3.3.1.4 Střídač

Střídač je, jak jsem více popsal, komplexní zařízení výkonové elektroniky, jehož vnitřní funkční uspořádání není předmětem této práce. Princip je ale založen na



obr. 28 : Výstupní průběh proudu střídače [14]

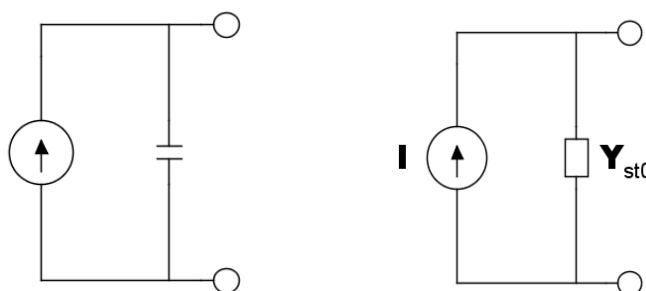
diskrétním spínání proudů a napětí, které následně vytvoří střídavý proud, který je tzv. kvazisinusový. Má správnou periodu a amplitudy ale jeho průběh je složen z obdélníků různých amplitud. Jeho extrémní varianta je zobrazena na

obr. 28.

Z pohledu harmonického rozvoje takový signál obsahuje jak žádaný sinusový signál, tak

celou řadu vyšších harmonických. Pro eliminaci těchto harmonických je do obvodu střídače řazen filtrační člen, který zajišťuje ho vyhlazení. Střídač jsem tedy nahradil proudovým zdrojem a kapacitou, která tento filtr reprezentuje.

Proud ideálního proudového zdroje bude pro mé výpočty reprezentovat výkon dodávaný střídačem do obvodu. V dalších výpočtech jsem neuvažoval vlastní spotřebu střídače, protože ta je u na trhu běžných modelů o několik řádů nižší než mnou analyzované výkony. Náhradní schéma střídače ve tvaru dvojbranu je znázorněno na obr. 29, pro výpočty bude kapacita nahrazena admitancí.

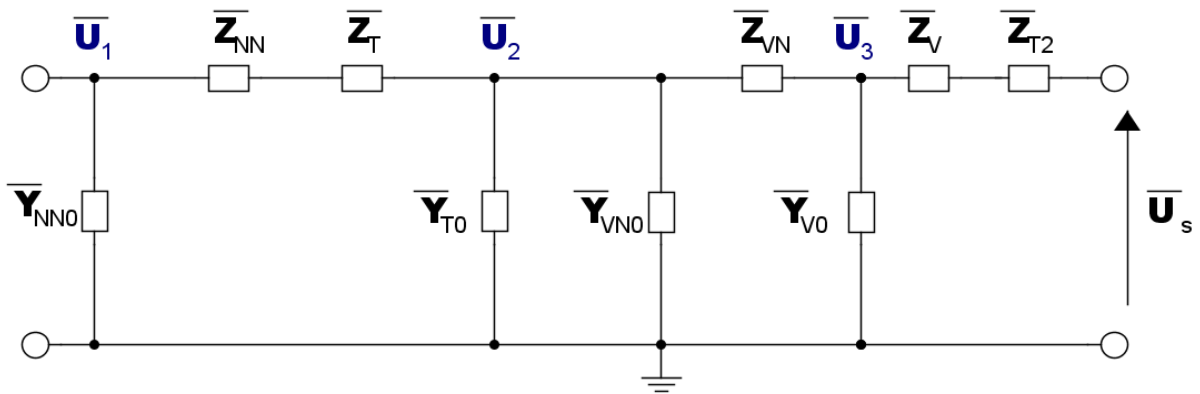


obr. 29 : Náhradní schéma střídače a schéma pro výpočet

Předpokládám, že proudový zdroj střídače dodává proud s fázovým posuvem 0° .

Vlastní kapacitu střídače by bylo nutné zjistit detailní analýzou obvodu jeho filtračního členu, parametry jeho jednotlivých prvků přitom nejsou často k dispozici. Kapacitu jsem tedy stanovil z úvahy, že v nočních hodinách bude elektrárna odebírat ze sítě jalový výkon spotřebovávaný jeho pasivními prvky. Impedance všech ostatních pasivních prvků jsem určil v předchozích kapitolách, stačí tedy stanovit jimi odebíraný výkon a ze zbývajících výkonu určit kapacitu.

Jalový výkon odebíraný v nočních hodinách je dle [7] pro elektrárnu této velikosti přibližně 30 kVar. Všechny impedance jsou přepočteny na hladinu 0,4 kV.



obr. 30 : Náhradní obvod pro stanovení kapacity střídače

Postupnou transfigurací jednotlivých sériových a paralelních větví stanovíme celkovou impedanci obvodu a následně výkon.

$$\bar{Z}_A = \bar{Z}_{NN} + \bar{Z}_T + \frac{1}{\bar{Y}_{NNO}} \qquad \bar{Y}_A = \frac{1}{\bar{Z}_A} \qquad (3.17.)$$

$$\bar{Y}_B = \bar{Y}_A + \bar{Y}_{T0} + \bar{Y}_{VNO} \qquad \bar{Z}_B = \frac{1}{\bar{Y}_B} \qquad (3.18.)$$

$$\bar{Y}_C = \frac{1}{\bar{Z}_B + \bar{Z}_{VN}} \qquad \bar{Z} = \frac{1}{\bar{Y}_C} \qquad (3.19.)$$

Po dosazení $\bar{Z} = 61,5 \angle - 52^\circ \Omega$.

Celkový proud obvodem bude pak :

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}} = \frac{230 \angle 0^\circ}{61,5 \angle - 52^\circ} = 3,74 \angle 52^\circ \text{ A} \qquad (3.20.)$$

Dále jsem stanovil napětí U_2 , což je v podstatě napětí na příčných admitancích a celkový zdánlivý výkon.

$$\bar{U}_2 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{Y}_b} = \frac{3,74 \angle 52^\circ}{0,016 \angle 52^\circ} = 230 \angle 0^\circ \text{ V} \qquad (3.21.)$$

$$\bar{S} = 3 \cdot \bar{U}_s \cdot \bar{I}_0^* = 3 \cdot 230 \cdot 3,74 \angle 52^\circ = 525,7 - j681 \text{ VA} \qquad (3.22.)$$

Činná složka reprezentuje především ztráty transformátoru naprázdno a také činné

ztráty ve VN a NN kabelu. Jalový výkon dodávaný do sítě touto částí obvodu je tedy – 681 VAr. Jak jsem uvedl výše, celkový odebíraný jalový výkon je 30 kVar, kapacita střídače tedy musí odebírat $Q_c = 29,3$ kVar. Pro zjištění velikosti kapacity je nutné stanovit ještě napětí na střídači U1, což je už triviální úloha napěťového děliče, kdy navíc už z hodnot impedancí je zřejmé že $U_1 \approx U_2$. $\bar{U}_1 = 230 \angle 0^\circ$ V

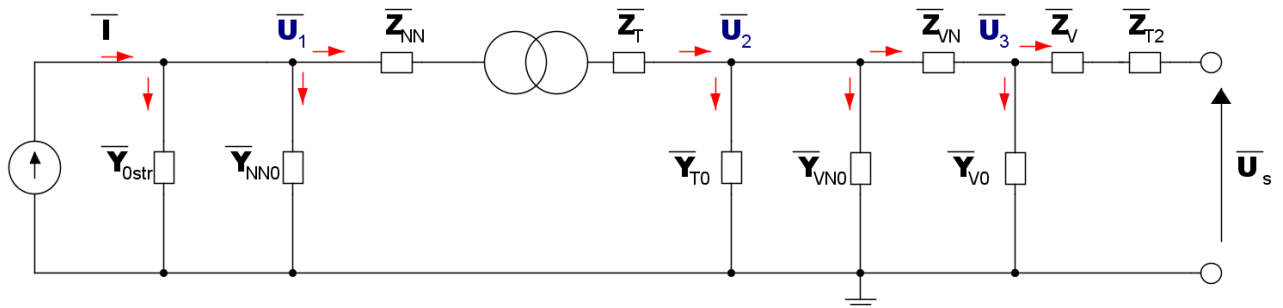
Z napětí a výkonu už stanovím admitanci kapacity střídače:

$$\bar{Y} = \frac{1}{3} Q_c \cdot \frac{1}{\bar{U} \cdot \bar{U}^*} = \frac{1}{3} \cdot 29,3 \angle 90^\circ \cdot \frac{1}{230^2} = 1,84 \angle 90^\circ \text{ S} \quad (3.23.)$$

3.4 Napětí a proudy v obvodu

3.4.1 Matematický model

Na základě stanovení náhradních schémat jednotlivých prvků jsem sestavil celkové náhradní schéma pro výpočet napěťových a proudových poměrů v obvodu, tak jak je uvedeno na obr. 31. Všechny prvky jsou přepočítány na hladinu NN. Červenou barvou jsou znázorněny směry proudů, tak jak jsem si je pro výpočet zvolil.



obr. 31 : Schéma obvodu pro výpočet

Pro stanovení proudů jednotlivých větví jsem použil metodu uzlových napětí, která při této konfiguraci obvodu vede na nejjednodušší výpočet. Uzlová napětí byla zvolena pro uzly U1, U2 a U3, označené na obr. 31. Pro tyto uzly byly sestaveny rovnice I. Kirchhoffova zákona.

$$\text{Uzel 1:} \quad \bar{I} - \bar{U}_1 \bar{Y}_{Ostr} - \bar{U}_1 \bar{Y}_{NN0} - \frac{(\bar{U}_1 - \bar{U}_2)}{\bar{Z}_{NN} + \bar{Z}_T} = 0 \quad (3.24.)$$

$$\text{Uzel 2:} \quad \frac{(\bar{U}_1 - \bar{U}_2)}{\bar{Z}_{NN} + \bar{Z}_T} - \bar{U}_2 \bar{Y}_{T0} - \bar{U}_2 \bar{Y}_{VN0} - \frac{(\bar{U}_2 - \bar{U}_3)}{\bar{Z}_{VN}} = 0 \quad (3.25.)$$

$$\text{Uzel 3: } \frac{(U_3 - U_3)}{Z_{VN}} - U_3 Y_{V0} - \frac{(U_3 - U_S)}{Z_V + Z_{T2}} = 0 \quad (3.26.)$$

Rovnice jsem upravil do tvaru

$$\text{Uzel 1: } U_1 \left(Y_{0str} + Y_{NNO} + \frac{1}{Z_{NN+Z_T}} \right) - U_2 \left(\frac{1}{Z_{NN+Z_T}} \right) = I \quad (3.27.)$$

$$\text{Uzel 2: } U_1 \left(\frac{1}{Z_{NN+Z_T}} \right) - U_2 \left(\frac{1}{Z_{NN+Z_T}} + Y_{T0} + Y_{VNO} + \frac{1}{Z_{VN}} \right) + \frac{U_3}{Z_{VN}} = 0 \quad (3.28.)$$

$$\text{Uzel 3: } U_2 \left(\frac{1}{Z_{VN}} \right) - U_3 \left(\frac{1}{Z_{VN}} + Y_{V0} + \frac{1}{Z_V + Z_{T2}} \right) = -\frac{U_S}{Z_V + Z_{T2}} \quad (3.29.)$$

Soustava rovnic pak bude mít tvar:

$$AU = B \quad (3.30.)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{0str} + Y_{NNO} + \frac{1}{Z_{NN+Z_T}} & -\frac{1}{Z_{NN+Z_T}} & 0 \\ \frac{1}{Z_{NN+Z_T}} & -\frac{1}{Z_{NN+Z_T}} - Y_{T0} - Y_{VNO} - \frac{1}{Z_{VN}} & \frac{1}{Z_{VN}} \\ 0 & \frac{1}{Z_{VN}} & \frac{1}{Z_{VN}} + Y_{V0} + \frac{1}{Z_V + Z_{T2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ -\frac{U_S}{Z_V + Z_{T2}} \end{bmatrix} \quad (3.31.)$$

Soustavu lze řešit vyčíslením jednotlivých koeficientů matice A, její inverzí a následným stanovením velikostí uzlových napětí. Je zřejmé, že velikost napětí bude závislá na proudu ze střídače, který bude parametrem řešení. Pro analytické řešení zjednodušíme zápis použitím konstant matice A, tedy

$$\begin{bmatrix} A11 & A12 & 0 \\ A21 & A22 & A23 \\ 0 & A32 & A33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ \frac{U_S}{Z_{VN}} \end{bmatrix} \quad (3.32.)$$

Výsledné hodnoty napětí jsem stanovil vyřešením této soustavy rovnic. Pro výpočet jsem napětí uvažoval ve směru orientace proudu v příčných větvích, ale skutečná orientace je opačná, proto jsou výsledkem záporné hodnoty. Pro další práci jsem orientaci napětí změnil a používám záporně vzatý výsledek výpočtů. Ten je uveden i v tabulce 2.

$$U_1 = \frac{I}{A_{11}} - \frac{A_{12}}{A_{11}} U_2 \quad (3.33.)$$

$$U_3 = \frac{U_s}{Z_V + Z_{T2}} \cdot \frac{1}{A_{33}} + \frac{A_{32}}{A_{33}} U_2 \quad (3.34.)$$

$$\overline{U}_2 = \frac{-\frac{\overline{U}_s}{Z_V + Z_{T2}} \cdot \frac{\overline{A}_{23}}{A_{33}} - I \cdot \frac{\overline{A}_{21}}{A_{11}}}{\frac{\overline{A}_{21} \overline{A}_{12}}{A_{11}} - \overline{A}_{22} + \frac{\overline{A}_{32} \overline{A}_{23}}{A_{33}}} \quad (3.35.)$$

Kde hodnoty jednotlivých konstant jsou:

$$\overline{A}_{11} = \overline{Y}_{0str} + \overline{Y}_{NN0} + \frac{1}{Z_{NN} + Z_T} \quad (3.36.)$$

$$\overline{A}_{12} = -\frac{1}{Z_{NN} + Z_T} = -\overline{A}_{21} \quad (3.37.)$$

$$\overline{A}_{22} = -\frac{1}{Z_{NN} + Z_T} - \overline{Y}_{T0} - \overline{Y}_{VNO} - \frac{1}{Z_{VN}} \quad (3.38.)$$

$$\overline{A}_{23} = \frac{1}{Z_{VN}} = \overline{A}_{32} \quad (3.38.)$$

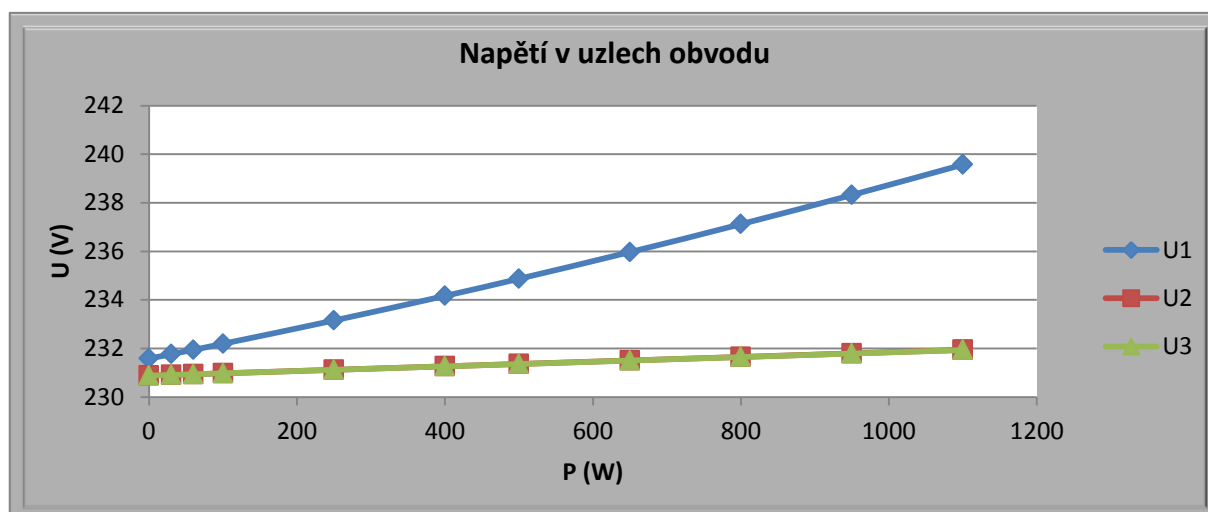
$$\overline{A}_{33} = \frac{1}{Z_{VN}} + \overline{Y}_{V0} + \frac{1}{Z_V + Z_{T2}} \quad (3.40.)$$

3.4.2 Napětí v uzlech obvodu

Jak jsem uvedl výše, jsou obě napětí závislá na proudu ze střídače, který se bude měnit s výkonem fotovoltaických panelů, resp. intenzitou jejich osvětlení. Proud stanovím z činného výkonu síťového napětí podle vztahu $I=P/3U_s$. Hodnoty uzlových napětí pro jednotlivé výkonové úrovně jsou v tabulce 2 resp. v grafu na obr. 32 .

Výkonová úroveň (kW)	U_1		U_2		U_3	
	(V)	φ (°)	(V)	φ (°)	(V)	φ (°)
a	b	c	e	e	e	f
0	231,6	-0,2	230,9	-0,1	230,9	-0,1
30	231,8	0,0	230,9	-0,1	230,9	-0,1
60	231,9	0,2	230,9	-0,1	230,9	-0,1
100	232,2	0,4	231,0	-0,1	231,0	-0,1
250	233,2	1,3	231,1	0,0	231,1	0,0
400	234,2	2,1	231,3	0,0	231,3	0,0
500	234,9	2,7	231,4	0,1	231,4	0,1
650	236,0	3,6	231,5	0,1	231,5	0,1
800	237,1	4,4	231,6	0,2	231,6	0,2
950	238,3	5,2	231,8	0,2	231,8	0,2
1100	239,6	6,0	231,9	0,3	231,9	0,3
1100	239,6	6,0	231,9	0,3	231,9	0,3

Tabulka 2 : Napětí v uzlech obvodu



obr. 32 : Graf - napětí v uzlech obvodu

Z vypočtených výsledků je patrné, že napětí U_1 (uzel za střídačem) roste lineárně se zvyšujícím se výkonem elektrárny. Napětí U_2 (VN kabel) je v podstatě konstantní, resp. mění se jen velmi málo stejně jako U_3 . Změna napětí U_2 a U_3 je způsobena úbytkem napětí na přívodním kabelu (mezi rozvodnou a předávacím místem).

3.4.3 Proudů ve větvích obvodu

Z vypočtených uzlových napětí jsem dále určil proudy v jednotlivých větvích. Směr proudů jsem zvolil dle obr. 31.

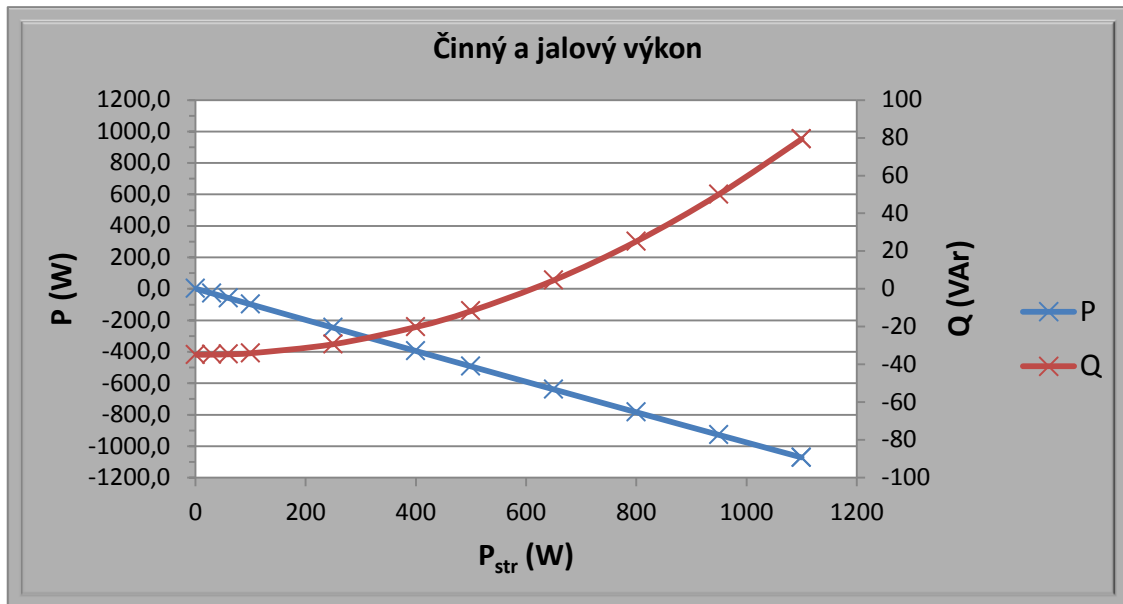
Výkonová úroveň (kW)	I_{OSTR}		I_T		I_{TO}	
	(A)	φ (°)	(A)	φ (°)	(A)	φ (°)
a	b	c	d	e	f	g
0	46,3	89,8	46,3	-90,2	7,3	-71,7
30	46,4	90,0	63,6	-46,8	7,3	-71,7
60	46,4	90,2	98,7	-28,0	7,3	-71,7
100	46,4	90,4	152,5	-17,7	7,3	-71,7
250	46,6	91,3	366,3	-7,3	7,3	-71,7
400	46,8	92,1	583,3	-4,6	7,3	-71,6
500	47,0	92,7	728,4	-3,7	7,3	-71,6
650	47,2	93,6	946,1	-2,9	7,3	-71,5
800	47,4	94,4	1164,0	-2,3	7,3	-71,4
950	47,7	95,2	1382,0	-2,0	7,3	-71,4
1100	47,9	96,1	1600,0	-1,7	7,3	-71,3
Výkonová úroveň (kW)	I_{NNO}		I_{VNO}		I_{TVN}	
	(A)	φ (°)	(A)	φ (°)	(A)	φ (°)
a	b	c	d	e	f	g
0	0,0002	89,8	11,0	11,0	50,4	-92,8
30	0,0002	90,0	11,0	11,0	65,1	-50,8
60	0,0002	90,2	11,0	11,0	98,7	-30,8
100	0,0002	90,4	11,0	11,0	151,6	-19,5
250	0,0002	91,3	11,0	11,0	364,6	-8,0
400	0,0002	92,1	11,0	11,0	581,4	-5,0
500	0,0002	92,7	11,0	11,0	726,4	-4,0
650	0,0002	93,6	11,0	11,0	944,0	-3,1
800	0,0002	94,4	11,0	11,0	1161,9	-2,5
950	0,0002	95,2	11,0	11,0	1379,8	-2,1
1100	0,0002	96,1	11,0	11,0	1597,8	-1,9

Tabulka 3 : Proudů v jednotlivých větvích obvodu

3.5 Výkon a ztráty

Z impedancí, proudů a napětí stanovených v předchozích kapitolách jsem stanovil výkon dodávaný elektrárnou do sítě a jeho činnou a jalovou složku. Pro interpretaci vypočtených hodnot jsem použil spotřebičovou orientaci, doporučenou v PPDS [6]. Činný výkon je vlastním produktem FVE a je tedy žádoucí jej za všech podmínek maximalizovat, jalový výkon způsobuje zbytečné ztráty, pokud se nepodílí např. na regulaci napětí v přilehlé síti. Jalový výkon musí být upravován (kompenzován) dle požadavků provozovatele distribuční soustavy. Kompenzací se zabývám v kapitole 4.1.

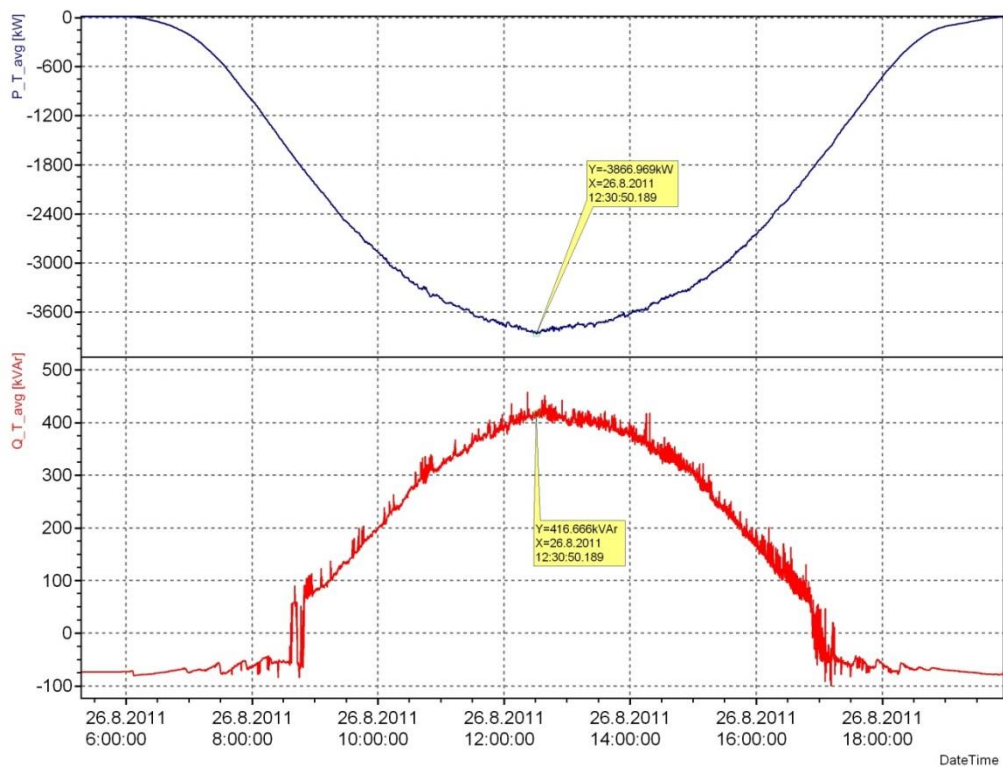
Na obr. 33 je znázorněn průběh činného a jalového výkonu v předávacím místě v závislosti na výkonu dodávaném do střídače.



obr. 33 : Průběh činného (P) a jalového (Q) výkonu

Je patrné, že činný výkon se mění přibližně lineárně, jalový výkon výrazně vzrůstá nad 30% výkonu střídače a při plném výkonu elektrárny je zřejmý jeho induktivní charakter.

Průběh výkonů, který jsem stanovil výpočtem dle náhradního schématu, odpovídá datům naměřeným na reálné FVE obdobně velikosti.

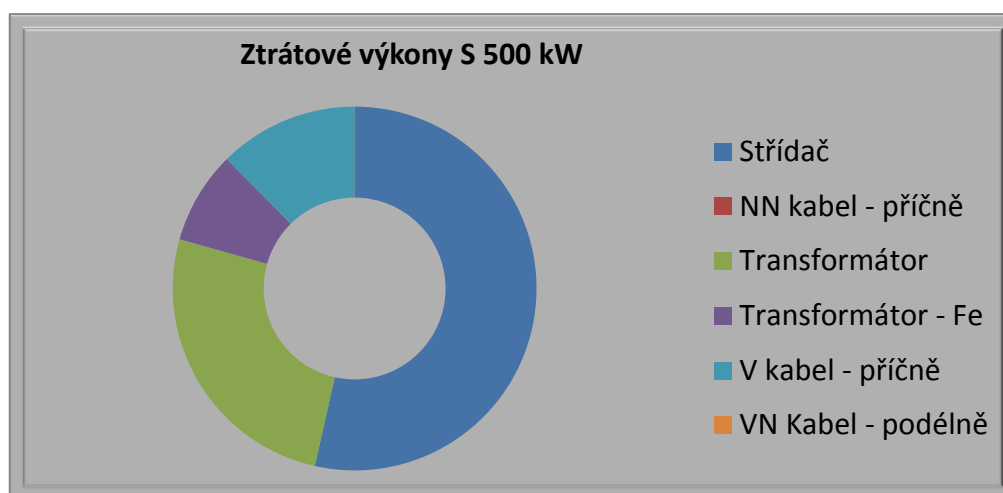


obr. 34 : Průběh činného a jalového výkonu na skutečné FVE [7]

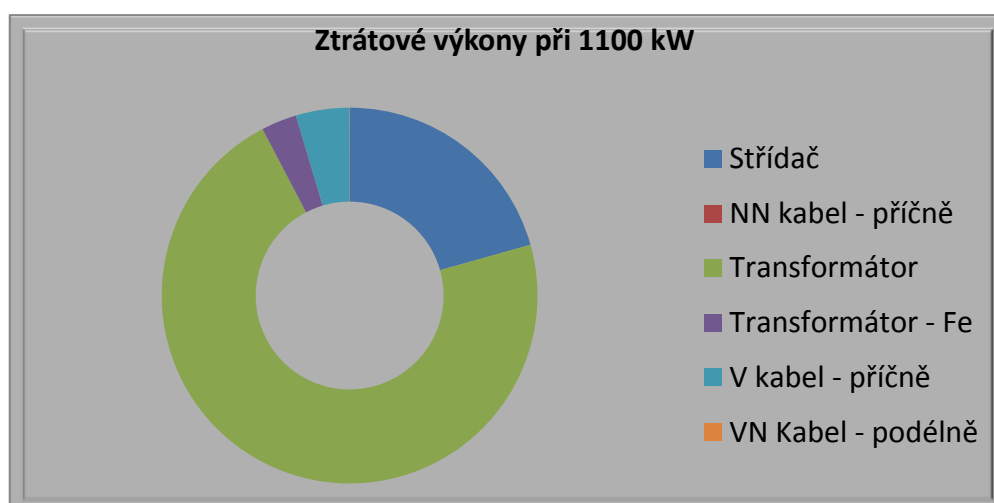
To demonstruji na obr. 34, kde je znázorněn naměřený činný a jalový výkon FVE o výkonu 3,8 MWp.

Žádný z prvků transformačního bloku není ideální a na všech dochází ke ztrátám. Ztrátové výkony vyvolané dříve stanovenými proudy v jednotlivých větvích obvodu působí celkové ztráty, které detailně řeším v kapitole 3.7 Účinnost.

V rámci analýzy obvodu transformačního bloku bych rád upozornil na skutečnost zobrazenou na obr. 35 a obr. 36, kde je patrné, že při 50% maximálního výkonu FVE dochází k největším ztrátám ve střídači, při 100% výkonu jsou už největší ztráty v transformátoru.



obr. 35 : Ztrátové výkony při 50% výkonu FVE



obr. 36 : Ztrátové výkony při 100% výkonu FVE

3.6 Nabíjecí proudy

Na základě zadání jsem měl stanovit nabíjecí proudy. Po zjištění napěťových poměrů v obvodu je možné tyto proudy stanovit na základě znalosti příčné admitance a napětí, které v daném bodu je. Ze všech elektrických prvků v rozvodu FVE se nabíjecí proudy projevují významně pouze na VN kabelech, kde jimi vyvolaný nabíjecí výkon zajišťuje udržení kabelů pod napětím.

Obecně lze tedy nabíjecí proudy kabelu stanovit jako:

$$I_{NB} = Y_{VN0} \cdot U \quad (3.41.)$$

kde U je fázové napětí na kabelu a Y_{VN0} příčná admitance vyjádřená jako $Y_{VN0} = G + jB_c$. V případě běžně používaných kabelů platí, že $G \ll B_c$ a proto je možné svod G zanedbat a ve výpočtu nabíjecího proudu uvažovat jen kapacitní susceptanci B_c .

Nabíjecí proud tedy stanovíme jako:

$$I_{NB} = B_c \cdot U_f = \omega C \cdot U_f = 100\pi \cdot C \cdot U_f \quad (3.42.)$$

V kapitole 3.4.2. jsem stanovil napětí U_2 , které je na VN kabelu a zjistil, že pro různé úrovně výkonu FVE zůstává jeho hodnota přibližně stejná a blízká jmenovité hodnotě. Pro výpočet nabíjecího proudu používám skutečné napětí a admitanci, ne přepočtené na NN stranu.

Nabíjecí proud a výkon tedy budou:

$$I_{NB} = 100\pi \cdot C \cdot U_f = 1,26 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{22}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 0,16 \text{ A} \quad (3.43.)$$

Nabíjecí výkon pak bude

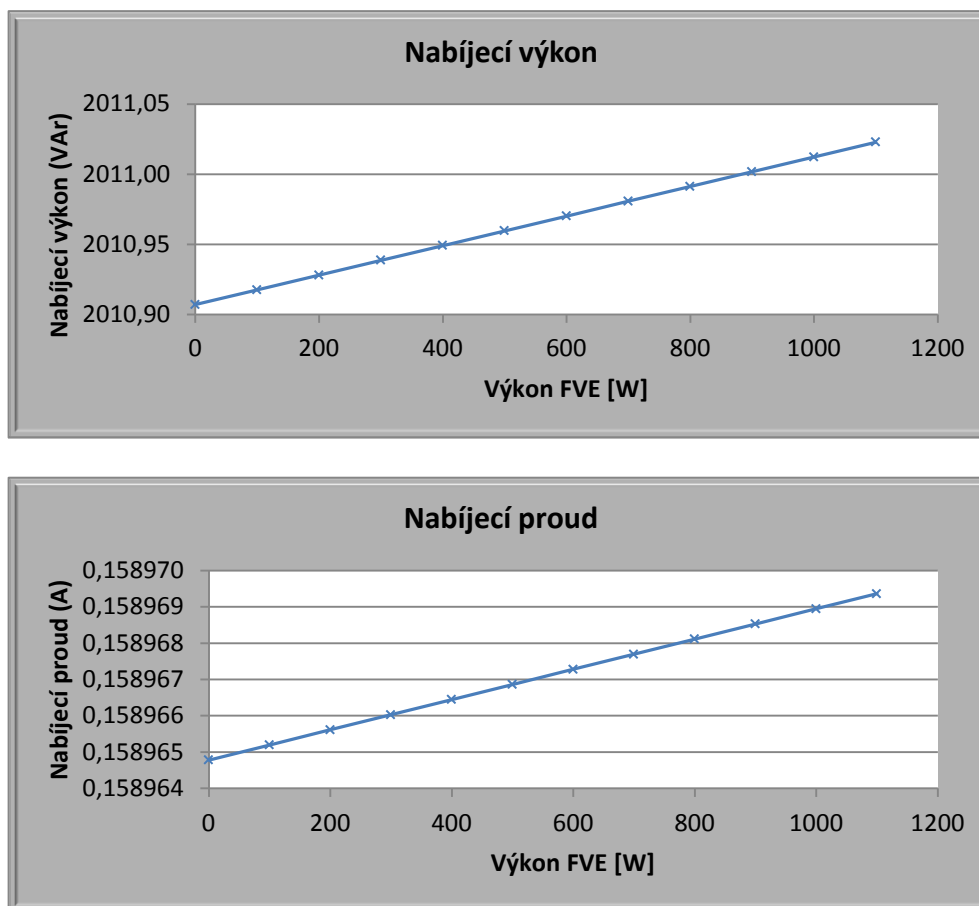
$$Q_{NB} = I_{NB} \cdot U_f = 0,16 \cdot 22 \cdot 10^3 = 2 \text{ kVAr} \quad (3.45.)$$

Nabíjecí výkon tak přibližně odpovídá ztrátovému výkonu stanovenému v kapitole 3.4.

Nabíjecí proudy pro další vybrané výkonové úrovně jsou uvedeny v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a jak jsem již uvedl výše, nemění se. Závislost nabíjecích proudů a výkonu na výkonu FVE je znázorněn na grafech na obr. 37.

Výkonová úroveň (W)	Nabíjecí proud		Nabíjecí výkon Q (VAr)
	I (A)	Úhel (°)	
0	0,158965	89,9999	2010,91
100	0,158965	90,0001	2010,92
500	0,158967	90,0007	2010,96
600	0,158967	90,0008	2010,97
700	0,158968	90,0010	2010,98
800	0,158968	90,0011	2010,99
1100	0,158969	90,0015	2011,02

Tabulka 4 - Nabíjecí proud a výkon



obr. 37 : Nabíjecí proud a výkon

3.7 Účinnost

Účinnost fotovoltaické elektrárny lze zjišťovat z mnoha různých hledisek, které se liší zejména v tom, které prvky do úvahy zahrneme. Teoreticky by měla být účinnost stanovena jako poměr dodaného činného výkonu k přijaté energii ze slunce. Účinnost přeměny energie slunečního záření na elektřinu (stejnoseměrný proud) jsem již popisoval v kapitolách 2.2 a 2.3. Energie slunečního osvětlení ale není navíc nijak systematicky měřena a proto se v této části práce budu zabývat stanovením účinnosti technologické části elektrárny.

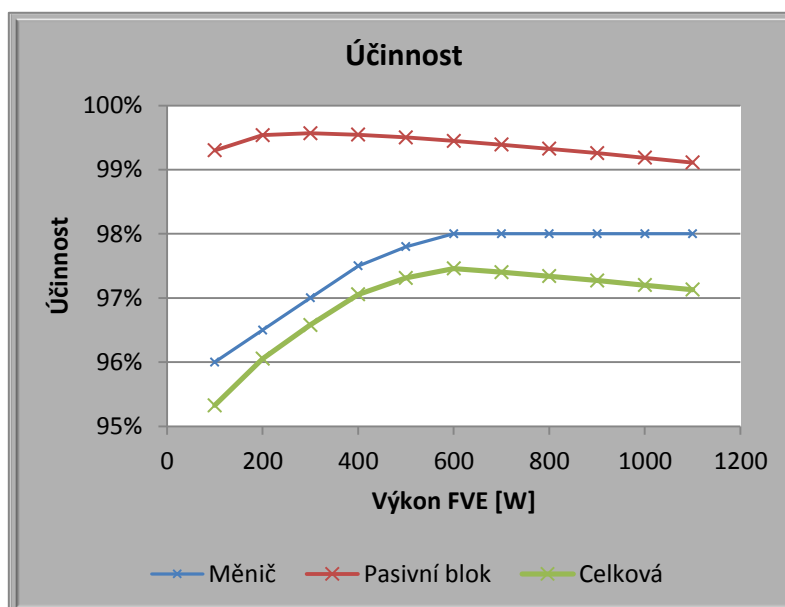
Účinnost tedy stanovuji jako poměr činného výkonu skutečně dodaného do sítě a teoretického maximálního činného výkonu, který bylo možné získat ze vstupu do měniče. Při posuzování účinnosti jsem zanedbal vlastní spotřeby všech prvků. Toto zanedbání je ale možné pouze v případě řešení kompenzace připojováním pasivních prvků, pokud bych řešil kompenzaci dodatečným proudovým zdrojem, nebylo by zanedbání možné.

Základními vstupy, pro stanovení účinnosti jsou:

- **Účinnost střídače** – Obecně jsem se problematikou řešení účinnosti střídače zabýval již v kapitole 2.5, kde jsem mimo jiné popisoval silnou závislost účinnosti střídače na napětí na jeho vstupu a poměru výkonu vůči jmenovitému výkonu. Pro další výpočet předpokládám, že střídač pracuje v optimálních napěťových poměrech. Pro každou výkonovou úroveň jsem na základě stanovení výkonového vytížení (jako poměru aktuálního výkonu ke jmenovitému) stanovil účinnost typického střídače.
- **Ztrátový výkon pasivních prvků** – V kapitole 3.4 jsem stanovil ztrátový výkon a činný výkon dodávaný elektrárnou do sítě. Ten tvoří první složku výsledného činného výkonu, který bude do sítě dodán.
- **Ztrátový výkon kompenzace** – Jak detailně popisuji v kapitole 4.1., kompenzace bude řešena připojováním pasivních prvků – indukčností a kapacit. Každý takový prvek vykazuje spotřebu/činného výkonu, která bude druhou složkou ovlivňující celkový činný výkon dodaný do sítě. Pro výpočet uvažuji kompenzaci nastavenou na $\cos\varphi = 1$.

Výsledná účinnost je stanovena jako součin účinnosti vlastního měniče a bloku obsahující kabely, transformátor a kompenzaci.

Jak je zřejmé z hodnot v tabulce 5 a grafu na obr. 38, se zvyšujícím výkonem se zvyšuje účinnost měniče, ale zároveň rostou ztráty v pasivním obvodu, které přispívají ke snížení účinnosti.



obr. 38 : Účinnost transformace

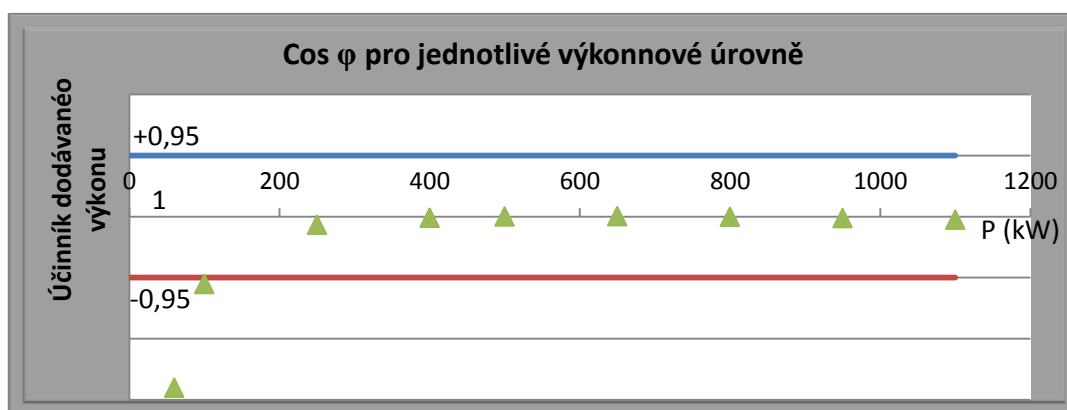
Výkonová úroveň (W)	Měnič		Blok : kabely, trafo, kap. Střídače, kompenzace			Celková účinnost
	Vytížení	Účinnost	Ztráty kabely, transf. (W)	Ztráty kompenzace (W)	Účinnost	
a	B	c	d	e	f	g
0	-	-	-	-	-	-
100	9%	96%	0,62	0,08	99,3%	95,3%
200	18%	97%	0,85	0,01	99,6%	96,1%
400	36%	98%	1,75	0,14	99,5%	97,0%
500	45%	98%	2,43	0,23	99,5%	97,3%
700	64%	98%	4,25	0,40	99,3%	97,3%
900	82%	98%	6,67	0,58	99,2%	97,2%
1000	91%	98%	8,10	0,68	99,1%	97,1%
1100	100%	98%	9,69	0,78	99,0%	97,1%

Tabulka 5 : Ztráty v jednotlivých částech elektrárny

4. Kompenzace a optimalizace provozu

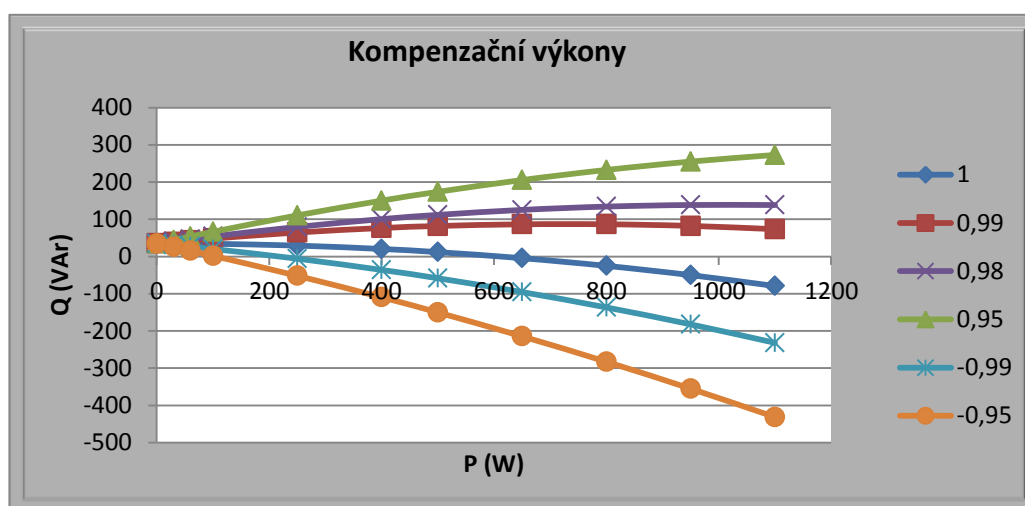
4.1 Kompenzace

Jak jsem zmínil v 1.3.2 je povinností zajistit v předávacím místě dodávku výkonu s $\cos \varphi$ v celém rozsahu 0,95 (kap.) – 1 – 0,95 (ind.). Jak je patrné z dat v grafu na obr. 39 je relativně snadné zajistit dodávku s účinnkem 1, protože od výkonu přibližně 300 kW už elektrárna takový účinník zajišťuje sama bez výrazných kompenzačních zásahů.



obr. 39 : Účinník pro jednotlivé výkonové úrovně

Povinností provozovatele FVE je ale zajistit i dodávku resp. odběr jalového výkonu s účinnkem 0,95. Výkon, který je pro jednotlivé výkonové úrovně FVE potřeba pro splnění této povinnosti, je uveden v tabulce 7 a grafu na obr. 40.



obr. 40 : Kompenzační výkony

Z těchto údajů vyplývá, že bude potřeba zajistit takovou kompenzaci, která bude schopna dodat až 300 kVAR induktivního výkonu a odebrat až 400 kVar jalového induktivního výkonu.

P_{str} (W)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVAr)	$\cos\varphi$
a	b	c	d	e
0	2	-35	-35	-0,046
30	-28	-35	-45	0,631
60	-58	-35	-68	0,860
100	-98	-34	-104	0,945
250	-247	-29	-249	0,993
400	-395	-20	-395	0,999
500	-493	-12	-493	1,000
650	-639	5	-639	1,000
800	-784	25	-785	0,999
950	-928	50	-930	0,999
1100	-1072	79	-1075	0,997

Tabulka 6 : Výkon dodávaný elektrárnou

P_{str} (W)	Potřebný kompenzační výkon podle požadovaného účinníku (kVAr)							
	1,00	0,99	0,97	0,95	-0,99	-0,98	-0,97	-0,95
0	35	35	35	35	35	35	34	34
30	35	39	42	44	31	29	28	26
60	35	43	49	54	26	23	20	15
100	34	48	59	66	20	14	10	2
250	29	65	91	111	-6	-21	-33	-52
400	20	76	119	150	-36	-60	-79	-110
500	12	82	135	174	-58	-88	-112	-150
650	-5	87	156	206	-96	-134	-165	-215
800	-25	87	171	233	-137	-184	-222	-283
950	-50	82	183	255	-182	-239	-283	-355
1100	-79	73	189	273	-232	-297	-348	-432

Tabulka 7 : Kompenzační výkon pro jednotlivé účinníky

4.1.1 Metody kompenzace

Kompenzace jalového výkonu je velmi propracovaný specifický obor elektrotechniky, který je posledních několik desítek let rozvíjen a existuje proto celá řada osvědčených metod včetně eliminace jejich rizik a velká řada typových řešení ze sériově vyráběných komponent. To vše platí pro kompenzaci v průmyslu apod.. Oproti tomu kompenzace FVE je realizována pouze v posledních několika letech a prochází stále vývojem. Hlavním specifíkem kompenzace FVE je vysoká dynamika změn jalového výkonu.

Obecně, lze kompenzaci fotovoltaické elektrárny dělit podle několika hledisek. Prvním je umístění, které vychází z celkové topologie elektrárny. Kompenzaci lze realizovat jako centrální pro všechny případné bloky nebo zvlášť pro každý blok. Dále

lze uvažovat o kompenzaci na straně nízkého nebo vysokého napětí, kdy každá má svá specifika a dostupná technická řešení pro její realizaci.

Kompenzační zařízení může pracovat v jednom ze základních technických principů, kdy nejčastěji používaným je kompenzace pomocí připínání pasivních prvků (kondenzátorů a tlumivek), které zajistí odběr jalového výkonu příslušného charakteru. Při použití tohoto způsobu, je potřeba brát zřetel zejména na dynamické možnosti takového zařízení.

Specifickou součástí transformačního bloku FVE je střídač. Moderní střídače umožňují přímo měnit účinník výstupního výkonu a to často bez poklesu dodávaného činného výkonu. Takový provoz je v podstatě analogií provozu generátoru v přebuzeném nebo podbuzeném stavu. Problémem tohoto řešení je správné nastavení logiky stanovování účinníku zadaného střídači tak, aby byl dodrženy výsledný účinník v předávacím místě – tedy včetně vykompenzování transformátorů, kabelů atd.

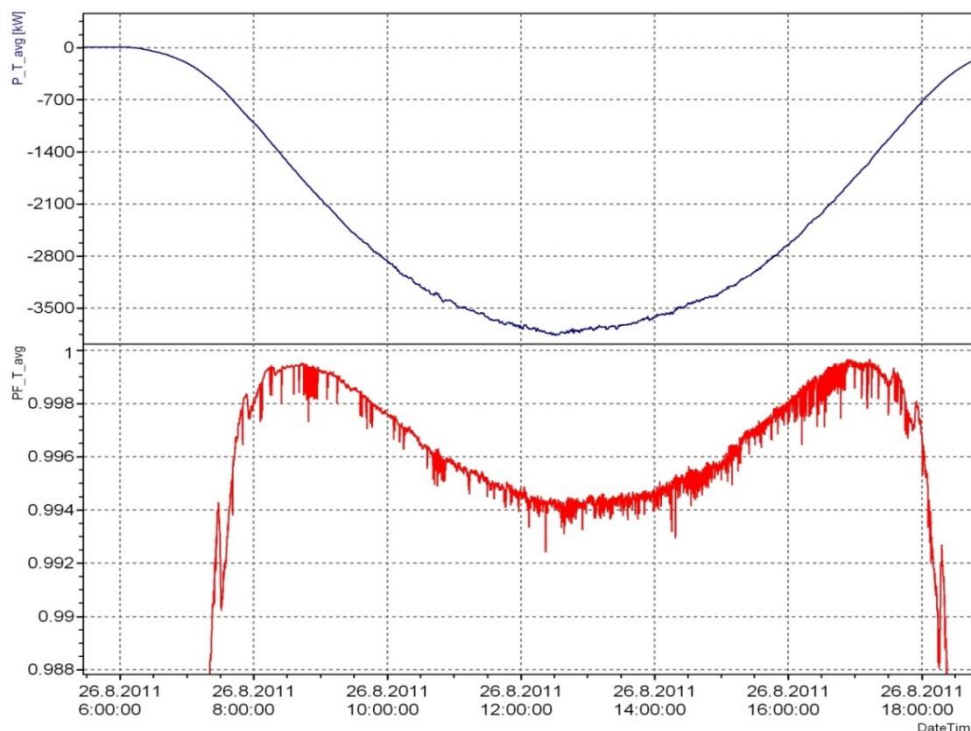
Další možností je použít pro kompenzaci na principu aktivního filtru. Aktivní filtr je zařízení, které analyzuje průběh proudu v reálném čase a v něm obsažený proudový zdroj injektuje do obvodu takový proud, aby výsledný proud měl požadovaný účinník. Výhodou takového zařízení je možnost využít jej i pro odstranění dalších nežádoucích jevů jako jsou vyšší harmonické, flicker atd.. Typicky jsou taková zařízení dodávána jako hybridní – tedy kombinace aktivního i pasivního filtru. Jedním z výrobců je např. společnosti ELCOM, a.s. a její produkt STELCOM.

4.1.2 Návrh kompenzace pro analyzovanou FVE

Při návrhu kompenzace jsem vycházel z několika specifických provozních stavů FVE, pro které je potřeba zajistit potřebný kompenzační výkon, který jsem stanovil v 4.1. Vzhledem k tomu, že mnou analyzovaná FVE je tvořena dvěma bloky o stejném výkonu, budu nadále uvažovat kompenzaci jednoho z bloků (a potřebné výkony budou tedy poloviční).

Významnou část času, pracuje elektrárna v režimu „tma“, tedy dodávaný činný výkon je nulový a pro všechny požadované hodnoty účinníku, kromě -0,95 je potřeba kompenzovat výkon -17,5 kVAr (35 kVAr pro celou FVE). Dodávku potřebného jalového výkonu navrhuji zajistit prostřednictvím dekompenzační tlumivky.

Tlumivky jsem vybíral ze sortimentu KBH energy, s.r.o. uvedeného v příloze F. Vzhledem k tomu, že tato tlumivka bude připojena trvale, je potřeba věnovat zvláštní pozornost jejím ztrátám. Vybral jsem tedy tlumivky tak, aby přesně pokrývaly, potřebný výkon, konkrétně DEKOMP 5 a DEKOMP 12,5. Jejich celkový dekompenzační výkon je 17,5 kVAr a ztráty 385 W.



obr. 41 : Detail průběhu jalového výkonu reálné FVE [9]

Největší dekompenzační výkon bude potřeba pro dosažení účinníku 0,95 při plném výkonu FVE, kdy bude potřeba zajistit dodávku 136,5 kVAr. K výše uvedeným tlumivkám, je tedy ještě potřeba dodat další o výkonu 119 kVAr. Sestavu jsem sestavil ze stejného sortimentu. Jak je patrné z reálného průběhu jalového výkonu, účinník se pohybuje v relativně úzkém pásu hodnot a proto bude výhodné zvolit několik větších stupňů pro „přiblížení“ k požadovanému účinníku a dále řadu menších pro detailní úpravy. Celá dekompenzační sestava, kterou jsem zvolil je v tabulce 8.

Typ prvku	Výkon (kVAr)	Počet (ks)	Ztráty (W)
DEKOMP 5	5	5	155
DEKOMP 10	10	2	200
DEKOMP 12,5	12,5	1	230
DEKOMP 40	40	2	610
CELKEM	137,5	10	1195

Tabulka 8 : Způsob řešení kompenzace

Maximální kompenzační výkon, který bude potřeba zajistit je 216 kVAr na jeden blok. Tento výkon je možné zajistit kompenzačním rozvaděčem KBH RK VINDEX , který má celkový výkon 242 kVAr rozdělený do 11 stupňů po 22 kVAr. Jeho ztrátový výkon je 1330 W.

Alternativou k výše uvedenému řešení by bylo použití regulace střídače na účinník požadovaný ze strany dispečinku provozovatele distribuční soustavy a pasivní kompenzace pouze k dokompenzování příspěvků jalového výkonu na transformačním bloku.

4.2 Optimalizace provozu

Optimalizaci provozu fotovoltaické elektrárny jsem ve své práci pojal jako analýzu možností ke zvýšení účinnosti výroby elektřiny v elektrárně. Nezabývám se účinností vlastních fotovoltaických panelů ani způsobem jejich údržby, ale pouze účinností transformačního bloku střídač-transformátor. Pro každý z těchto prvků je ale třeba zvážit jiný přístup k minimalizaci ztrát.

Střídač je specifický tím, že jeho účinnost se mění v závislosti na výkonu a vstupním napětí, jak jsem ukázal v kapitole 2.5. Jasným zadáním je tedy maximalizace doby, kdy je poměr mezi vstupním napětím a výkonem v oblasti s nejvyšší účinností střídače. Všechny současné střídače jsou již vybaveny funkcí MPP tracker, tedy automatickou úpravou vstupní impedance tak, aby byl dosažen bod, kdy je výstupní výkon maximální a tím i účinnost.

Algoritmy tohoto řízení jsou stále zdokonalovány, nejnovější už umí řešit i situace, kdy je nalezeno několik maxim a vyhodnocovat nejvýhodnější z nich.

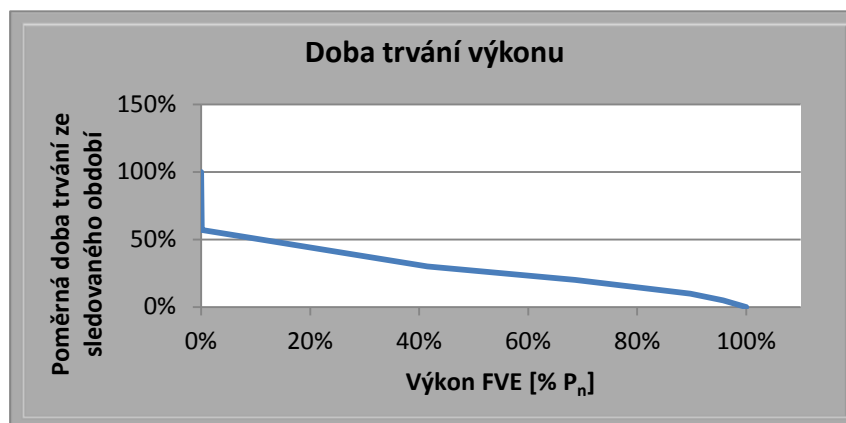
Jak je vidět z obr. 20, od úrovně výkonu 30% jmenovitého výkonu a níže už účinnost klesá velmi rychle.

V případě velkých elektráren umístěných v oblastech s častým výskytem oblačnosti (a tedy s častým provozem FVE na nízký výkon) bych uvažoval i o nastavení dynamického přepojování sekcí FVE panelů mezi jednotlivými bloky. Například u elektrárny, kde jsou 4 sekce panelů o stejném výkonu, zapojené standardně do 4 bloků střídač-transformátor, by mohl být, na základě výše uvedené úvahy, model provozu popsany v tabulce 9. V případě ostatních prvků, tedy transformátoru, kabelů a kompenzačních pasivních prvků je potřeba řešit jejich ztrátovost a dbát na správné dimenzování.

Úroveň výkonu panelů	Způsob změny zapojení panelů ke střídači	Účinnost střídače bez změny zapojení	Účinnost střídače po změně zapojení
20 % Wp	Všechny 4 sekce jsou připojeny ke stejnému střídači/transformátoru. 3 střídače odstaveny.	94%	98%
40%	Vždy 2 sekce připojeny k jednomu střídači. Dva odstaveny.	97,5	98%
>50 %	Každá sekce zapojena k vlastnímu střídači.	98%	-

Tabulka 9 : Řízení zapojení dle výkonu

Všechny prvky musí být schopny přenést výkon na úrovni maximálního výkonu, který může být panely dodán, ale neznamená to, že mají být vybírány tak, aby jejich neoptimálnějších vlastností bylo dosaženo při maximálním výkonu. Z grafu na obr. 42 je patrné, že pouze v 20% celkového času je výkon FVE vyšší než 70% maxima a naopak výkonu více než 90% maxima dosahuje FVE pouze po dobu 10% času.



obr. 42 : Doba trvání výkonu [7]

Tyto skutečnosti je potřeba brát v úvahu zejména v případě výběru transformátoru. Je výhodnější připustit vyšší ztráty při maximálním výkonu (např. z důvodu přesycování mg. obvodu) než provozovat dlouhodobě předdimenzovaný transformátor na 50% výkonu a za vysokých ztrát v železe velkého mg. obvodu.

Stejnou úvahu je potřeba provést v případě návrhu kompenzačních prvků. Výkon FVE má kapacitní charakter ve výkonových úrovních do cca 30% maxima a z toho by bylo možné usuzovat, že není tak důležité zabývat se ztrátami při jeho kompenzaci. Jak je ale patrné z výše uvedeného, FVE v tomto režimu pracuje 70% času. Je proto nutné věnovat pozornost ztrátám použitých dekompenzačních tlumivek. Část z nich je dokonce připojena k FVE trvale, pro dekompenzaci kapacity střídače a může se významným způsobem podílet na celkových ztrátách.

Závěr

Ve své práci jsem jako základní nástroj pro analýzu všech vlastností provozu fotovoltaické elektrárny použil matematický model respektující základní funkční bloky. Model reprezentuje celý transformační blok, tedy střídač, transformátor a kabely propojené mezi nimi a dále i část mezi předávacím místem a nejbližší rozvodnou distribuční soustavou – tedy přípojovací kabel a transformátor 110/23 kV.

Na základě tohoto modelu jsem provedl simulaci výkonových, napěťových a proudových poměrů v jednotlivých částech elektrárny pro jednotlivé úrovně výkonu. Zabýval jsem se napětími v klíčových uzlech a proudy včetně nabíjecích u kabelů v rozvodech elektrárny. Detailněji jsem simuloval výkonové úrovně, kde dochází ke změně charakteristických veličin (výkon, proudy, účinník).

Ze simulace vyplynulo, že napětí v jednotlivých uzlech obvodu se mění s rostoucím zatížením – zejména vlivem úbytků napětí na přívodním kabelu mezi rozvodnou a předávacím místem, mezi transformátorem a předávacím místem a na transformátoru.

Průběh dodávky činného a jalového výkonu je charakteristický tím, že při lineárním nárůstu dodávky činného výkonu dochází ke kvadratickému nárůstu dodávky jalového výkonu, kdy navíc přibližně při úrovni 30% P_{\max} dochází ke změně charakteru jalového z kapacitního na induktivní. Elektrárna odebírá jalový výkon i v době, kdy není dodáván žádný činný.

Tuto skutečnost jsem respektoval i při návrhu kompenzace. Díky tomu, že střídač elektrárny dodávaný výkon s účinníkem 1, je potřeba při požadovaném účinníku 1 v předávacím místě kompenzovat pouze pasivní prvky transformačního bloku. Výkon takové kompenzace není velký (desítky kVAr /1 MW). Jiná situace nastává v případě, kdy je potřeba zajistit dodávku výkonu s účinníkem 0,95. V tom případě je potřeba zajistit kompenzační výkon až 400 kVAr /1 MW. Při návrhu kompenzace jsem respektoval nejčastější provozní režimy elektrárny a navrhl jsem zvlášť kompenzaci pro noční režim, kdy je potřeba trvale dekompenzovat kapacitu střídače a zvlášť pro režim plné výroby, kdy je naopak potřeba kompenzace induktivního jalového výkonu s vysokou dynamikou.

Účinnost přeměny energie v jednotlivých prvcích vykazuje také několik charakteristických vlastností. Střídač pracuje s nejhorší účinností při nejmenším zatížení nebo extrémních hodnotách vstupního napětí. V rámci řízení střídače je možné jeho účinnost ovlivňovat – funkcí MPP tracker upravující vstupní impedanci pro dosažení

optimálního napětí na vstupu. Naopak ztráty na kabelech a transformátoru rostou se zvyšujícím se zatížením a průběh jejich účinnosti je tedy opačný než u střídače.

Nejoptimálnější provoz FVE je samozřejmě provoz s nejvyšší účinností. Analyzoval jsem možnosti zvýšení účinnosti a navrhuji provozní opatření v oblasti řízení provozu. Navrhuji dynamické řízení přepojování výrobních bloků mezi střídači tak, aby byl střídač využíván v oblasti jeho maximální účinnosti. Dalším způsobem jak zvýšit účinnost transformačního bloku elektrárny je minimalizovat ztráty na jednotlivých jeho prvcích – zejména transformátoru a dekompenzačních tlumivek. K tomu je potřeba vzít v době návrhu v úvahu časové rozložení budoucího provozu elektrárny a při dimenzování jednotlivých prvků se snažit zajistit aby nejlepších vlastností dosahovali při zatížení, které je na elektrárně většinu času. Optimalizace prvků na maximální (90-100%) výkonovou úroveň není vhodná, protože v této úrovni se elektrárna nachází méně než 10 % svého provozního času.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] J. MERTLOVÁ, P. HEJTMÁNKOVÁ a T. TAJTL, *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*, Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [2] J. MERTLOVÁ, a L. NOHÁČOVÁ, *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008.
- [3] D. MAYER, *Elektrodynamika v energetice*, Praha: Nakladatelství BEN, 2005.
- [4] K. NOHÁČ, *Podklady k přednáškám a cvičením předmětu E2*, Plzeň, 2014.
- [5] ČEPS a.s., *ČEPS a.s. - Data do kapsy 2013, dokumenty na www*, Praha: ČEPS, 2013.
- [6] ČEZ Distribuce a.s., *Pravidla provozování distribučních soustav*, Děčín: ČEZ Distribuce a.s., 2009.
- [7] F. Žák, *Obecné podklady a informace poskytnuté konzultantem*, České budějovice, 2015.
- [8] MIT Technollogy review, <http://www.technologyreview.com/view/519596/worlds-largest-solar-thermal-power-plant-delivers-power-for-the-first-time/>, Massachusetts Institute of Technology, 2015. [cit 15.4.2015]
- [9] Internet: <http://oze.tzb-info.cz/>, Technické zařízení budov, 2015. [cit 15.4.2015]
- [10] Internet: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>, 2015. [cit 15.4.2015]
- [11] Ineternet : <http://www.solar-liglass.cz/fotovoltaicke-dotazy-a-odpovedi/54-optimalni-sklon-orientace-fotovoltaickych-panelu.html>, 2015. [cit 15.4.2015]
- [12] Internet: www.solarnevi.cz, 2015. [cit 15.4.2015]
- [13] Katalog výrobků SMA, <http://www.sma-czech.com/cs/produkty/stridace-pro-zapojeni-do-rozvodne-site/sunny-central/>, SMA, 2015. [cit 15.4.2015]
- [14] TZB info, <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8344-zvysovani-efektivnosti-provozu-fotovoltaickych-elektren-teorie-vs-praxe>, Praha, 2012. [cit 15.4.2015]
- [15] Internet: <http://www.wattsun.cz/fotovoltaicke-panely.php>, 2015. [cit 15.4.2015]
- [16] Internet: www.rayon.cz/detail/zprava/5-nejvetsich-slunecnich-elektren-na-svete/, 2015. [cit 15.4.2015]
- [17] Inernet: <http://www.elektarny.pro/>, 2015. [cit 15.4.2015]
- [18] M. BURŠÍK, *Diplomová práce : Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny - návrh lokální úpravy sítě*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.

Seznam obrázků

OBR. 1 : MAPA ČLENŮ ENTSO-E [5]	13
OBR. 2 : TOKY ENERGIE V EVROPĚ [9].....	14
OBR. 3 : MAPA PŘENOSOVÉ SOUSTAVY ČR [5]	16
OBR. 4 : SÍŤ S ÚČINNĚ UZEMNĚNÝM UZLEM.....	16
OBR. 5 : SÍŤ S NEÚČINNĚ UZEMNĚNÝM UZLEM A) PŘES TLUMIVKU , B) PŘES IMPEDANCI..	17
OBR. 6 : KONCEPCE DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV A) TRADIČNÍ B) SMART-GRID [9]	18
OBR. 7 : NÁHRADNÍ SCHÉMA KABELU [4]	19
OBR. 8 : REGULACE VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI.....	21
OBR. 9 : FV ČLÁNEK [10]	22
OBR. 10 : FVE OLMEDILLA [16].....	22
OBR. 11 : GRAF INSTALOVANÉHO VÝKONU FVE V ČR [17]	23
OBR. 12 : GRAF POČTU FVE VĚTŠÍCH NEŽ 1 MW [17].....	23
OBR. 13 : KONSTRUKCE FV PANELU [9]	24
OBR. 14 : FV PANELY. ZLEVA: AMORFNÍ - POLYKRYSAL. - MONOKRYSTAL. - VELKOPLOŠNÝ MONOKRYSTAL [15]	25
OBR. 15 : VLIV UMÍSTĚNÍ FV PANELU NA JEHO VÝKON [12].....	26
OBR. 16 : FVE S CENTRÁLNÍM STŘÍDAČEM A TRANSFORMÁTOREM	27
OBR. 17 : FVE SE SKUPINOVÝMI STŘÍDAČI A CENTRÁLNÍM TRANSFORMÁTOREM	27
OBR. 18 : FVE SE SKUPINOVÝMI STŘÍDAČI A TRANSFORMÁTOREM.....	28
OBR. 19 : STŘÍDAČ 630 W FIRMY SMA [13].....	29
OBR. 20 : ZÁVISLOST ÚČINNOSTI STŘÍDAČE NA PŘÍKONU A NAPĚTÍ [14].....	29
OBR. 21 : BLOKOVÉ SCHÉMA GRID-ON SYSTÉMU	30
OBR. 22 : BLOKOVÉ SCHÉMA GRID-OFF SYSTÉMU	30
OBR. 23 : MOŽNOSTI PŘIPOJENÍ FVE DO SÍTĚ	31
OBR. 24 : BLOKOVÉ SCHÉMA FVE	32
OBR. 25 : NÁHRADNÍ SCHÉMA KABELU.....	33
OBR. 26 : NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO VÝPOČET	33
OBR. 27 : NÁHRADNÍ A VÝPOČTOVÉ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	35
OBR. 28 : VÝSTUPNÍ PRŮBĚH PROUDU STŘÍDAČE [14].....	36
OBR. 29 : NÁHRADNÍ SCHÉMA STŘÍDAČE A SCHÉMA PRO VÝPOČET	37
OBR. 30 : NÁHRADNÍ OBVOD PRO STANOVENÍ KAPACITY STŘÍDAČE	38

OBR. 31 : SCHÉMA OBVODU PRO VÝPOČET	39
OBR. 32 : GRAF - NAPĚTÍ V UZLECH OBVODU.....	42
OBR. 33 : PRŮBĚH ČINNÉHO (P) A JALOVÉHO (Q) VÝKONU	44
OBR. 34 : PRŮBĚH ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU NA SKUTEČNÉ FVE [7]	44
OBR. 35 : ZTRÁTOVÉ VÝKONY PŘI 50% VÝKONU FVE	45
OBR. 36 : ZTRÁTOVÉ VÝKONY PŘI 100% VÝKONU FVE	45
OBR. 37 : NABÍJECÍ PROUD A VÝKON	47
OBR. 38 : ÚČINNOST TRANSFORMACE.....	48
OBR. 39 : ÚČINÍK PRO JEDNOTLIVÉ VÝKONOVÉ ÚROVNĚ	50
OBR. 40 : KOMPENZAČNÍ VÝKONY	50
OBR. 41 : DETAIL PRŮBĚHU JALOVÉHO VÝKONU REÁLNÉ FVE [9]	53
OBR. 42 : DOBA TRVÁNÍ VÝKONU [7]	55

Seznam tabulek

TABULKA 1 : ŠTÍTEK TRANSFORMÁTORU	35
TABULKA 2 : NAPĚTÍ V UZLECH OBVODU	42
TABULKA 3 : PROUDY V JEDNOTLIVÝCH VĚTVÍCH OBVODU	43
TABULKA 4 - NABÍJECÍ PROUD A VÝKON	46
TABULKA 5 : ZTRÁTY V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH ELEKTRÁRNY	49
TABULKA 6 : VÝKON DODÁVANÝ ELEKTRÁRNOU	51
TABULKA 7 : KOMPENZAČNÍ VÝKON PRO JEDNOTLIVÉ ÚČINÍKY	51
TABULKA 8 : ZPŮSOB ŘEŠENÍ KOMPENZACE	53
TABULKA 9 : ŘÍZENÍ ZAPOJENÍ DLE VÝKONU	55

Přílohy

A – Uzlová napětí v komplexním tvaru – detail hodnot ze simulace v tabulkovém kalkulátoru použitý pro i grafické znázornění průběhů

Pstr (kW)	Istr (A)	U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)
0	0,0	231,580504830421-0,716731555202418j	230,877948216368-0,553042322368176j	230,877801364213-0,552826515002962j
20	2,9	231,701537468312-0,244780033526296j	230,897206516657-0,522423740922577j	230,896939420771-0,522298434130601j
40	5,8	231,822570106203+0,227171488149272j	230,916464816947-0,49180515947753j	230,91607747733-0,491770353259081j
70	10,1	232,004119063041+0,935098770663154j	230,945352267382-0,44587728730943j	230,944784562169-0,445978231950945j
100	14,5	232,185668019878+1,64302605317711j	230,974239717816-0,399949415141254j	230,973491647006-0,400186110642624j
125	18,1	232,336958817241+2,23296545527218j	230,998312593178-0,361676188334343j	230,997414217705-0,362026009552766j
150	21,7	232,488249614606+2,82290485736658j	231,02238546854-0,323402961528091j	231,021336788403-0,323865908463199j
175	25,4	232,639540411969+3,41284425946162j	231,046458343902-0,285129734721211j	231,045259359101-0,285705807372926j
200	29,0	232,790831209334+4,00278366155666j	231,070531219264-0,246856507914316j	231,069181929799-0,247545706282639j
250	36,2	233,093412804062+5,18266246574602j	231,118676969988-0,170310054301261j	231,117027071196-0,171225504102907j
300	43,5	233,39599439879+6,36254126993613j	231,166822720712-0,0937636006874546j	231,164872212592-0,094905301922745j
325	47,1	233,547285196155+6,95248067203052j	231,190895596075-0,0554903738812185j	231,188794783291-0,056745200832979j
350	50,7	233,698575993518+7,54242007412559j	231,214968471436-0,0172171470743077j	231,212717353988-0,01858509974289j
375	54,3	233,849866790882+8,13235947622062j	231,239041346798+0,0210560797325724j	231,236639924687+0,019575001347382j
400	58,0	234,001157588247+8,72229887831503j	231,263114222161+0,0593293065388239j	231,260562495386+0,05773510243675j
450	65,2	234,303739182974+9,90217768250514j	231,311259972884+0,13587576015263j	231,308407636781+0,134055304617417j
500	72,5	234,606320777704+11,0820564866946j	231,359405723609+0,212422213765762j	231,356252778179+0,210375506797057j
525	76,1	234,757611575067+11,6719958887897j	231,38347859897+0,250695440572672j	231,380175348876+0,248535607887452j

Pstr (kW)	Istr (A)			
550	79,7	235,060193169796+12,851874692979j	231,431624349695+0,327241894185804j	231,428020490274+0,324855810067092j
575	83,3	235,21148396716+13,4418140950741j	231,455697225057+0,365515120992715j	231,451943060972+0,363015911157395j
600	87,0	235,362774764524+14,0317534971692j	231,479770100418+0,40378834779961j	231,475865631669+0,401176012247453j
625	90,6	235,514065561887+14,6216928992642j	231,50384297578+0,442061574606414j	231,499788202368+0,439336113337311j
650	94,2	235,665356359253+15,2116323013585j	231,527915851143+0,48033480141265j	231,523710773067+0,477496214427093j
675	97,8	235,816647156617+15,8015717034536j	231,551988726505+0,518608028219545j	231,547633343765+0,515656315517381j
700	101,4	235,96793795398+16,3915111055486j	231,576061601866+0,556881255026441j	231,571555914462+0,553816416607346j
725	105,1	236,119228751345+16,9814505076431j	231,600134477229+0,595154481832692j	231,595478485162+0,591976517697113j
750	108,7	236,270519548709+17,5713899097381j	231,624207352591+0,633427708639618j	231,61940105586+0,6301366187874j
775	112,3	236,421810346073+18,1613293118331j	231,648280227953+0,671700935446498j	231,643323626558+0,668296719877271j
800	115,9	236,573101143437+18,7512687139282j	231,672353103314+0,709974162253394j	231,667246197255+0,706456820967351j
825	119,6	236,724391940801+19,3412081160226j	231,696425978677+0,748247389059645j	231,691168767954+0,744616922057111j
850	123,2	236,875682738166+19,9311475181176j	231,720498854039+0,786520615866541j	231,715091338652+0,782777023147381j
875	126,8	237,02697353553+20,5210869202127j	231,744571729401+0,824793842673436j	231,739013909351+0,820937124237271j
900	130,4	237,178264332894+21,1110263223071j	231,768644604763+0,863067069479688j	231,762936480049+0,859097225327151j
950	137,7	237,480845927623+22,2909051264972j	231,816790355487+0,939613523093479j	231,810781621445+0,935417427507721j
1000	144,9	237,783427522351+23,4707839306866j	231,864936106211+1,01615997670661j	231,858626762842+1,01173762968715j
1025	148,6	237,934718319714+24,0607233327817j	231,889008981573+1,05443320351354j	231,88254933354+1,04989773077773j
1050	152,2	238,086009117078+24,6506627348766j	231,913081856935+1,09270643032034j	231,906471904239+1,08805783186762j
1075	155,8	238,237299914444+25,240602136971j	231,937154732298+1,13097965712656j	231,930394474938+1,12621793295708j
1100	159,4	231,580504830421-0,716731555202418j	230,877948216368-0,553042322368176j	230,877801364213-0,552826515002962j

B – Proudý v komplexním tvaru

Pstr (kW)	Istr (A)	$I_{str} (A)$	$I_t (A)$	$I_{VNO} (A)$
0	0	0,143346311040484+46,3161009660842j	-0,143346873953613-46,3162828490236j	0,026278684668276+10,9705325481354j
200	29	0,048956007052592+46,3403074936624j	28,9365510474327-46,3404894716799j	0,0248237941214669+10,9714476368729j
400	58	-0,04543429762944+46,3645140212406j	58,0164489688042-46,3646960942721j	0,023368903574684+10,9723627256104j
700	101	-0,1870197541321+46,4008238126082j	101,636295850884-46,4010060282592j	0,0211865677544845+10,9737353587167j
1000	145	-0,32860521063542+46,4371336039756j	145,256142732963-46,4373159622428j	0,0190042319342814+10,9751079918229j
1250	181	-0,44593091054436+46,4673917634482j	181,606015134675-46,467574240469j	0,0171856187507741+10,9762518527448j
1500	217	-0,5645809473316+46,4976499229212j	217,955887536415-46,4978325188222j	0,0153670055672982+10,9773957136667j
1750	254	-0,68256885189224+46,5279080823938j	254,305759938126-46,5280907970484j	0,0135483923837925+10,9785395745885j
2000	290	-0,80055673231133+46,5581662418668j	290,655632339866-46,5583490753998j	0,011729779200286+10,9796834355104j
2250	326	-0,918544673012+46,588424013398j	327,005504741592-46,5886073536917j	0,0099111660168152+10,9808272964323j
2500	362	-1,0365324931492+46,6186825608124j	363,355377143318-46,6188656319806j	0,00809255283330797+10,9819711573541j
2750	399	-1,15452037356821+46,6489407202852j	399,705249545043-46,6491239102694j	0,00627393964980145+10,983115018276j
3000	435	-1,27250825398723+46,679198879758j	436,055121946769-46,6793821885601j	0,00445532646629424+10,9842588791979j
3250	471	-1,3904961344061+46,709457039231j	472,404994348495-46,7096404668488j	0,00263671328281908+10,9854027401198j
3500	507	-1,50848401482512+46,7397151987036j	508,754866750221-46,7398987451375j	0,000818100099311853+10,98654610416j
3750	543	-1,62647189524412+46,7699733581764j	545,104739151947-46,7701570234276j	-0,00100051308419391+10,98764619635j
4000	580	-1,74445977566301+46,8002315176494j	581,454611553673-46,8004153017163j	-0,00281912626766981+10,98883432254j
4250	616	-1,86244765608201+46,8304896771224j	617,804483955412-46,8306735800678j	-0,0046377394511763+10,9899781838073j

P _{str} (kW)	I _{str} (A)	I _{str} (A)	I _t (A)	I _{VNO} (A)
4750	688	-2,09842341692004+46,8910059960678j	690,504228758866-46,891190136646j	-0,00827496581819004+10,992265905651j
5000	725	-2,21641129733892+46,9212641555408j	726,854101160589-46,9214484149375j	-0,0100935790016652+10,9934097665729j
5250	761	-2,33439917775794+46,9515223150134j	763,203973562318-46,9517066932256j	-0,0119121921851724+10,9945536274947j
5500	797	-2,45238705817694+46,9817804744862j	799,55384596404-46,9819649715151j	-0,0137308053686796+10,9956974884166j
5750	833	-2,5703749385958+47,0120386339592j	835,903718365763-47,0122232498066j	-0,0155494185521541+10,9968413493385j
6000	870	-2,68836281901482+47,042296793432j	872,253590767491-47,0424815280947j	-0,0173680317356613+10,9979852102604j
6250	906	-2,80635069943384+47,0725549529048j	908,603463169235-47,0727398064466j	-0,0191866449191678+10,9991290711822j
6500	942	-2,92433857985284+47,1028131123774j	944,953335570949-47,1029980846728j	-0,0210052581026699+11,000272932104j
6750	978	-3,0423264602717+47,1330712718506j	981,303207972685-47,1332563630243j	-0,0228238712861451+11,001416793026j
7000	1014	-3,16031434069072+47,1633294313234j	1017,65308037441-47,1635146413143j	-0,0246424844696515+11,0025606539478j
7250	1051	-3,27830222110972+47,193587590796j	1054,00295277614-47,1937729196038j	-0,0264610976531581+11,0037045148696j
7500	1087	-3,39629010152862+47,223845750269j	1090,35282517787-47,224031197892j	-0,0282797108366339+11,0048483757916j
7750	1123	-3,51427798194762+47,2541039097418j	1126,70269757959-47,2542894761827j	-0,0300983240201419+11,0059922367134j
8000	1159	-3,63226586236662+47,2843620692146j	1163,05256998131-47,2845477544723j	-0,0319169372036476+11,0071360976353j
8250	1196	-3,75025374278564+47,3146202286874j	1199,40244238305-47,314806032823j	-0,0337355503871542+11,0082799585571j
8500	1232	-3,86824162320452+47,3448783881602j	1235,75231478477-47,3450643110505j	-0,03555416357063+11,009423819479j
8750	1268	-3,98622950362352+47,3751365476332j	1272,1021871865-47,3753225894038j	-0,0373727767541366+11,0105676804009j
9000	1304	-4,10421738404254+47,405394707106j	1308,45205958823-47,405580867692j	-0,039191389937643+11,0117115413228j
9250	1341	-4,22220526446142+47,4356528665788j	1344,80193198996-47,4358391459815j	-0,041010003121119+11,0128554022447j
9500	1377	-4,34019314488044+47,4659110260516j	1381,15180439168-47,4660974242714j	-0,0428286163046254+11,0139992631665j
9750	1413	-4,45818102529944+47,4961691855246j	1417,50167679342-47,496355702623j	-0,0446472294881319+11,0151431240884j

C – Parametry transformátoru

Main Technical Parameters for 110kv power transformer Level S(F)SZ9, S(F)SZ10, S(F)SZ11 Series

three-phase three winding on-load-tap-changing power transformer:

额定容量 Rated power (kVA)	高压电压 High Voltage (kV)	高压分接范围 H.V. Tap range	中压电压 Middle Voltage (kV)	低压电压 Low Voltage (kV)	联结组 标号 Connection symbol	短路阻抗 Short-Circuit Impedance (%)	空载损耗 No-Load Loss (kW)			负载损耗 On-Load Loss (kW)			空载电流 No-Load Current (%)	重量 Weight (T)			外形尺寸(mm) Overall dimension			轨距 Gauge (mm)
							9型 损耗	10型 损耗	11型 损耗	9型 损耗	10型 损耗	11型 损耗		运输重 Unloading Weight	油重 Oil	总重 Total	长 L	宽 W	高 H	
6300	110 121	±2×2.5%	37 38.5	10.5 11	YNyn0d11	10.5 6.5	12.4	11.1	9.75	47.7	45.1	45.1	0.34	28.7	9	34	6980	4220	4680	1475×14
8000							14.9	13.4	11.8	56.7	53.6	53.6	0.34	31.5	11.5	33	7030	4580	4890	1475×14
10000							17.6	15.8	13.9	66.6	62.9	62.9	0.79	32.8	12.3	41.5	7160	4580	5100	1475×14
20000							29.6	26.5	23.4	112.5	106.3	106.3	0.74	47.2	17	56.7	7450	5000	5500	2040×20
25000							34.9	31.2	27.5	133.2	125.8	125.8	0.69	53.4	19.2	63.7	7500	5160	5520	2040×20
31500							41.6	37.2	32.8	157.5	148.8	148.8	0.69	61.2	22.2	75.8	7550	5200	5580	2040×20
40000							49.7	44.5	39.2	189	178.5	178.5	0.64	70.8	25.7	87.9	7700	5250	5700	2040×20
50000							48.5	52.6	46.5	225	212.5	212.5	0.64	79.5	28.7	96.9	7750	5400	5800	2040×20
63000							69.9	62.6	55.2	270	255	255	0.59	88.9	31.5	108.2	7850	5450	5850	2040×20

D – Parametry VN kabelu

22-AXEKVCE

Elektrické parametry:

Electrical properties:

Počet x průřez žil/štinění <i>No. of cores and cross-section</i> (mm ²)	Činný odpor při 20°C <i>DC resistance at 20°C (min.)</i> (Ω/km)	Kapacita <i>Capacitance</i> (μF/km)	Indukčnost (v trojúhelníku) <i>Cable inductance (trefoil installation)</i> (mH/km)	Indukčnost na vzduchu (paralelně) <i>Cable inductance on air (parallel)</i> (mH/km)	Indukčnost v zemi (paralelně) <i>Cable inductance in ground (parallel)</i> (mH/km)
1x50/16	0.641	0.17	0.46	0.64	0.72
1x70/16	0.443	0.19	0.44	0.61	0.69
1x95/16	0.320	0.21	0.42	0.59	0.67
1x120/16	0.253	0.23	0.40	0.57	0.64
1x150/25	0.206	0.25	0.39	0.55	0.61
1x185/25	0.164	0.27	0.37	0.54	0.59
1x240/25	0.125	0.30	0.36	0.52	0.57
1x300/25	0.100	0.32	0.34	0.50	0.55
1x400/35	0.078	0.36	0.33	0.48	0.52
1x500/35	0.061	0.40	0.31	0.46	0.50
1x630/35	0.047	0.44	0.30	0.45	0.48

E – Parametry střídače

SUNNY CENTRAL

500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT

Technické údaje	Sunny Central 500CP XT	Sunny Central 630CP XT
Vstup (DC)		
Max. DC výkon (při $\cos \phi = 1$)	560 kW	713 kW
Max. vstupní napětí ¹	1000 V / volitelně 1100 V	1000 V / volitelně 1100 V
Min. vstupní napětí / $U_{MPP, min}$ při $I_{MPP} < I_{OC, max}$	429 V / 430 V	498 V / 500 V
Rozsah MPP napětí (při 25 °C / při 50 °C a 50 Hz)	449 V - 850 V / 430 V - 850 V ²	529 V - 850 V / 500 V - 850 V ²
Rozsah MPP napětí (při 25 °C / při 50 °C a 60 Hz)	449 V - 850 V / 436 V - 850 V ²	529 V - 850 V / 505 V - 850 V ²
Jmenovité vstupní napětí	449 V	529 V
Max. vstupní proud	1250 A	1350 A
Počet nezávislých MPP vstupů	1	1
Počet DC vstupů	9 / 32 (Optiprotect)	9 / 32 (Optiprotect)
Výstup (AC)		
Jmenovitý výkon (při 25 °C) / jmenovitý AC výkon (při 50 °C)	550 kVA / 500 kVA	700 kVA / 630 kVA
Jmenovité AC napětí / rozsah jmenovitého AC napětí	270 V / 243 V - 297 V	315 V / 284 V - 347 V
Síťová frekvence AC / rozsah	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz
Jmenovitá síťová frekvence / jmenovité síťové napětí	50 Hz / 270 V	50 Hz / 315 V
Max. výstupní proud	1176 A	1283 A
Max. harmonické zkreslení	< 3 %	< 3 %
Účinnost při jmenovitém výkonu / nastavitelný účinník	1 / 0,9 přebuzený ... 0,9 podbuzený	
Napájecí fáze / připojovací fáze	3 / 3	3 / 3
Účinnost³		
Max. účinnost / evrop. účinnost / účinnost CEC	98,6 % / 98,4 % / 98,5 %	98,7 % / 98,5 % / 98,5 %
Bezpečnostní a monitorovací zařízení		
Odpojovací zařízení na straně vstupu	motorem poháněný odpínač zátěže / výkonový vypínač (Optiprotect)	
Odpojovací zařízení na straně výstupu	výkonový vypínač AC	
DC přepěťová ochrana	svodič přepětí typu I	
Ochrana proti atmosférickému přepětí (podle normy IEC 62305-1)	třída ochrany proti atmosférickému přepětí III	
Kontrola stavu sítě	●	●
Kontrola zemního spojení / možnost dálkového ovládání kontroly zemního spojení	○ / ○	○ / ○
Sledování stavu izolace	○	○
Svodič přepětí pomocného zdroje	●	●
Třída ochrany (podle normy IEC 62103) / přepěťová kategorie (podle normy IEC 60664-1)	I / III	I / III
Všeobecné údaje		
Rozměry (Š / V / H)	2562 / 2272 / 956 mm (101 / 89 / 38 palců)	
Hmotnost	1900 kg / 4200 lb	
Rozsah provozních teplot	-25 °C ... +62 °C / -13 °F ... +144 °F	
Emise hluku ⁴	60 db(A) 60 db(A)	
Max. vlastní spotřeba (provoz) / vlastní spotřeba (noc)	1700 W ⁴ / < 100 W 1700 W ⁴ / < 100 W	
Napětí externího pomocného zdroje	230 V / 400 V (3/N/PE)	230 V / 400 V (3/N/PE)
Způsob chlazení	OptiCool	OptiCool
Stupeň krytí elektroniky / oblast připojení (podle normy IEC 60529)	IP54 / IP43	IP54 / IP43
Stupeň krytí (podle normy IEC 60721-3-4)	4C2, 4S2	4C2, 4S2
Oblast použití	bez ochrany ve venkovních prostorech	
Maximální povolená relativní vlhkost (bez kondenzace)	15 % ... 95 %	15 % ... 95 %
Maximální provozní nadmožská výška	2000 m	2000 m
Spotřeba čerstvého vzduchu (střídač)	3000 m ³ /h	3000 m ³ /h

F – Parametry dekompenzačních tlumivek



dodavatel
pro výrobu
rozvaděčů



Dekompenzační tlumivky KBH

KBH Energy s.r.o., Na Spravedlnosti 1533, 530 02 PARDUBICE, CZECH REPUBLIC
Tel.: +420 777 730 001, Fax: +420 466 330 714, Email: kbh@kbh.cz, www.KBH.cz

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

- Samozřejmostí jsou provedení pro různé výkony a napěťové hladiny dle přání zákazníka.
- Způsob připojení a rozměry lze přizpůsobit dle specifických požadavků.