ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza zpětných vlivů zdrojů rozptýlené výroby na distribuční síť

vedoucí práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**
konzultant: **Ing. Martin Kašpírek, Ph.D.**
autor: **Bc. Jan Petrásek** **2013**

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jan PETRÁSEK**
Osobní číslo:	**E11N0130P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektroenergetika**
Název tématu:	**Analýza zpětných vlivů zdrojů rozptýlené výroby na distribuční síť**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Popište výhody a nevýhody fotovoltaických (FV) výroben, uveďte současný stav jejich využívání v ČR a porovnejte ho ve vztahu k dalším evropským zemím, zhodnoťte potenciál jejich dalšího využití.
2. Proveďte posouzení provozu FVE z hlediska roční energetické výtěžnosti vztažené na jednotkový instalovaný výkon, měrných nákladů na vyrobenou kWh a návratnosti investice, či dalších hledisek. Porovnejte je s jinými typy zdrojů.
3. Proveďte teoretické posouzení provozu FV zdrojů s ohledem na dodržení odchylek napětí dle normy ČSN EN 50 160 při kumulaci zdrojů v části distribuční sítě.
4. Proveďte praktické posouzení provozu FV zdrojů s ohledem na dodržení odchylek napětí dle normy ČSN EN 50 160 na základě analýz konkrétních měření.
5. Proveďte posouzení připojitelnosti vybraného konkrétního FV zdroje k distribuční síti s ohledem na zpětné vlivy.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 3.vydání 2012**
2. **PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav**
3. **Tesařová, M., Štroblová, M.: Průmyslová elektroenergetika, ZČU, 2000**
4. **příspěvky ve sbornících Konference CIRED z let 2006 až 2012**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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

L.S.

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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje obecně na obnovitelné zdroje energie, které budou v budoucnu nabírat na významu. Hlavně z toho důvodu, že zásoby uhlí jsou vyčerpatelné, a proto budou muset být tepelné elektrárny nahrazeny alternativním zdrojem energie. Konkrétně práce rozpracovává jeden z druhů OZE a to fotovoltaické elektrárny. Na začátku jsou popsány fotovoltaické panely, jejich historie a princip. Dále je uvedeno využití energie ze Slunce v podmínkách ČR. Třetí bod se zabývá návratností investice do fotovoltaické výrobny elektřiny. Poslední teoretický bod přibližuje problematiku kvality napětí. Hlavní náplní práce je posouzení zpětných vlivů na distribuční síť. Nejprve jsou vyhodnocena získaná data z měření od společnosti E.ON. Kontroloval jsem odchylky napětí, které musí být mezi 90 a 110 procenty jmenovitého napětí. Na závěr práce jsem provedl posouzení připojitelnosti dané FVE, kontroloval jsem navýšení napětí připojenou fotovoltaickou elektrárnou a harmonické proudy.

Otázkou zůstává, zda je nejlepší cestou budovat fotovoltaické elektrárny, či dát přednost například vodním elektrárnám. Tuto úvahu podporuje také fakt, že v roce 2011 bylo v ČR z 1 MW instalovaného výkonu vyrobeno FVE 1 074,6 MWh a VE 2 688,2 MWh. Na jednotku instalovaného výkonu vyrobí vodní elektrárny 2,5x více elektrické energie.

Klíčová slova

Obnovitelný zdroj energie, fotovoltaická elektrárna, návratnost investice, kvalita napětí, odchylka napětí, harmonický proud

Analysis of distributed generation sources impacts on the distribution network

Annotation

The Master thesis focuses generally on renewable sources of energy which will in future be gaining in importance. Mainly because reserves of coal are finite and for this reason thermal power plants will have to be replaced with alternative source of energy. Specifically, work elaborates on one kind of renewable sources energy namely photovoltaic power plants. At the beginning photovoltaic panels are described, their history and principles. Next, the use of energy from the sun in Czech Republic is mentioned. The third point deals with the return on investment in photovoltaic power plants. The issue of quality of voltage is closely described in last theoretical point. The main concern of thesis is the assessment of feedback effects on the distribution network. First, the data are evaluated, which were obtained from measurements from company E.ON. I checked the deviation of voltage, which must be between 90 and 110 percent of rated voltage. At the end of the work, I undertook the assessment of the connectivity the photovoltaic power plants, I checked increase of voltage with connected photovoltaic power plants and harmonic currents.

The question remains whether the best way is building photovoltaic power plants, or to prefer for example water power plants. The fact that in year 2011 it was from 1 MW installed capacity it was produced from photovoltaic power plants 1 074,6 MWh and from water power plants 2 688,2 MWh supports this thought. Water power plants produced 2,5 times more electrical energy per unit installed capacity.

Key words

Renewable source of energy, photovoltaic power plant, return of investment, quality of voltage, deviation of voltage, harmonic current

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Českých Budějovicích dne 2.5.2012 Jméno příjmení

……..……..

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád také poděkoval společnosti E.ON Česká republika, s.r.o., F. A. Gerstnera 2151/6, České Budějovice, se kterou jsem spolupracoval při vypracování diplomové práce. Jmenovitě hlavně konzultantovi diplomové práce Ing. Martinu Kašpírkovi, Ph.D.

V neposlední řadě mi je milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na ZČU podíleli.

Obsah

1 ÚVOD 10
2 FOTOVOLTAICKÉ VÝROBNY ELEKTŘINY 13
2.1 Historie fotovoltaických článků 13
2.2 Princip výroby elektřiny 13
2.3 Typy fotovoltaických článků 14
2.3.1 První generace 14
2.3.2 Druhá generace 14
2.3.3 Třetí generace 15
2.3.4 Čtvrtá generace 15
2.4 Typy fotovoltaických panelů dle konstrukce 15
2.4.1 Systémy s pevným stojanem 15
2.4.2 Systémy s pohyblivým stojanem 16
2.5 Využití fotovoltaických výroben v ČR 17
2.5.1 Geografické podmínky 18
2.5.2 Fotovoltaické elektrárny v ČR 19
2.6 Porovnání s ostatními evropskými zeměmi (Španělsko) 19
2.7 Zhodnocení FV 20
2.7.1 Výhody 21
2.7.2 Nevýhody 21
2.8 Porovnání s biomasou, větrnými elektrárnami 22
3 POSOUZENÍ PROVOZU FVE 23
3.1 Životnost FP 23
3.2 Výnosnost a návratnost investice 24
3.2.1 Výkupní ceny 24
3.2.2 Zelený bonus 24
3.3 Zdanění 25
3.4 Posouzení konkrétní FV 25
3.4.1 Výpočet návratnosti investice 26
3.5 Porovnání výkupní ceny s VTE, biomasou 28
4 KVALITA NAPĚTÍ 28
4.1 Odchylky napájecího napětí 30
4.2 Hodnocení odchylek napájecího napětí 31
4.2.1 Délka měření 31
4.2.2 Zhodnocení měření 31
4.3 Kumulace zdrojů v části DS 32
4.3.1 Zvýšení napětí 33
4.3.2 Změna napětí při spínání 33
5 PRAKTICKÉ POSOUZENÍ PROVOZU FVE 34
5.1 Data 34
5.2 Vyhodnocení 34
5.3 Výsledky 35
6 POSOUZENÍ PŘIPOJITELNOSTI KONKRÉTNÍ FVE 42
6.1 Zhodnocení zvýšení napětí 43
6.2 Zhodnocení harmonických proudů 45
7 ZÁVĚR 49
POUŽITÁ LITERATURA 51
PŘÍLOHY 54

Seznam symbolů

FČ .....Fotovoltaický článek

FP.....Fotovoltaický panel

W_p.....Watt peak (špičkový výkon)

I (W/m^2).....Intenzita slunečního záření

FV .....Fotovoltaická výrobna

OZE .....Obnovitelný zdroj energie

FVE.....Fotovoltaická elektrárna

ES .....Energetická soustava

P_i, P_n (kWp).....Instalovaný výkon

ERÚ .....Energetický regulační úřad

DS.....Distribuční soustava

PS.....Přenosová soustava

NT, VT.....Nízký, vysoký tarif el. energie

VE.....Vodní elektrárna

VTE .....Větrná elektrárna

N_N (Kč).....Nákupní cena

P_G (%) .....Garantovaný výkon

E (kWh) .....Vyrobená elektrická energie

T (h).....Průměrná doba ročního využití maxima instalovaného výkonu

N_P (Kč).....Provozní náklady elektrárny

N_{VC} (Kč).....Zisk z výkupní ceny

N_{ZB} (Kč).....Zisk ze zeleného bonusu

N_{VS} (Kč).....Úspora na vlastní spotřebě domu

ROI_{VC} (Kč).....Návratnost investice při prodeji distributorovi (return on investment)

ROI_{ZB} (Kč).....Návratnost investice při využití zeleného bonusu

U_n.....Jmenovité napájecí napětí

OZ.....Opětovné zapnutí (sytém opětovného zapnutí)

P.....Míra vjemu blikání

THD.....Celkový činitel zkreslení napětí

u_2.....Činitel nesymetrie

PPDS.....Pravidla provozování distribuční sítě

DTS.....Distribuční transformační stanice

DT.....Distribuční transformátor

R .....Odpor

X .....Reaktance

Z .....Impedance

S_K.....Zkratový výkon

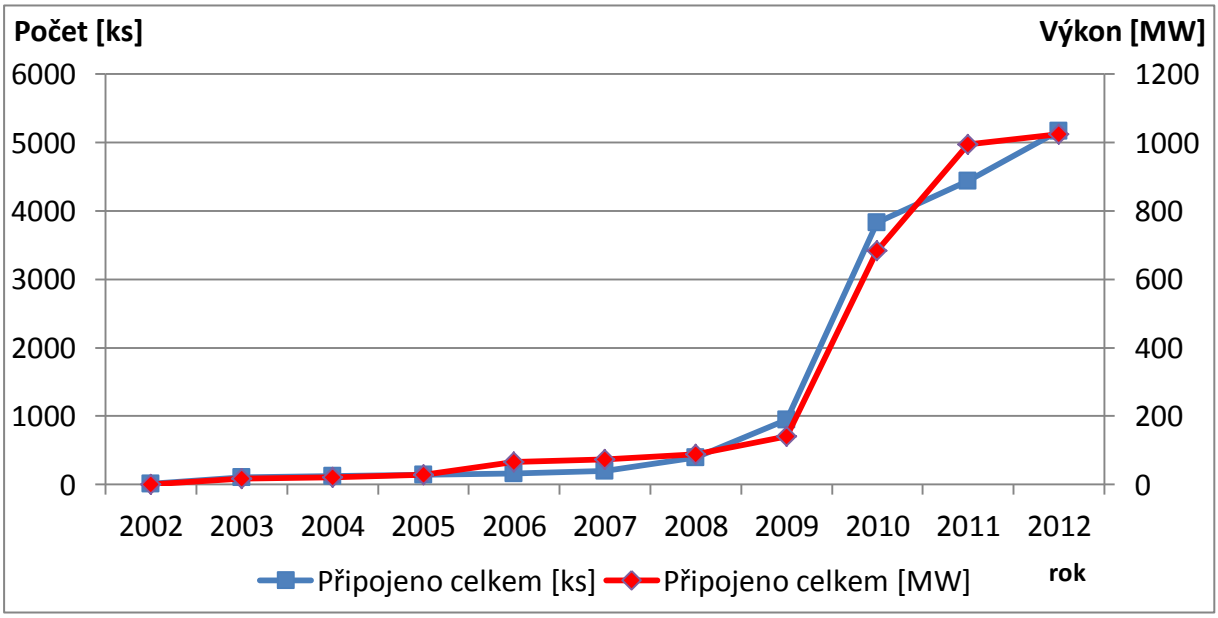
cos φ.....Účiník

1 Úvod

Obnovitelné zdroje elektrické energie (OZE) dnes nezastupují zásadní roli ve výrobě elektrické energie, významně jsou vnímány při pohledu na šetrnost, s jakou působí na životní prostředí, a také při pohledu do budoucnosti, kdy by mohly dosáhnout daleko většího rozmachu. V podmínkách České republiky lze využívat následující OZE:

- voda
- vítr
- sluneční záření
- biomasa, bioplyn
- tepelná čerpadla
- geotermální energie a energie kapalných biopaliv

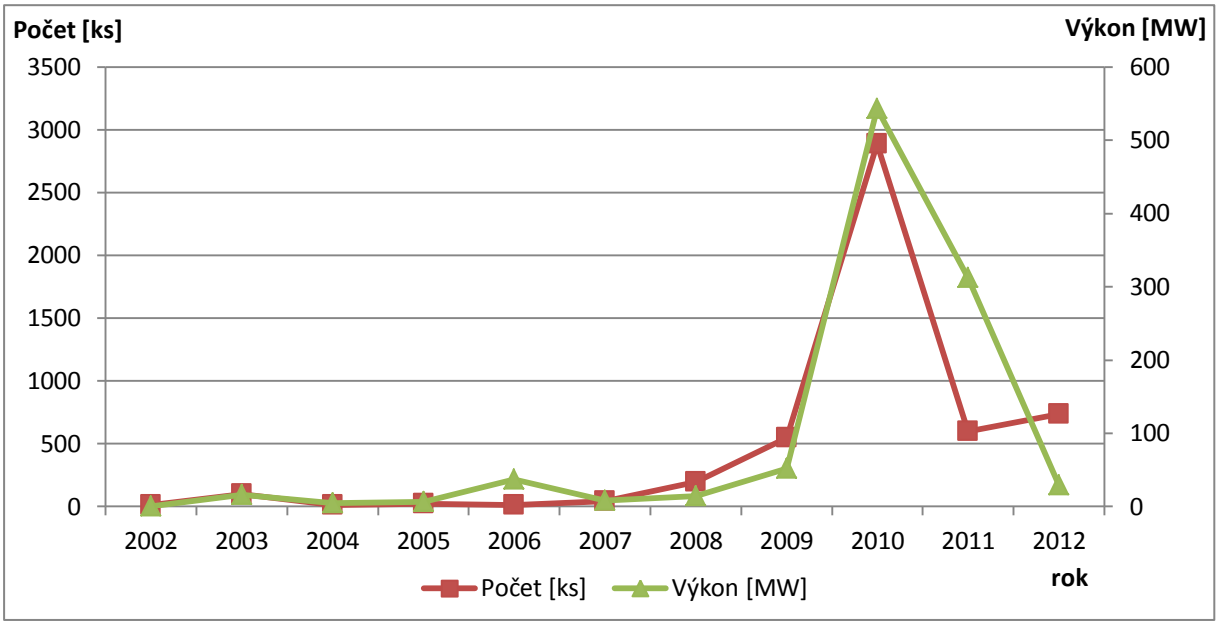
Vzhledem k poloze a klimatu ČR umožnují zdejší přírodní podmínky využívat OZE pouze jako doplněk konvenčních zdrojů. To lze zdůvodnit hlavně velmi složitou předvídatelností výroby z OZE, s čímž velmi úzce souvisí také možné nežádoucí přetěžování kapacity přenosových a distribučních sítí. Vývoj množství připojených OZE, započítány jsou vodní (VE), větrné (VTE), fotovoltaické (FVE) a bioplynové výrobny, do sítě E.ON Distribuce, a.s. je zobrazen v grafu 1.



Graf 1 Vývoj počtu OZE v síti E.ON [8]

Největší nárůst počtu obnovitelných zdrojů energie byl společností E.ON zaznamenán mezi lety 2009 – 2010. V roce 2010 došlo k velkému zvýšení hlavně z důvodu boomu FVE,

pro představu je v grafu 2 vyobrazen každoroční počet nových připojených OZE (s jejich instalovaným výkonem). Ve zmíněném roce dosáhl počet nových výroben na číslo 2 889 kusů. I po tomto období počet připojovaných zdrojů nadále stoupal, ale ne již tak rapidně. Graf 1 zobrazuje stav na konci roku 2012, tehdy bylo do distribuce společnosti připojeno 5 169 ks výroben.



Graf 2 Počet nově připojených OZE (s jejich instalovaným výkonem) do sítě E.ON v daném roce [8]

Přečerpávací vodní elektrárny a malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 10 MW se nezapočítávají dle metodiky EU mezi zařízení vyrábějící elektřinu z OZE. Tedy při „opomenutí“ vodních elektráren, je práce zaměřena na druhý nejrozšířenější OZE v ČR a to na sluneční elektrárny. Úvodní kapitola byla zpracována na základě zdrojů 1, 3 a 8 uvedených v seznamu literatury.

V teoretickém úvodu DP jsou popsány fotovoltaické výrobny elektřiny, je zde rozebrán princip získávání elektřiny ze Slunce, poté je přiblíženo využití FVE v podmínkách ČR. Dalším bodem zadání bylo posoudit návratnosti investice do solární elektrárny, ta je vyčíslena ve třetím bodě. Následně je přiblížena také kvalita napětí dle ČSN 50160.

V praktické části diplomové práce je řešeno posouzení provozu připojených FVE do sítě nízkého napětí společnosti E.ON, připojování těchto zdrojů rozptýlené výroby sebou přináší nestabilitu do sítě. Práce je zaměřena konkrétně na jeden parametr kvality napětí, a to dovolené odchylky napájecího napětí. Vyhodnocována jsou data z 23 sítí, údaje z měření jak v distribuční transformační stanici (DTS), tak i přímo na svorkách u FVE. Měření na všech sítích proběhlo dvakrát (rok 2011 a 2012), bude tedy zhodnoceno, zda nápravná opatření

u nevyhovujících sítí měla tížený výsledek. Závěr práce se zaměřuje na vyhodnocení zpětných vlivů při připojení konkrétní FVE. Pro posouzení byly zvoleny dva kontrolované parametry, zvýšení napětí vlivem připojené fotovoltaické výrobny a dodržení přípustných harmonických proudů.

Toto téma jsem si vybral z toho důvodu, že vnímám v budoucnosti potřebu nahradit stávající zdroje energie jinými. Příkladem jiného zdroje může být právě zmiňovaná fotovoltaická elektrárna. Chtěl jsem tedy do problematiky FVE více proniknout a zjistit, jak si tento alternativní zdroj stojí v porovnání s ostatními, do budoucna zvažovanými elektrárnami. Dalším důvodem bylo, že mne zajímalo co je pravdy na tom, jakou měrou negativně ovlivňují FV distribuční síť, což často uvádějí média.

2 Fotovoltaické výrobny elektřiny

Tyto elektrárny využívají získávání energie přímo ze slunečního záření, čímž vzhledem k ochraně životního prostředí patří mezi nejčistší a nejšetrnější způsoby produkce elektřiny. Slunce představuje přírodní energetický zdroj s dostatečným potenciálem dnes i do budoucna. Ovšem nyní jsme schopni z jednoho metru aktivní plochy získat maximálně 110 kWh el. energie za rok. Při porovnání s jinými zdroji elektrické energie je patrná vysoká nákladnost výroby elektřiny pomocí fotovoltaických systémů.

Podíl z celkové energie slunečního záření využitý stávajícími solárními elektrárnami je zanedbatelný. I přes fakt, že energie ze slunečního záření představuje pouze cca. 0,01% z celkové světové produkce, mají FP vysoký potenciál rozvoje. Vyspělé státy tento obnovitelný zdroj neopomíjejí a vynakládají nemalé finanční prostředky na jeho zdokonalování. Časem se tedy dá očekávat výrazné navýšení energetické účinnosti.

2.1 Historie fotovoltaických článků

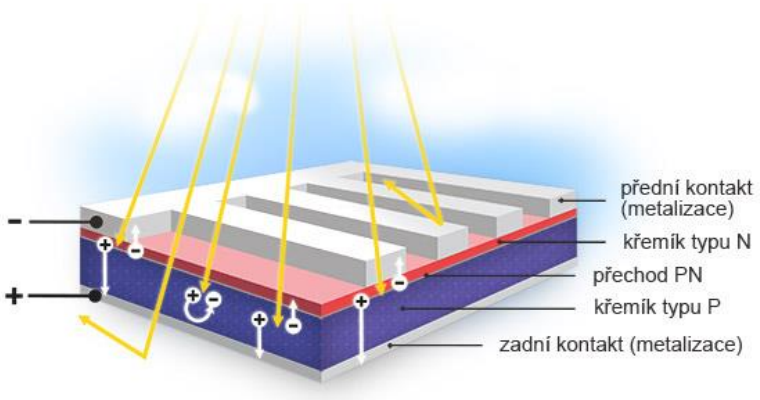
Historie sahá až do 19. století, v němž je za objevitele fotovoltaického jevu považován francouzský fyzik Alexandr Edmond Becquerel. Ten v roce 1839 při svých experimentech přišel na skutečnost, že při osvětlení kovových elektrod ponořených v elektrolytu jimi začne procházet malý proud. Vytvoření prvního tuhého fotovoltaického článku (FČ) je připisováno Adamsovi a Dayovi, kteří v roce 1877 použili k sestrojení selen.

Fotovoltaické články s příměsí jiného prvku, využívající p-n přechod, byly vyrobeny poprvé v roce 1954 v Bellových laboratořích. Účinnost kolem 6% již byla dosti využitelná z praktického hlediska, brzdou ovšem byla velmi vysoká cena. Jediným odvětvím, v němž vysoká cena nehrála roli, bylo použití FČ u umělých družic. Až ropná krize v 70. letech 20. století donutila lidstvo uvažovat o využití solárních článků na Zemi. V tomto období bylo snahou všech vlád zbavit se závislosti na ropě, proto do výzkumů technologií na výrobu energie vynaložily mnoho peněz.

2.2 Princip výroby elektřiny

Fotovoltaický článek si lze představit jako velkoplošnou diodu. Je tvořen tenkým plátkem křemíku, ve kterém se v malé hloubce pod povrchem nachází p-n přechod. Na obě strany tohoto přechodu jsou připojeny vhodné kovové kontakty. Dopadem slunečního záření na přechod se generují volné elektrony a díry. Elektrony jsou nositeli záporného elektrického náboje, díry jsou naopak nosiče kladného elektrického náboje. Oba nosiče jsou odděleny elektrickým polem p-n přechodu a vyslány na opačné strany. Elektrony putují do vrstvy

typu n, čímž se tato vrstva stává záporným pólem článku. Kladný pól vytváří vrstva typu p, do které se přesunují díry. Princip je schematicky znázorněn na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Schéma fotovoltaického článku [28]

Napětí z jednoho fotovoltaického článku je dáno druhem použitého polovodiče, u křemíku se pohybuje okolo 0,6 V. Se zatížením ovšem tato hodnota ještě nepatrně klesá, při optimálním proudu, kdy je hodnota výkonu maximální dostáváme napětí 0,5 V. Pro praktické použití je to malá hodnota, proto se FČ spojují do série. V praxi se spojuje 36 či 72 článků do jednoho modulu (panelu) s celkovým výstupním napětím 18 resp. 36 V.

2.3 Typy fotovoltaických článků

Díky téměř 50 let dlouhému vývoji fotovoltaických článků bylo vyvinuto mnoho typů s rozlišnými konstrukcemi a za pomoci různých materiálů. V zásadě jsou rozlišovány 4 generace článků.

2.3.1 První generace

Tento typ je vyráběn z destičky monokrystalického křemíku, ve kterém se nachází velkoplošný p-n přechod. Základními rysy těchto článků je dobrá účinnost a dlouhodobá stabilita výkonu. Tyto aspekty ho stále udržují na pozici nejpoužívanějšího typu, zejména u velkých instalací. K výrobě se používá velmi čistý křemík, který je drahý, což je spolu s vysokou náročností výroby největší nevýhoda těchto FČ.

2.3.2 Druhá generace

Jedná se o generaci, která měla za úkol zlevnit výrobu snížením množství potřebného křemíku, z toho důvodu jsou články tenkovrstvé. Nejčastěji se vyrábí z polykrystalického, mikrokrystalického či amorfního křemíku. Snížení obsahu křemíku má za následek jak snížení účinnosti, tak i stability, což je nevýhoda těchto článků. Nově je křemík nahrazován jinými prvky. Výhoda druhé generace spočívá, díky tenké vrstvě, v pružnosti a ohebnosti. Je

možné vyrábět fotovoltaické fólie, které mohou být součástí oblečení nebo batohu pro účely nabíjení mobilního telefonu, apod.

2.3.3 Třetí generace

Zde není pro oddělení nábojů využíván p-n přechod, ale je použita jiná metoda, mnohdy i jiný materiál. Jde kupříkladu o fotoelektrochemické či polymerní články. Dále se uplatňují nanostruktury ve formě uhlíkových nanotrubiček nebo nanotyčinek. Hlavní výhodu takovýchto struktur skýtá možnost cíleného ovlivňování optických a elektrických vlastností. Třetí generace článků není v praxi téměř vůbec využívána.

2.3.4 Čtvrtá generace

Fotovoltaické články 4. generace se skládají z jednotlivých vrstev z různých prvků. Každá z vrstev je schopna využít určitý rozsah vlnových délek světla, to co není schopna využít, propouští do hlubších vrstev kde je světlo využito. Díky tomu články efektivně využívají širokou část slunečního spektra.

2.4 Typy fotovoltaických panelů dle konstrukce

Fotovoltaické panely (FP) jsou umisťovány na střechy, fasády nebo na různé konstrukce, jež se postaví na vhodná místa. Solární architektura, zabývající se začleňováním FP do přírody nebo na stavební konstrukce s ohledem na estetiku, je velmi rychle se rozvíjející obor. Projektanti kladou největší důraz na efektivitu konstruovaného zařízení, tu nemalou měrou ovlivňuje možnost nastavení sklonu a zeměpisné orientace panelu.

2.4.1 Systémy s pevným stojanem

Systémy fotovoltaických panelů s pevným stojanem se vyznačují neměnným nastavením sklonu a zeměpisnou orientací. Ovšem i toto pevné nastavení je vhodné nejméně dvakrát za rok změnit s ohledem na zimní či letní období. Tímto opatřením se docílí co nejlepšího využití FP. Při nemožnosti změny sklonu fotovoltaického panelu během roku se optimalizuje celý systém na využívání v zimních měsících, v těchto měsících je energie ze Slunce nejmenší. Pokud je možné při instalaci FP zvolit orientaci a sklon, je vhodné jako ideální azimutní orientaci zvolit nastavení přední strany k jihu. Za ideální sklon je považován takový, kdy za poledne dopadá sluneční svit kolmo na přední stranu panelu. Z čehož vyplývá, že ideální úhel dopadu v poledne je nulový. V praxi je doporučováno v podmínkách ČR nastavovat panely pod úhlem 35° - 45°.

Pokud chceme zvýšit objem vyrobené energie, je možné využít tzv. oboustranných panelů. Tyto panely jdou instalovat pouze v případě, že panely nejsou spodní stranou

přidělány k neprůhledné stěně. Oboustranné panely využívají navíc i příspěvku záření, které je odraženo z terénu či konstrukce budovy. Mezi dobré materiály, z pohledu odrazivosti, lze zařadit např. sníh, beton, naopak špatný odraz má tráva nebo hlína.

2.4.2 Systémy s pohyblivým stojanem

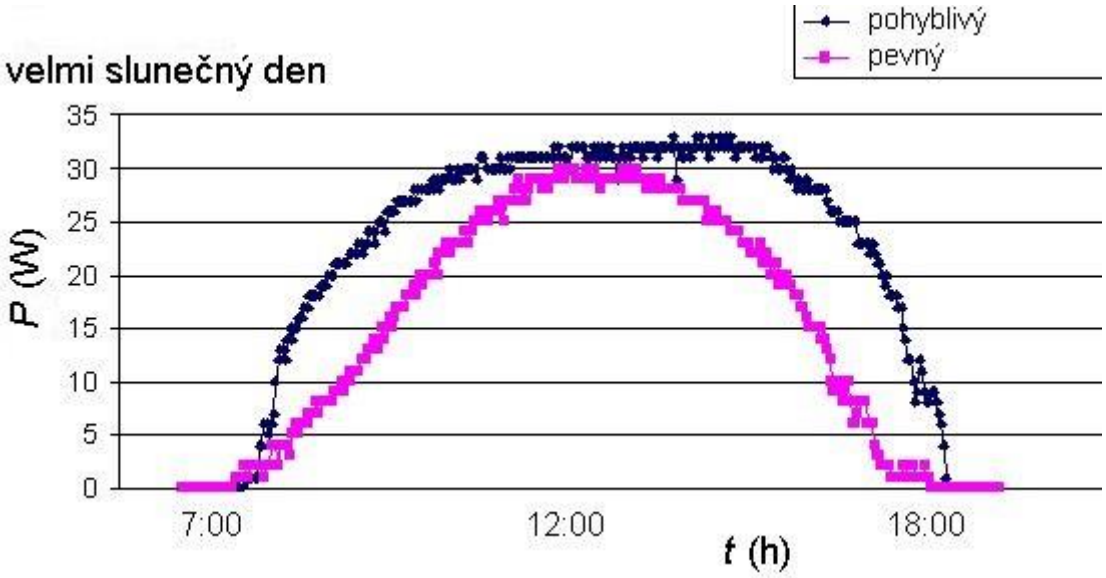
Fotovoltaické systémy s pohyblivým stojanem jsou velmi diskutovány hlavně kvůli tomu, že mohou oproti systémům s pevným stojanem velmi zefektivnit celou výrobu energie. Značně navýší její množství, čímž se energie i znatelně zlevní. FP s pohyblivým stojanem je zobrazen na obr. 2.4.2.a.

Obrázek 2.4.2.a Fotovoltaický panel s pohyblivým stojanem [31]

Největší výkon lze z FP získat při ideálním sklonu, který je, jak již bylo zmíněno, v okamžiku, kdy sluneční záření dopadá na panel v kolmém směru. Tento výkon je u kvalitních kolektorů na bázi krystalického křemíku, jež mají účinnost 18÷20%, 200 W_p na 1 m^2 plochy panelu při uvažované maximální intenzitě slunečního záření (I=1 100 W/m^2). Čím je dopad slunečních paprsků šikmější k ploše kolektoru, tím více je hodnota výkonu nižší. Což vysvětluje výše zmíněnou výhodu pohyblivého stojanu vůči pevnému. Systém pohyblivého stojanu přináší pro panel možnost sledovat pohyb Slunce po obloze, tedy udržovat úhel dopadu slunečního záření na kolektor nulový. Fotovoltaický panel vyrábí maximální možnou energii téměř po celý den. Při podmínkách na Zemi je nutné vzít v úvahu fakt, že po východu a před západem sluneční svit proniká skrz silnou vrstvu atmosféry, což intenzitu pronikajícího záření značně snižuje v porovnání s poledním svitem. Použití pohyblivého stojanu na území České republiky znamená navýšení účinnosti o cca 30%, při instalaci v nejhodnější oblasti pro FP tato hodnota může být až 40%.

Pohyb Slunce na obloze a následné pokyny pro natočení panelu zajišťují tzv. sledovače. Tyto sledovače pracují na nejrůznějších principech a většinou jsou patentovány. Následující výčet zahrnuje v praxi nejpoužívanější sledovače:

- sledovače na principu hodinových strojků
- sledovače na principu vypařování a kondenzace freonu
- sledovače na principu diferenciálního porovnání intenzity slunečního záření na FČ tvořících senzor
- sledovače na principu pružin z paměťových slitin
- sledovače typu TRAXLE™



Obrázek 2.4.2.b Porovnání výkonové charakteristiky pohyblivého a pevného stojanu FP [17]

2.5 Využití fotovoltaických výroben v ČR

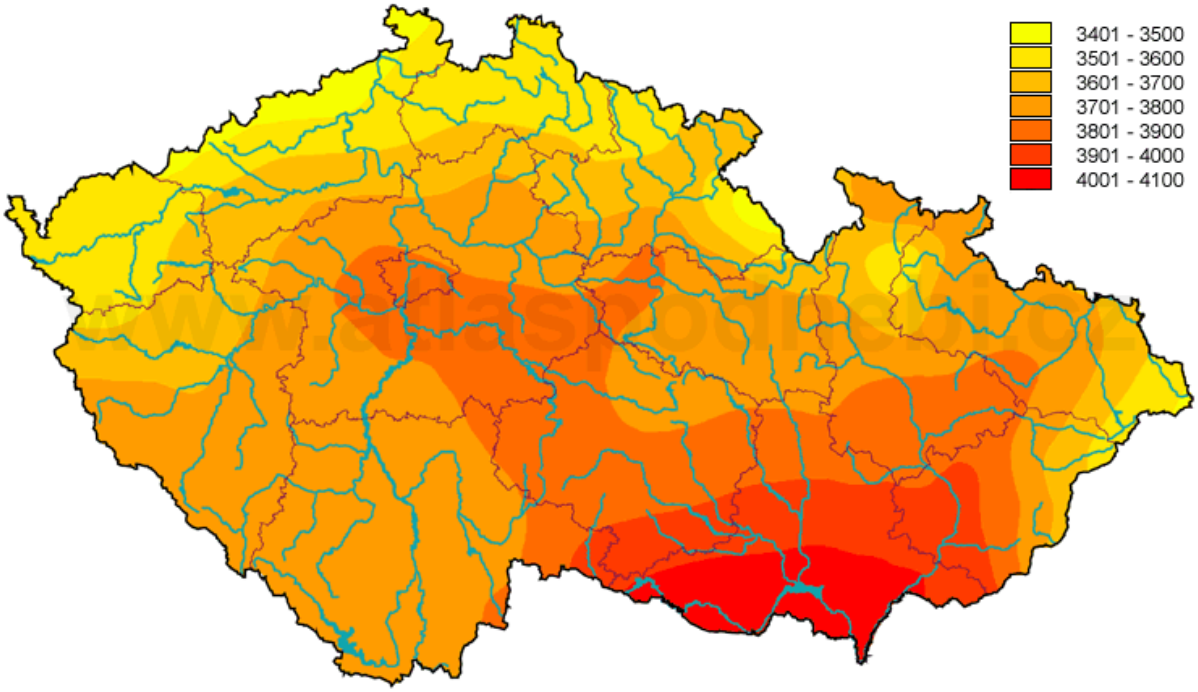
Mezi lety 2008 a 2011 v České republice prudce vzrůstal počet solárních elektráren, to bylo zapříčiněno udělováním dotací pro výrobu tzv. „zelené“ elektřiny z OZE. Tento fotovoltaický boom je svým způsobem žádoucí, a to z toho důvodu, že koresponduje s představami WEC. Nynější prognózy World Energy Council (WEC) počítají se stále se zvyšujícím rozmachem a využíváním FP, a to až do takové míry, že by po roce 2040 solární energii patřil největší podíl na světové výrobě energie. Začátkem roku 2012 již počet nově vybudovaných elektráren v ČR začal stagnovat. Kvůli vysokému množství výroben s FP se již dokonce začalo uvažovat o stop stavu pro výstavbu dalších. Velkoplošné fotovoltaické elektrárny zabírající pole už není v plánu stavět. Přehled vývoje počtu provozoven fotovoltaických výroben (FV) a jejich instalovaného výkonu je v tabulce 1.

Rok	Celkový instalovaný výkon [MW]	Počet FV výroben
2008	3,40	249
2009	65,74	1 475
2010	462,92	6 032
2011	1 952,70	12 861
2012	1 958,94	13 019

Tabulka 1 Vývoj počtu solárních elektráren (stav vždy k 1.1. daného roku) [12]

2.5.1 Geografické podmínky

Množství vyrobené fotovoltaické energie v dané oblasti je nejvíce závislé na geografické poloze a klimatických podmínkách místa. Více energie ze solárních elektráren se v ČR vyprodukuje v oblastech, na něž dopadá nejvíce slunečního záření (zejména oblast jižní Moravy a jižních Čech). Naopak s nižší intenzitou dopadá slunečního svit na severní část republiky. Také oblačnost působí jako snižující faktor výroby elektřiny z FP. Čím je tedy den jasnější, tím více vyrobí solární elektrárna el. energie. Stejně jako intenzity slunečního záření



Obrázek 2.5.1 Intenzita slunečního záření v MJ/m^2·rok [29]

je nejvíce slunných dní na jižní Moravě, resp. v Mutěnicích na Hodonínsku. Na druhou stranu nejnižší počet jasných dní je v České republice udáván v Teplicích (severní Čechy).

Na jeden m^2 plochy u nás za rok dopadne přibližně 960 – 1340 kWh sluneční energie. Maximální denní hodnota množství energie ze Slunce je 6,8 kWh/m^2, tu lze získat za jasného červencového dne. Intenzita slunečního záření je zobrazena na obr. 2.5.1. Dalším faktorem

ovlivňujícím výrobu elektřiny z FP je počet slunečních hodin, ten je v Česku udáván mezi 1331 – 1844 hodinami za rok.

2.5.2 Fotovoltaické elektrárny v ČR

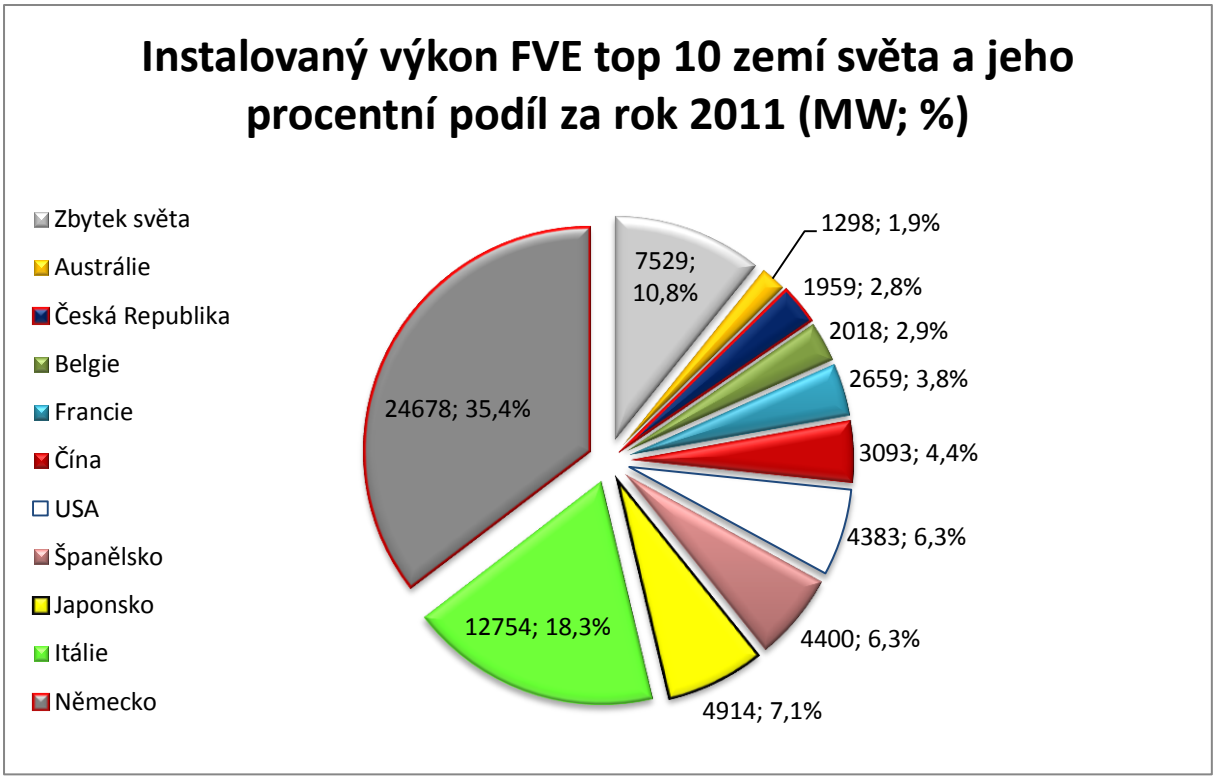
Výroben s FP je nyní v České republice velké množství, jak již bylo uvedeno, na začátku roku 2012 jich bylo přes 13 000. V následující tabulce 2 jsou zmíněny největší solární elektrárny (stav za rok 2011) seřazeny od FVE s nejvyšším instalovaným výkonem, kterou je FVE Ralsko Ra 1. Ralsko se nachází na území bývalého vojenského areálu v Libereckém kraji, 25 km jihovýchodně od České Lípy, provozovatelem elektrárny je Skupina ČEZ. Zprovozněna byla v druhé polovině roku 2010, jedná se o komplex 4 fotovoltaických elektráren vzdálených od sebe jednotky kilometrů.

Název FVE	Instalovaný výkon [MW]	Umístění (okres)	Vyvedení výkonu na napěťovou úroveň [kV]
FVE Ralsko Ra 1	38,3	Ralsko (Česká Lípa)	110
FVE CZECH Vepřek	35,1	Vepřek (Mělník)	110
FVE Ševětín	29,9	Ševětín (České Budějovice)	110
FVE Mimoň Ra 3	17,5	Mimoň (Česká Lípa)	110
FVE Vranovská Ves	16,0	Vranovská Ves (Znojmo)	110
Solar Stříbro s.r.o.	13,6	Stříbro (Tachov)	22
FVE ŽV - SUN, s.r.o.	13,0	Chomutov (Chomutov)	22
FVE Uherský Brod	10,2	Uherský Brod	22

Tabulka 2 Nejvýznamnější FVE na území ČR za rok 2011 [11] [13]

2.6 Porovnání s ostatními evropskými zeměmi (Španělsko)

Pro představu a porovnání českých fotovoltaických elektráren, nejen s ostatními evropskými zeměmi, je zde následující graf zobrazující prvních 10 zemí světa s největším instalovaným výkonem ve FVE, doplněných o zbytek světa. Více než polovinou (53,7%) světového instalovaného výkonu disponovalo na počátku roku 2012 Německo s Itálií. V seznamu jsou pouze 4 státy mimo Evropu, což z Evropy dělá fotovoltaickou velmoc. Z evropských zemí jsou zde zastoupeny státy ležící na jihu a středu kontinentu.



Graf 3 Instalovaný výkon FVE ve světě [9]

Pro porovnání jsem zvolil jeden z jižních států Evropy Španělsko, zde budou patrné kontrasty s českými podmínkami pro FVE. Geografická poloha obou zemí určuje velmi rozdílné klimatické podmínky zemí. Španělsko je blíže rovníku, Slunce tady má větší sílu a slunných dní je také více než v Česku. Různá zeměpisná šířka a klima obou zemí způsobuje velké rozdíly v množství dopadající sluneční energie. Srovnávající mapy zobrazující tuto průměrnou energii za rok jsou v příloze 1. Na jihu Španělska, kde dopadá nejvíce slunečního záření, je nejvíce solárních systémů. Na severu jich nalezneme podstatně méně. Ve Španělsku se nachází několik velkých fotovoltaických elektráren světového významu například: Parque Fotovoltaico Olmedilla de Alarcon (60 MW), Parque Fotovoltaico Puertollano (47 MW), Parque Solar "SPEX" Merida (30 MW).

2.7 Zhodnocení FV

Stejně tak jako každý zdroj energie, má také solární energie svá pozitiva i negativa. Ať již převažují ty či ony argumenty, je nezpochybnitelné, že v dlouhodobém horizontu bude nutné nahradit vyčerpatelný zdroj energie např. uhlí nějakým alternativním (nejlépe obnovitelným) zdrojem. Energie ze Slunce představuje jednu z možností. Pro zastánce tento obor představuje velké příležitosti, naopak odpůrci nedávají fotovoltaice v budoucnosti šanci. Výhody a nevýhody jsou shrnuty v následujících podkapitolách.

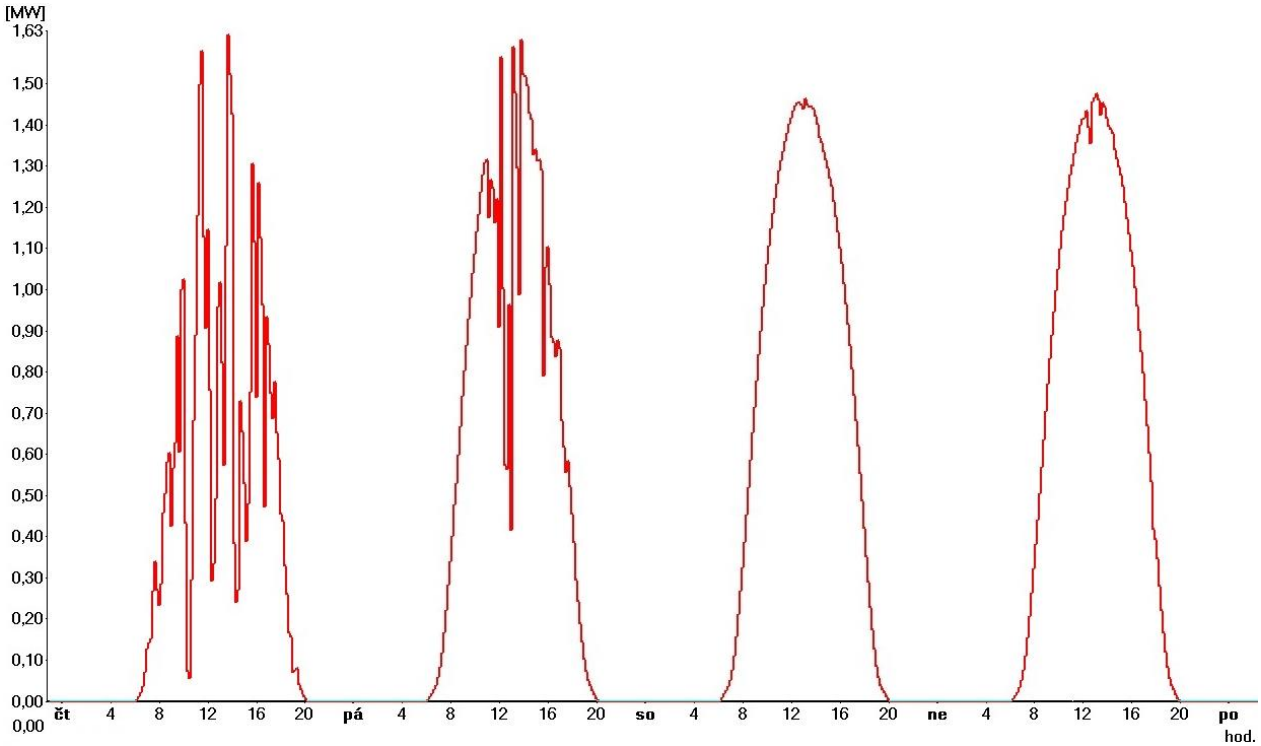
2.7.1 Výhody

Největším pozitivem fotovoltaických výroben elektřiny je fakt, že solární energie minimálně znečišťuje životní prostředí, je ekologická. Díky tomuto „plus“ je stále více a snadněji prosazována jako budoucí důležitý zdroj energie. Další výhody jsou shrnuty v následujících bodech:

- jedná se o nevyčerpatelný, tedy obnovitelní zdroj
- FV lze instalovat kdekoliv na Zemi
- fotovoltaické panely nejsou technicky složité ani náročné na údržbu, jejich životnost je vysoká
- výhodná, oproti větrným či vodním elektrárnám, je také možnost instalace solárních systémů v husté zástavbě (např. FP na střechách městských domů)
- minimální provozní náklady
- odolnost vůči nepříznivým vnějším vlivům (kroupy, mrazy)
- vybudování FVE neklade žádné velké nároky na stavební zásah do přírody, taktéž při rušení elektrárny není nákladné uvedení krajiny do původního stavu.

2.7.2 Nevýhody

Hlavní a také nejvíce omezují nevýhodou je pro fotovoltaické systémy časová nestálost a s ní související proměnná intenzita slunečních paprsků, z toho důvodu musí být při nepříznivém počasí pro fotvoltaické panely zajištěn alternativní zdroj energie. Dále je nízká hodnota hustoty sluneční energie dopadající na jednotku plochy, elektrárny musí být velmi rozsáhlé. Nepříznivý vliv na rozšiřování FV mají také jejich pořizovací náklady, které jsou velmi vysoké. Tento faktor je však v současné době potlačen, hlavně díky podporám ze strany států. Velkým negativem je taktéž i nestálost dodávky elektrické energie, ES se s těmito výkyvy těžko vyrovnává, mnohdy musí nasazovat do výroby špičkové zdroje el. energie (přečerpávací elektrárny). Pro znázornění nestálosti dodávky je na obrázku 2.7.2 zobrazen průběh dodávaného činného výkonu fotovoltaickou elektrárnou během čtyř dnů. Je patrné, že výkon je velmi závislý na oblačnosti během dne, nejlepší průběh je vidět 3. den, kdy bylo jasno. V příloze 2 je zobrazena rozdílnost vyprodukovaného výkonu za oblačného a slunečného dne. Za nevýhodu lze také považovat vysokou nákladnost likvidace FP po vysloužení.



Obrázek 2.7.2 Průběh dodávaného činného výkonu FVE s Pn=1920 kW [7]

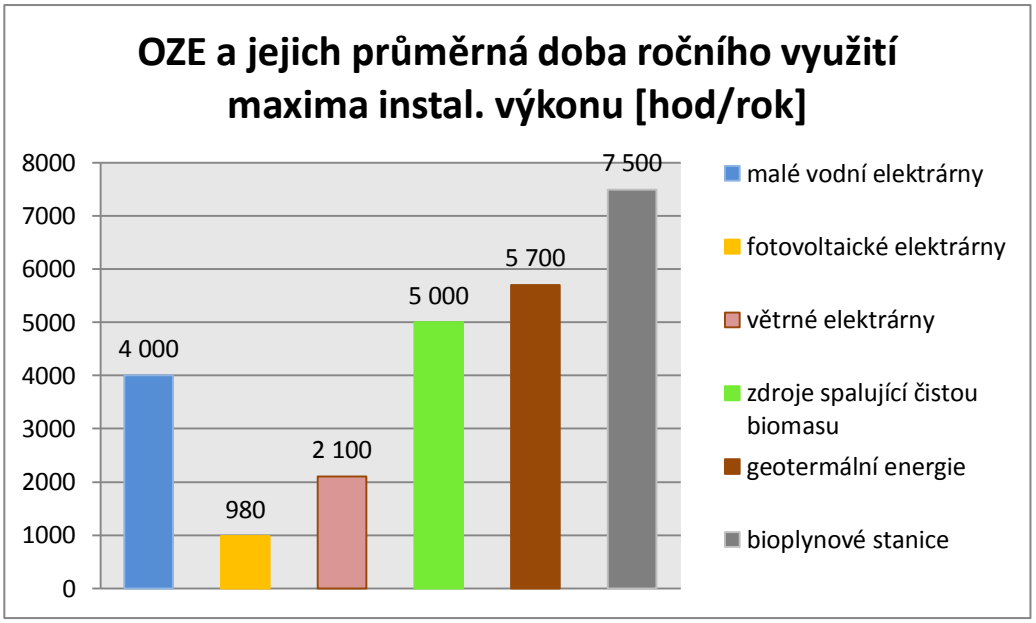
2.8 Porovnání s biomasou, větrnými elektrárnami

V porovnání těchto tří způsobů získávání energie při pohledu na spolehlivost a stálost dodávky elektrické energie jasně zvítězí elektrárna na biomasu. Pokud je v zásobě dost biopaliva elektrárna je schopna dodávat stanovený výkon bez ohledu na počasí. To je velký problém u větrných a solárních elektráren, když nefouká vítr, resp. nesvítí Slunce, výroba elektřiny se zastaví a poptávka se musí hradit náhradním zdrojem, kterým, jak již bylo zmíněno výše, jsou nejčastěji přečerpávací elektrárny. Na druhou stranu se ovšem spalováním biomasy vytvářejí spaliny, které u obou zbylých zdrojů energie nevznikají. Větrné a FVE jsou tedy ekologičtější.

Pro porovnání uvedených tří typů OZE následující tabulka (tab. 3) ukazuje vývoj množství vyrobené energie v ČR za jednotlivé roky. Mezi roky 2010 a 2011 zaznamenaly FV vysoký nárůst počtu elektráren, s tím související také zvýšení objemu výroby elektřiny, díky čemuž předstihly elektrárny na biomasu. Pro větrné elektrárny u nás nejsou dobré povětrnostní podmínky, jejich podíl vyrobené elektřiny meziročně stoupá velmi pomalu.

Rok	2007	2008	2009	2010	2011
FVE	1,75	12,94	88,81	615,70	2 182,02
Větrné elektrárny	125,10	244,66	288,07	335,49	397,00
Biomasa	993,36	1 231,21	1 436,85	1 511,91	1 682,56

Tabulka 3 Vývoj vyrobené energie z OZE v ČR [GWh] [11]



Graf 4 Průměrná doba ročního využití maxima Pi v podmínkách ČR [16]

Graf 4 ukazuje průměrnou dobu ročního využití maxima instalovaného výkonu. Jedná se o počet hodin z celkových 8760 v roce, v nichž by teoreticky zdroj dodával svůj maximální instalovaný výkon, čímž by ve výsledku vyrobil stejné množství energie jako při proměnlivém výkonu. Z porovnání vyplývá, že bioplynové elektrárny pro podmínky v ČR (pohledem na využití instalovaného výkonu) jsou nejefektivnější ze všech OZE. Druhá kapitola vychází z následujících literárních pramenů: 2, 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 29.

3 Posouzení provozu FVE

3.1 Životnost FP

Minimální životnost fotovoltaických panelů je udávána výrobci nejčastěji 30 let, systém ovšem musí být správně dimenzovaný a musí být použity pouze certifikované komponenty. Záruka pro jednotlivé komponenty bývá v rozmezí 5 a 10 let.

Důležitým parametrem pro životnost panelů je jejich schopnost dodávat stanovený výkon v určité době. Tyto výkonnostní garance jsou nastaveny následujícím způsobem, u 12 let starého panelu by neměla jeho účinnost klesnout pod hranici 90% nominálního

výkonu, po 25 letech činnosti se hranice snižuje na 80%. V tabulce 4 jsou uvedeny přesné hranice výkonnostní garance pro panely společnosti Suntech.

Roky provozu	Výkonnostní garance z nominálního výkonu [%]
po 5 letech	min 95%
po 12 letech	min 90%
po 18 letech	min 85%
po 25 letech	min 80%

Tabulka 4 Výkonnostní garance FP společnosti Suntech [25]

3.2 Výnosnost a návratnost investice

K získání nominálního výkonu 1 kWp je nutné vystavět solární systém o rozloze 8 - 16 m^2, což představuje investici okolo 50 000 Kč, cena je ovlivněna použitou technologií či typem instalace. Investiční náklady samozřejmě klesají se zvyšujícím se instalovaným výkonem. Návratnost investice se nejčastěji pohybuje v rozmezí od 8 do 10 let, záleží na velikosti a typu systému a také na způsobu financování.

3.2.1 Výkupní ceny

Výkupní ceny za elektřinu z OZE stanovuje v ČR Energetický regulační úřad (ERÚ) ve svých cenových rozhodnutích. Aktuální je rozhodnutí č.4/2012 ze dne 26. listopadu 2012, které stanovuje výši dotací pro podporované zdroje. Uvedené ceny jsou garantované po dobu 20 let (pro FV), možné je pouze navýšení průmyslovou inflací, to musí být ovšem odsouhlasené ERÚ. Částky za vykoupenou elektřinu vyplácí provozovatel distribuční, popř. přenosové soustavy (DS; PS) a jsou odstupňované dle dvou kritérií a to instalovaného výkonu (u FV) a data uvedení výrobny do provozu. Nynější výkupní ceny jsou zaznamenány v tabulce 5.

3.2.2 Zelený bonus

Zelený bonus inkasuje majitel OZE v případě, že z vyrobené elektřiny pokrývá vlastní spotřebu nebo prodává elektřinu obchodníkovi s elektřinou (ne provozovateli DS, PS) či oprávněnému zákazníkovi. Každá vyrobená kilowatthodina znamená vyplacení zeleného bonusu od provozovatele DS, popř. PS. V případě pokrývání vlastní spotřeby se dosahuje úspor v podobě odpadající nutnosti nákupu spotřebované energie. Garantovaná doba vyplácení bonusů (pro FV 20 let) i odstupňování výše částky je shodné jako u výkupní ceny. Zelené bonusy opět stanovené ERÚ jsou pro porovnání taktéž zobrazeny v tabulce 5.

Uvedení výrobny do provozu		Instalovaný výkon [kW]		Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)		
-	31.12.2005	-	-	7 273	6 343
1.1.2006	31.12.2007	-	-	15 260	14 330
1.1.2008	31.12.2008	-	-	14 882	13 952
1.1.2009	31.12.2009	0	30	13 964	13 414
1.1.2009	31.12.2009	30	-	13 862	12 932
1.1.2010	31.12.2010	0	30	13 005	12 455
1.1.2010	31.12.2010	30	-	12 903	11 973
1.1.2011	31.12.2011	0	30	7 803	7 253
1.1.2011	31.12.2011	30	100	6 141	5 211
1.1.2011	31.12.2011	100	-	5 723	4 793
1.1.2012	31.12.2012	0	30	6 284	5 734
1.1.2013	30.6.2013	0	5	3 410	2 860
1.1.2013	30.6.2013	5	30	2 830	2 280
1.7.2013	31.12.2013	0	5	2 990	2 440
1.7.2013	31.12.2013	5	30	2 430	1 880

Tabulka 5 Výkupní ceny a zelené bonusy stanovené ERÚ pro FV ze dne 26.11.2012 [10]

Z tabulky je patrné, jak ERÚ snižováním výkupních cen i zelených bonusů pro nově budované výrobny chce docílit snížení nárůstu FV, kvůli jejich velkému množství a s tím souvisejícím přínosem nestability do DS.

3.3 Zdanění

Při instalaci fotovoltaických systému na obytné budovy se zdanění řídí § 48 zákona o dani z přidané hodnoty, z čehož vyplývá, že montážní práce i všechny komponenty FV jsou zdaňovány nižší 14% sazbou DPH. Na inkasované zisky z prodeje vyrobené elektřiny, tak i na výnosy ze zelených bonusů je uplatňována daň z příjmu a to ihned ode dne platnosti licence.

3.4 Posouzení konkrétní FV

K posouzení FV jsem si vybral modelový příklad osazení fotovoltaického systému na střechu našeho rodinného domu 3+1 o zastavěné ploše 100 m^2 v Č. Budějovicích. Dle výpočtu v příloze 3 bude využitím FV za rok průměrně ušetřeno 1586,47 kWh, což představuje 3 215,9 Kč (N_{VS}).

Fotovoltaická elektrárna bude dodána společností SOLARENVI a.s., Třeboň, jde o produkt instalace na klíč. Systém má instalovaný výkon 4,18 kWp, tato hodnota je ovšem vrcholová krátkodobě dosažitelná, obvykle až 110% hodnoty dlouhodobé. Proto je počítáno s dlouhodobou hodnotou P_i=4,18/1,1=3,8 kW. Elektrárna se skládá z 22 německých monokrystalických panelů IBC MonoSol 190MS a střídače SMA. Pro první rok provozu je počítáno s garantovaným výkonem 100%, poté je brán v úvahu každoroční pokles o 1%. Tento pokles ovšem obsahuje relativně velkou rezervu, dle informací od dodávající společnosti výkon FP začíná zpravidla klesat až po 10. roce provozu, ještě po 20. roce provozu se výkon v praxi pohybuje kolem 93%. Plocha FV pole bude 28,6 m^2. Nákupní cena (N_N) solárního systému je 224 999 Kč bez DPH, cena zahrnuje montáž, připojení i licenci. Provozní náklady FVE (N_P) dělají ročně 1 500 Kč.

3.4.1 Výpočet návratnosti investice

Návratnost bude vyčíslena na období 25 let (příloha 4), k porovnání bude jak případ s využitím zeleného bonusu, tak i normální výkupní ceny. Uvažuji uvedení do provozu 1.12.2012, výkupní cena bude tedy 6 284 Kč/MWh a zelený bonus 5 734 Kč/MWh, obojí dáno rozhodnutím ERÚ (viz tab. 5). Pro zjednodušení není počítáno s inflací. Zde neuvažované splácení případné půjčky na prvotní investici pro vybudování FV a s ní související úroky, by se také promítly do výpočtu návratnosti.

Ekonomické posouzení 1. roku provozu FV:

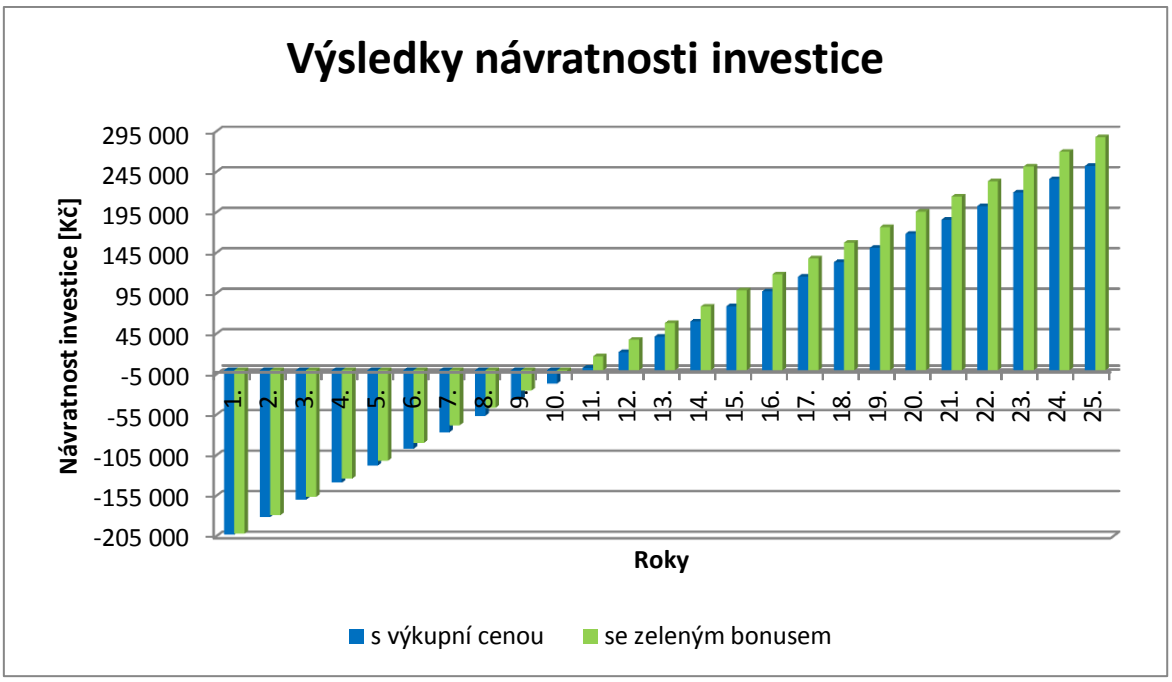
garantovaný výkon:	$P_G=100\%=1$
průměrná doba ročního využití maxima instalovaného výkonu:	$T=980\ h$
vyrobená el. energie:	$E=P_i*P_G*T=3,8*1*980=3\ 724\ kWh$
provozní náklady elektrárny:	$N_P=1\ 500\ Kč$
zisk z výkupní ceny:	$N_{VC}=(E/1000)*6284$
	$N_{VC}=(3724/1000)*6284=23\ 401,6\ Kč$
návratnost při prodeji elektřiny distributorovi:	$ROI_{VC}=N_{VC}-N_P-ROI_{VC(n-1)}$
- *zde* $ROI_{VC(n-1)}=N_N$	$ROI_{VC}=23401,6-1500-224999=$ ***-203 097,4 Kč***
zisk ze zeleného bonusu:	$N_{ZB}=(E/1000)*5734$
	$N_{ZB}=(3724/1000)*5734=21\ 353,4\ Kč$

návratnost při využití zeleného bonusu: $ROI_{ZB}=N_{ZB}+N_{VS}-N_P-ROI_{ZB(n-1)}$

-zde $ROI_{ZB(n-1)}=N_N$ $ROI_{ZB}=21353,4+3215,9-1500-224999$

$ROI_{ZB}=$***-201 929,7 Kč***

Dle výše zmíněných výsledků již z prvního roku provozu FV, lze usoudit, že varianta využití zeleného bonusu bude výhodnější. Už po jednom roce výroby elektřiny je fotovoltaická výrobna méně zadlužena, rozdíl je více než tisíc korun. Pro přehled jsou v následujícím grafu 5 vyobrazeny získané výsledky. Z grafu je patrné, že rozdíl mezi zeleným bonusem a výkupní cenou je s přibývajícími roky stále výraznější. Detailní výpočet návratnosti je zpracován v tabulce v příloze 4.

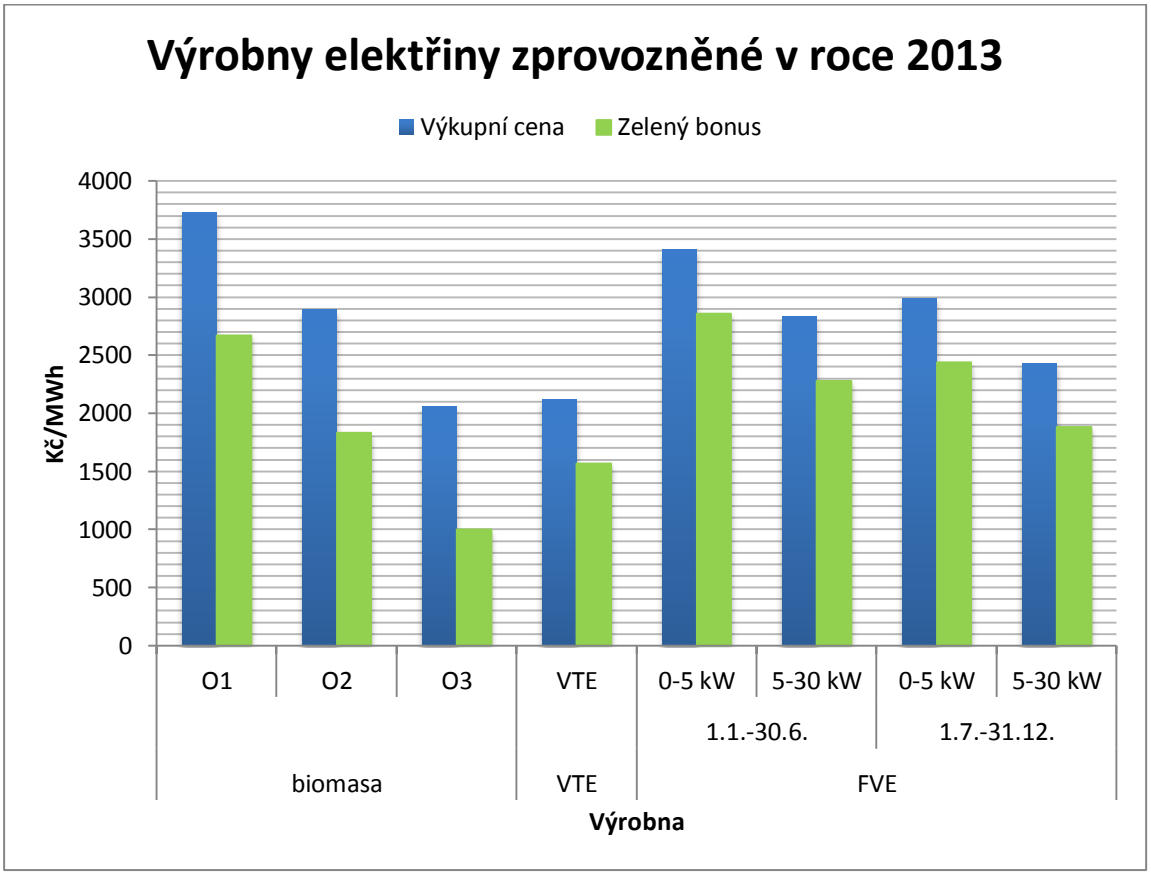


Graf 5 Výsledky návratnosti investice

Výpočty vyšla návratnost investice při prodeji elektřiny rovnou distributorovi, tedy prodeji za výkupní cenu, přes 10 let, v průběhu 11. roku se již dostaneme do „kladných čísel“. Při využití zeleného bonusu se návratnost pohybuje ve stejném časovém období, v 11. roce je ovšem zisk se zeleným bonusem téměř o 14 tisíc korun vyšší. Ve výsledku po 25 letech v provozu FV vydělá při inkasování zeleného bonusu o více než 35 tisíc korun více než při prodeji za výkupní cenu. Z tohoto důvodu bych spíše volil variantu pokrývání vlastní spotřeby domu s využitím zeleného bonusu. V neposlední řadě je také nutné počítat s faktem, že okolo 10. roku provozu může nastat nutnost výměny střídačů, na které bývá záruka 10 let. S tímto výdajem zde není počítáno.

3.5 Porovnání výkupní ceny s VTE, biomasou

K porovnání lze nahlédnout do rozhodnutí č. 4/2012 ERÚ, dnes aktuální z 26.11.2012. Všechny částky se odvíjí od data uvedení výrobny do provozu, dále jak již bylo zmíněno u FV dle instalovaného výkonu, upřesňujícím kritériem pro biomasu je její druh, větrné elektrárny žádné další dělení nemají. Graf 6 srovnává výkupní ceny a zelené bonusy FVE, VTE a elektráren na biomasu uvedených do provozu v roce 2013.



Graf 6 Dotace nově vystavěných a zprovozněných elektráren v roce 2013 [10]

Z grafu je patrné, že v současné době jsou výše dotací velmi podobné. Stáhnul se velký rozdíl solárních systémů, který měly zprovozněné výrobny kolem roku 2009, kdy dotace za 1 MWh přesahovaly i hranici 10 000Kč. K vypracování této kapitoly byly využity zdroje 10, 16, 24, 25, 26 a 27.

4 Kvalita napětí

Kvalita napětí je dána standardem podle vyhlášky 540/2005 Sb. novelizované v roce 2010. Ve které § 8 v druhé části (Standardy přenosu nebo distribuce elektřiny) udává standard kvality napětí: „Standardem kvality napětí je distribuce elektřiny s odpovídajícími parametry velikosti a odchylky napájecího napětí a frekvence, které jsou v souladu s Pravidly

provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribučních soustav (PPDS) nebo s parametry napětí a frekvence sjednanými ve smlouvě mezi zákazníkem a provozovatelem distribuční soustavy“.[1]

Při vyhodnocování kvality napětí se sledují následující parametry, jež jsou monitorovány distributorem, nikoliv ERÚ, ten žádné informace o těchto parametrech neshromažďuje. Zde uvedené hodnoty parametrů jsou vztaženy k rozvodům nízkého napětí (nn) a vycházejí z ČSN EN 50160.

- velikost napájecího napětí → základní parametr

- pro veřejnou síť byly normalizovány hodnoty U_n=230 V (fázové), resp. U_n=400 V (sdružené)

- odchylky napájecího napětí

- budou rozebrány v následující podkapitole

- kmitočet sítě

- jmenovitý kmitočet napájecí sítě 50 Hz, jedná se o kmitočet opakování základní vlny napájecího napětí, měří se za daný časový interval (10 s), v tomto intervalu musí být střední hodnota ve stanovených mezích, pro systémy se synchronním připojením k propojenému systému: 50 Hz ±1% během 99,5% roku; 50 Hz +4%/ -6% po 100% času

- poklesy napájecího napětí

- jedná se o náhlý pokles napětí do pásma 90÷5% Un, který následuje rychlé obnovení napětí, nejčastější příčinou je působení systému opětovného zapnutí (OZ)
- při poklesu U_n pod hranici 5% mluvíme o přerušení napájení, přerušení v délce do 3 minut je označováno jako krátkodobé, v opačném případě se jedná o dlouhodobé

- kolísání napájecího napětí = flikr

- změny zatížení u odběratelů či spínání v síti má za následek rychlé změny napájecího napětí, což představuje kolísání napětí
- kolísání se projevuje proměnlivým jasem svítidla, to může člověku přivodit zrakový vjem označovaný pojmem flikr
- pro hodnocení se využívá tzv. míra vjemu flikru (blikání) P, rozděluje se na krátkodobou a dlouhodobou

- harmonická napětí = vyšší harmonické

[1] Česká republika. Vyhláška o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice. *540/2005 Sb.* 2005.

- vyšší harmonické jsou celistvé násobky základní harmonické 50 Hz, tedy 100, 150 Hz,…
- dále se také mohou v napájecím napětí vyskytovat interharmonické, jejichž frekvence není celistvým násobkem základní harmonické, např. signál HDO (216,6 Hz)
- k souhrnnému posouzení obsahu vyšších harmonických se využívá celkový činitel zkreslení napětí THD

- nesymetrie napájecího napětí

- vzniká při nerovnosti úhlů mezi fázory jednotlivých fází → $\Theta_{AB} \neq \Theta_{BC} \neq \Theta_{CA}$
- popisuje se pomocí matice Fortescue, což představuje rozklad na složky (sousledná, zpětná a nulová)
- norma ČSN EN 50160 stanovuje činitel nesymetrie u_2, pro nějž je přípustná hodnota v DS u dlouhodobé nesymetrie $u_2 \leq 2\%$.

Všechny tyto parametry musí být sledovány, měření jsou třech typů:

- trvalá – měří se na předávacích místech mezi PS a DS, na sekundární straně transformátoru 110/vn nebo u důležitých odběratelů
- kampaňovitá – měří se na všech úrovních napětí (nn, vn, vvn)
- na základě stížnosti – měření musí probíhat minimálně jeden týden.

4.1 Odchylky napájecího napětí

Vyjadřují poklesy či přepětí vůči jmenovitému napájecímu napětí, které jsou povolené a nemají žádné důsledky na poškození spotřebičů připojených do sítě. Normou ČSN EN 50160 jsou stanoveny tyto meze na ±10% od jmenovitého napětí a platí při normálních provozních podmínkách vyjma doby přerušení dodávky. U velmi vysokého napětí 400 kV je toto rozmezí sníženo na ±5% od jmenovitého napětí.

K odstranění nebo alespoň snížení odchylek je více způsobů, jedním je vhodněji navržená regulace napětí. Dále je možné zahustit síť, vystavit mohutnou síť, čímž se sníží impedance celé sítě.

Ideální by byl stav, kdybychom v každém místě DS měli jmenovité napětí, z toho vyplývá, že odchylky napětí nejsou žádoucím jevem, ovšem zbavit se jich nelze. Odchylky napětí mohou způsobovat krácení životnosti spotřebičů, například pro zářivku znamená napětí U_n+10% zkrácení životnosti o 25%. Pro představu jsou v následujících tabulkách vyobrazeny důsledky odchylek napětí u žárovky a tepelného spotřebiče.

Odchylka	-10%	0	10%
Životnost [%]	434	100	26
Světelný tok [%]	68	100	140
Příkon [%]	85	100	116

Tabulka 6 Vliv odchylky napětí na žárovku [30]

Odchylka	-15%	-10%	0
Doba ohřevu vody [%]	138	123	100
Výkon při vaření [%]	72,5	81	100

Tabulka 7 Vliv odchylky napětí na tepelný spotřebič [30]

4.2 Hodnocení odchylek napájecího napětí

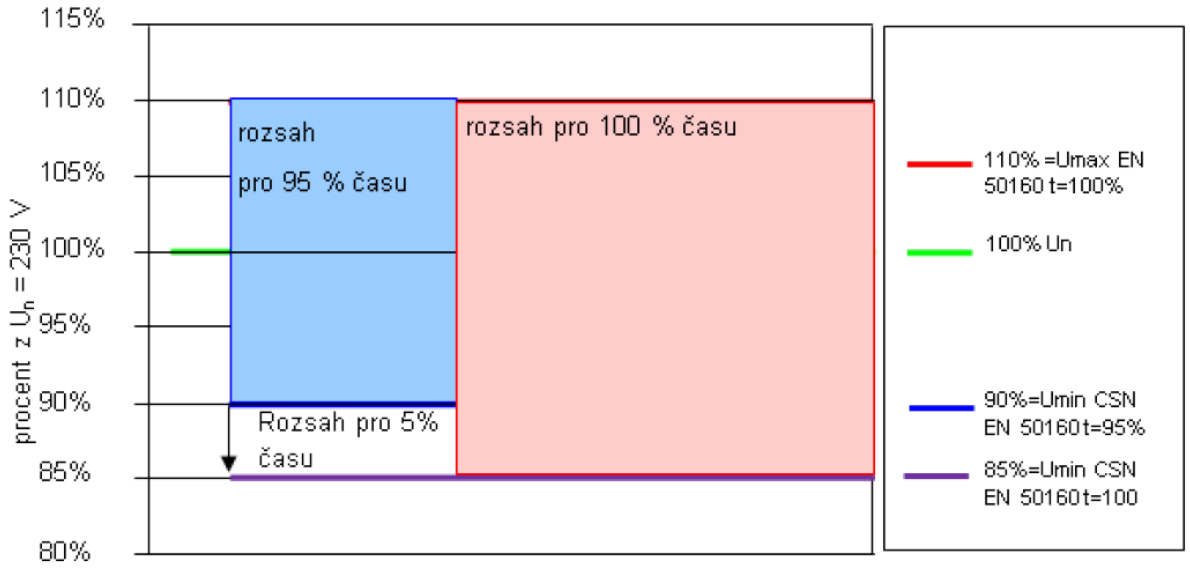
Při podání stížnosti zákazníkem na kvalitu napětí musí být tento podnět prošetřen, k hodnocení překročení dovolených tolerancí napájecího napětí je dán postup v souladu s §8 Vyhlášky 540/2005 Sb. Dle tohoto postupu se velikost a průběh napětí vyhodnocuje přímo v předávacím místě u zákazníka. Na napěťových hladinách nízkého a vysokého napětí jsou k měření upřednostňovány měřicí přístroje třídy S, které disponují pro měření napětí přesností do 1%. Na hladině 110 kV se využívá přístrojů třídy A (přesnost do 0,1%). K vyhodnocení zhoršené kvality napětí je výhodné, pokud přístroje zaznamenávají mimo napětí také proudy a výkony.

4.2.1 Délka měření

Aby bylo měření průkazné, je jeho minimální délka stanovena na jeden celý týden. V průběhu měření se s pevným krokem 10 minut zaznamenávají průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí. Desetiminutové odstupy představují za týden 1008 měřících intervalů, začátek záznamu hodnot je doporučen v 00:00.

4.2.2 Zhodnocení měření

Vyhodnocení měření na síti nn se provádí podle obr. 4.2.2. Z něhož vyplývá, že 95% měření musí být v pásmu ±10% ze jmenovitého napětí a všechna měření musí splňovat rozsah +10% / -15% ze jmenovitého napětí. Tedy 95% hodnot musí mít velikost 207÷253 V a 100% hodnot mezi 195,5 V a 253 V.



Obrázek 4.2.2 Vyhodnocování odchylek napájecího napětí na sítích nn [22]

Pro sítě vn a 110 kV je rozsah ±10% ze jmenovité hodnoty nutný u 99% měřících intervalů a pro 100% měření je nutné pásmo ±15% ze jmenovité hodnoty.

K určení shody s ČSN EN 50160 a PPDS slouží stanovený vzorec:

$$\frac{N1+N_{přízn}}{N} \leq 5\% \quad \text{- pro sítě nn} \qquad (4.2.2a)$$

$$\frac{N1+N_{přízn}}{N} \leq 1\% \quad \text{- pro sítě vn a 110 kV} \qquad (4.2.2b)$$

kde N – počet 10-minutových vzorků při době pozorování (1 týden → N=1008)

$N_{přízn}$ – počet 10-minutových intervalů označených příznakem → intervaly, v nichž je pokles či zvýšení napětí mimo meze

N1 – počet platných 10-minutových intervalů neoznačených příznakem

Velikost a odchylky napájecího napětí jsou v povolených mezích dle PPDS Přílohy 3 pouze v přídě, je-li uvedený vzorec dodržen.

4.3 Kumulace zdrojů v části DS

Aby byla při kumulaci zdrojů v části distribuční soustavy (např. připojování fotovoltaické výrobny) dodržena již zmiňovaná kvalita napětí musí být výrobna připojována v souladu s podmínkami provozování distribuční soustavy přílohou 4. Tato příloha stanovuje pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí nízkého nebo vysokého napětí provozovatele distribuční soustavy. Pravidla jsou určena jak pro provozovatele DS, tak stejně i pro výrobce

elektřiny a provozovatele lokálních DS s vnořenými zdroji. Využívají se jako podklad pro projektování, případně jako rada při rozhodování.

Fotovoltaická výrobna produkuje stejnosměrný proud, proto musí být mezi FVE a sítí střídač. Jedná se tedy o výrobny se střídačem. Například pro ně říkají PPDS příloha 4 v bodě 10.5, že střídače mohou být spínány jen za předpokladu beznapěťového stavu na střídavé straně. Další omezení představuje pro fotočlánkové zařízení napojené do sítě nn maximální připojitelný výkon, který je stanoven pro jednofázové připojení v přípojném bodě na 4,6 kVA/fázi. Zprovozňované elektrárny je možno připojit buď přímo k distribuční soustavě, nebo v odběrném místě, popř. v předávacím místě jiné výrobny. Výjimkou pro výrobny s OZE je možnost, že mohou být osvobozeny od nutnosti primární regulace. Dále také musí být dle PPDS dodrženy podmínky zmíněné v následujících podkapitolách.

4.3.1 Zvýšení napětí

Provoz posuzované výrobny způsobí zvýšení napětí, které nesmí v nejnepříznivějším případě (přípojném bodě) překročit 2% (pro výrobny elektřiny připojené na síť vn a 110 kV). Pro přípojné místo do sítě nízkého napětí je tato hranice posunuta na 3%. Zvýšení napětí je posuzováno oproti napětí bez připojené uvažované výrobny. Aby tedy posuzovaná výrobna vyhověla PPDS příloha 4 musí být splněna jedna z rovnic:

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2\% \qquad (4.3.1a)$$

$$\Delta u_{nn} \leq 3\% \qquad (4.3.1b)$$

Taktéž ovšem musí být i současně dodrženy limity napětí v předávacím místě zdroje dle normy ČSN EN 50160.

4.3.2 Změna napětí při spínání

Připojování či naopak odpojování jednotlivých výrobních zařízení vyvolává ve společném napájecím bodě změny napětí. Aby nebyly tyto změny posouzeny jako nepřípustné zpětné vlivy, musí být dodrženy následující podmínky:

$$\Delta u_{\max nn} \leq 3\% \qquad (4.3.2a)$$

$$\Delta u_{\max vn} \leq 2\% \qquad (4.3.2b)$$

Uvedené hodnoty jsou v platnosti za předpokladu, že ke spínání nedochází častěji než 1x za 1,5 minuty. Při málo častém spínání (například jednou denně) je možné po dohodě s provozovatelem distribuční soustavy navýšit povolené změny napětí, což ovšem musí dovolit poměry v uvažované síti. Pro připojovanou elektrárnu na síť 110 kV jsou hodnoty

maximální změny napětí 0,5% (normální provoz – spínání jedné výrobní jednotky), 2% (normální provoz – spínání celého zařízení) a 5% pro poruchový provoz (spínání celého zařízení). I zde, obdobně jako v předchozím bodě, musí být při spínání dodržena norma ČSN EN 50 160. Čtvrtá kapitola je zpracována za použití literatury 5, 21, 22, 23, 30.

5 Praktické posouzení provozu FVE

Tento bod diplomové práce je zaměřen na dodržení dovolených odchylek napětí v souladu s normou ČSN EN 50160. Je zde provedena analýza konkrétních měření na hladině nízkého napětí, dle předchozího bodu musí být naměřené hodnoty pro 95% měření v pásmu 207÷253 V. Respektive velikost napětí pro všechna měření musí být mezi hodnotami 195,5 až 253 V.

5.1 Data

Data k vyhodnocení jsem získal ze společnosti E.ON od svého konzultanta diplomové práce pana Ing. Martina Kašpírka, Ph.D. Obdržel jsem soubory v programu MS Excel s 23 sítěmi nn v oblasti působnosti distributora E.ON, u kterých jsou připojeny fotovoltaické elektrárny. Jedná se o sítě v oblasti jižních Čech a jižní Moravy, konkrétní místa měření mi nebyla sdělena, sítě jsou označeny pracovním názvem pomocí čísel (XX_DTS; XX_FVE).

Měření probíhala v daných sítích vždy v distribuční transformační stanici a také přímo na svorkách připojené FVE. Z důvodu zjištění, zda má připojená solární elektrárna shodný vliv na velikost (odchylky) napětí v DTS i na svorkách elektrárny, byly zvoleny dvě měřící místa. Minimální počet měřících intervalů (1 008), aby byla získaná data validní, byl vždy dodržen. Některá měření probíhala i více jak 10 dnů. Na všech sítích se měřilo v roce 2011 a 2012 je tak možné porovnat údaje ve dvou po sobě jdoucích letech. Výsledkem tedy také bude, zda provedená opatření v roce 2011 u nevyhovujících sítí měla za následek v roce 2012 již hodnoty napětí v dovolených odchylkách.

5.2 Vyhodnocení

Vyhodnocení jsem provedl za pomoci programu MS Excel, ke zjištění maximální a minimální hodnoty napětí jsem využil funkce MAX a MIN. V každém měřícím intervalu byly změřeny efektivní hodnoty napětí na každé ze tří fází. Maximální hodnotu z měření jsem určil jako nejvyšší hodnotu ze všech. Obdobně jsem stanovil také minimální hodnotu. Toto získané maximum jsem hodnotil, zda nepřesahuje 253 V, respektive minimum, zda není pod hranicí 207 V.

Při hledání minima u sítě 38 v DTS jsem zjistil hodnotu 0 V. Přerušení napájení bylo dohledáno, došlo k němu 3.5.2011 v 7:00. Jednalo se o ztrátu napětí na všech třech fázích. Hodnotu 0 V jsem tedy neuvažoval, protože se jednalo o přerušení dodávky elektrické energie, nešlo o odchylku napájecího napětí.

Ze získaných výsledků jsem sestavil grafy zobrazující maxima napětí a rozdíl maximálních a minimálních napětí v jednotlivých sítích.

5.3 Výsledky

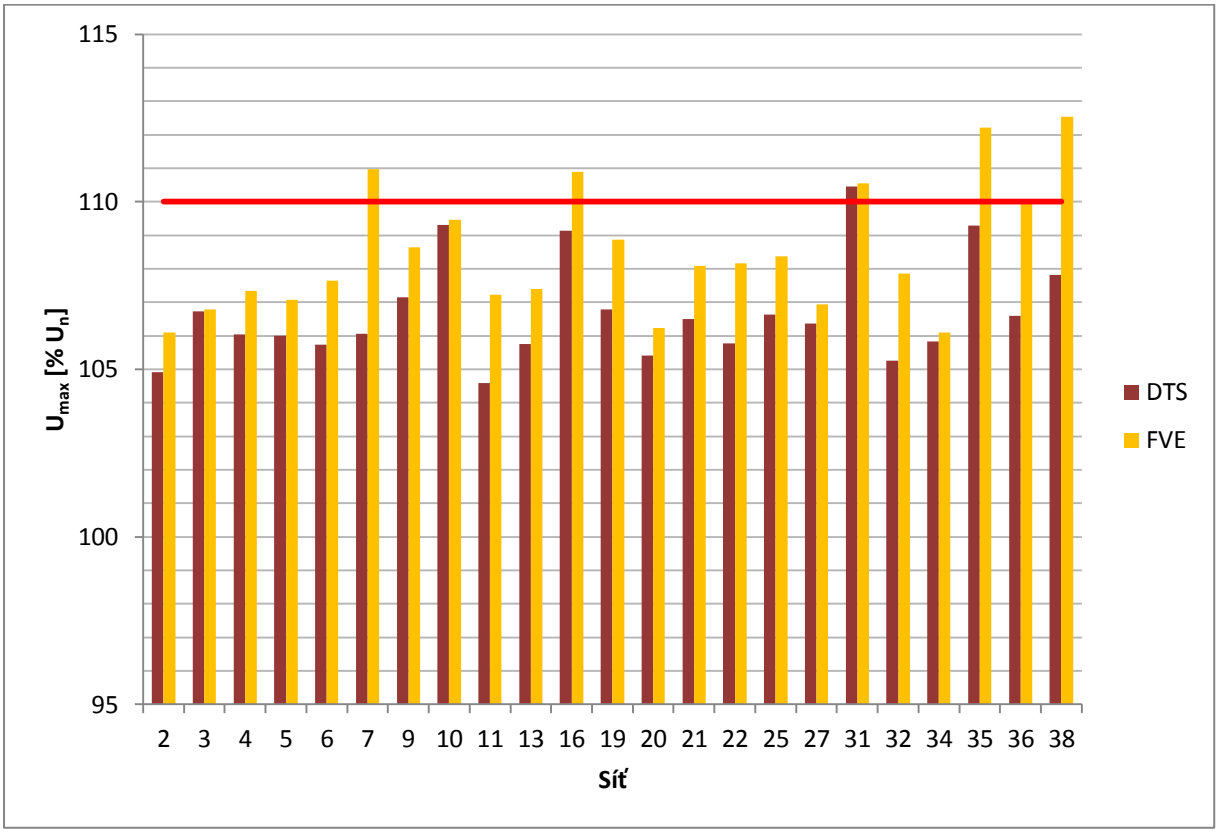
Výsledky jsem zpracoval v programu MS Excel do tabulek a grafů. Následující tabulka prezentuje výsledky z měření v roce 2011.

Síť	max U		min U		Období měření
	DTS	FVE NN	DTS	FVE NN	
2	241,29	244,05	228,95	224,63	15.-22.7.
3	245,47	245,62	237,63	236,81	29.4.-11.5.
4	243,89	246,88	231,03	225,87	1.-11.4. (FVE 1.-8.4.)
5	243,79	246,26	208,54	226,89	4.-12.5.
6	243,20	247,60	233,76	223,41	4.-12.5. (FVE 26.4.-4.5.)
7	243,96	255,22	236,31	218,80	1.-8.7.
9	246,45	249,87	237,37	218,19	11.-23.5.
10	251,42	251,75	238,68	229,38	18.-26.5.
11	240,55	246,62	233,38	216,00	26.5.-6.6.
13	243,25	247,00	234,56	229,64	9.-17.5.
16	251,03	255,06	238,68	233,31	30.5.-7.6.
19	245,63	250,41	235,96	230,72	15.-23.6.
20	242,45	244,32	232,90	229,73	20.-27.5.
21	244,96	248,60	235,92	226,04	10.-19.5.
22	243,29	248,78	234,89	219,72	5.-13.4.
25	245,25	249,26	237,70	235,28	22.-29.4.
27	244,64	245,96	237,02	227,75	20.-31.5.
31	254,07	254,25	243,56	238,95	22.7.-4.8.
32	242,09	248,09	233,12	221,57	11.-19.7.
34	243,43	244,05	228,80	223,65	14.-22.7.
35	251,38	258,11	244,10	237,03	2.-10.6.
36	245,17	253,08	235,55	229,63	12.-20.5.
38	248,00	258,85	227,00	222,79	29.4.-11.5.

Tabulka 8 Maxima a minima napětí při měření v roce 2011

Z tabulky je zřejmé, že v 6 červeně vyznačených případech měření na svorkách FVE, došlo k přepětí. Nejvyšší hodnota napětí byla zaznamenána u 38 sítě, a to 258,85 V, což je

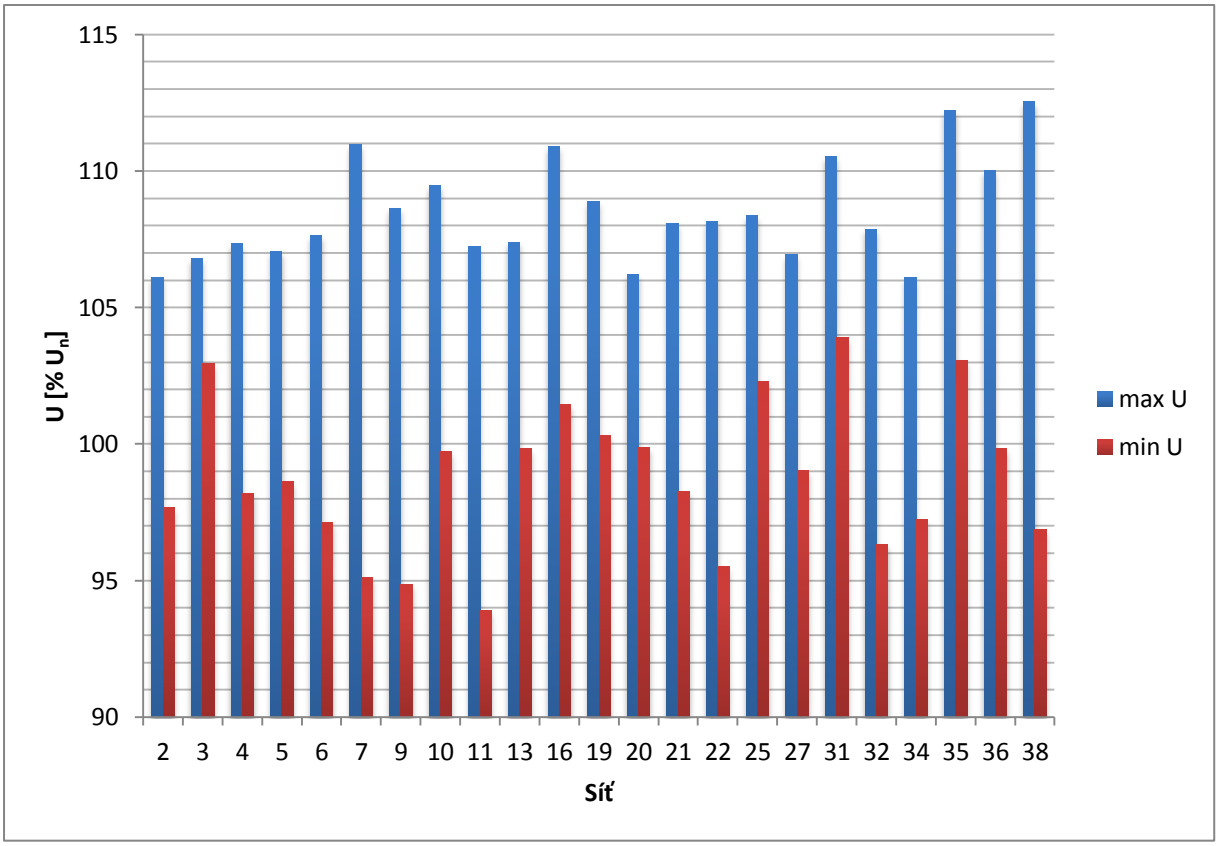
překročení povolené meze téměř o 6 V. Graf 7 zobrazuje maxima napětí v procentních hodnotách, v tomto případě se tedy přepětí nachází nad hranicí 110% U_n (vyznačená červená hraniční křivka).



Graf 7 Maxima napětí při měření v roce 2011

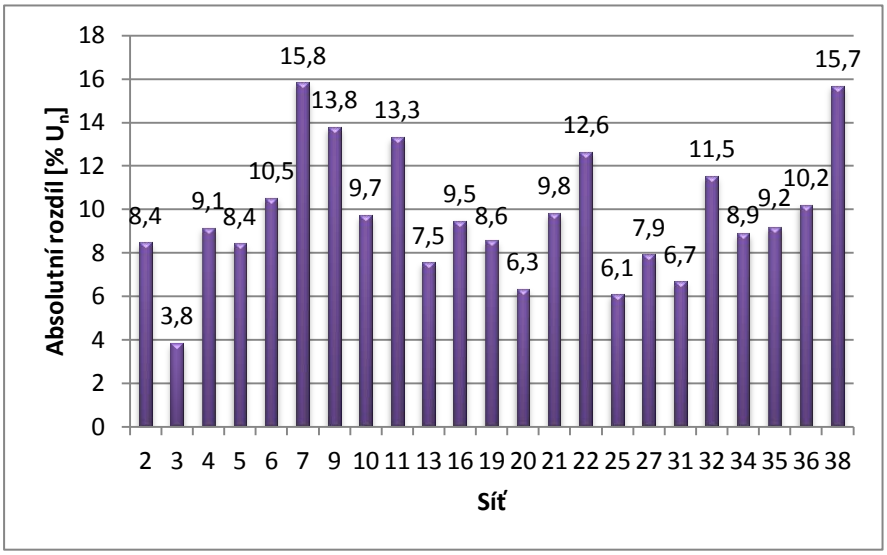
Sítě č. 7, 16, 35, 36 a 38 v roce 2011 nesplnily povolené odchylky napájecího napětí dané normou ČSN EN 50160 (přepětí). U těchto sítí je napětí v DTS v povolené toleranci, je zřejmé, že přepětí je prokazatelně následkem provozu fotovoltaické elektrárny. 21,7% měřených sítí (5 z 23) nevyhovuje normě. V síti 31 bylo změřeno přepětí i v DTS, z čehož vyplývá, že na distribučním transformátoru (DT) je chybně nastavena regulační odbočka. Zde provoz FVE není důvodem zjištěného přepětí.

Další nežádoucí jev při připojení FVE do DS představují změny napětí. Tento jev je zachycen v grafu 8, vyobrazuje maximální a minimální naměřené hodnoty napětí na svorkách fotovoltaických výroben při měření během roku 2011.



Graf 8 Maximální a minimální napětí na FVE (měření 2011)

Pro lepší představu je ještě v grafu 9 vynesen absolutní rozdíl, procentní rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou napětí. Je patrné, že napětí na FVE se během měření mění až o téměř 16% U_n. Největší absolutní rozdíl byl zaznamenán u sítí 7 a 38, konkrétně 15,8%, resp. 15,7%.



Graf 9 Absolutní rozdíl napětí na FVE (měření 2011)

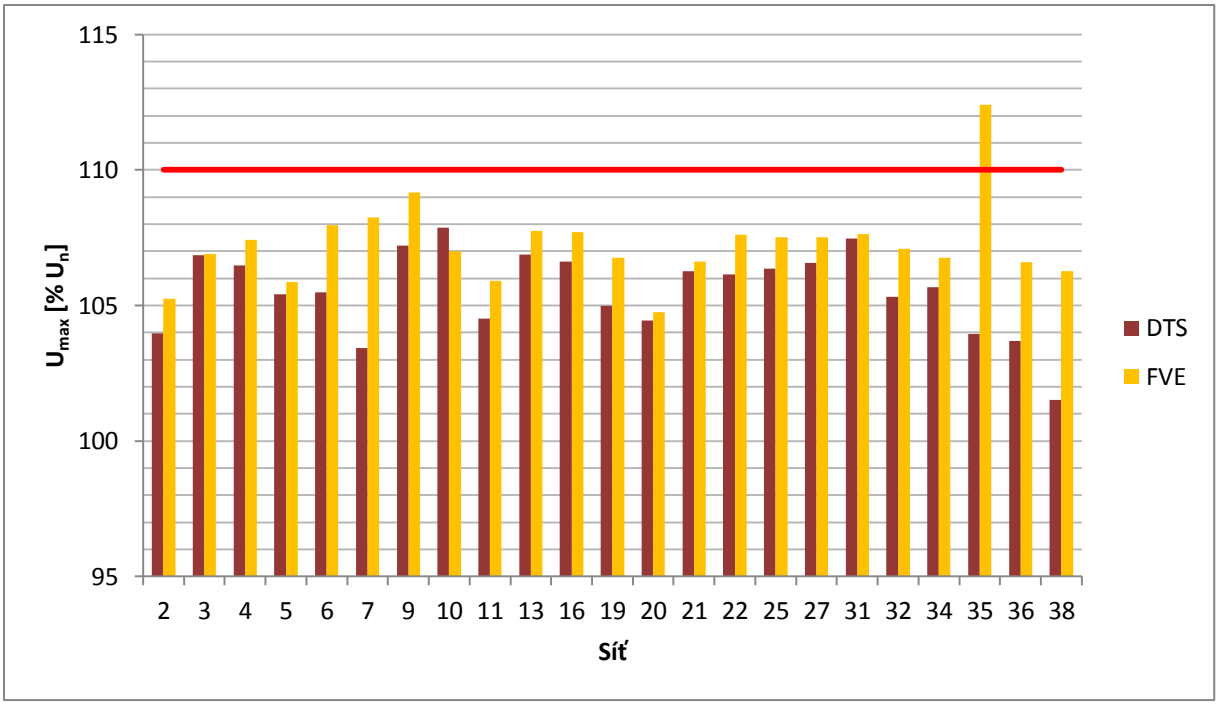
Po měření v roce 2011 a následném zjištění nevyhovujících sítí byla provedena na těchto sítích nápravná opatření, aby již byly dodrženy odchylky napětí dle ČSN EN 50160. Na DT byly přenastavením regulačních odboček sníženy hodnoty napětí na DTS, tím byl částečně eliminován vliv FVE. Napětí na svorkách fotovoltaických výroben pokleslo pod

povolenou hranici maximálního napětí. Tabulka 9 je sestavena z hodnot získaných v měřícím období v roce 2012.

Síť	max U		min U		Období měření
	DTS	FVE NN	DTS	FVE NN	
2	239,13	242,08	228,85	222,57	5.-13.4.
3	245,79	245,89	239,88	236,25	13.-22.3.
4	244,88	247,08	232,25	224,76	21.-29.3.
5	242,43	243,51	233,70	226,06	7.-19.3.
6	242,60	248,33	234,98	222,07	7.-19.3.
7	237,91	249,00	229,07	213,05	4.-12.4.
9	246,56	251,12	238,59	212,37	3.-14.5.
10	248,08	246,11	238,32	230,27	27.3.-4.4.
11	240,38	243,60	232,51	210,67	4.-16.4.
13	245,81	247,81	231,70	225,79	18.-27.4.
16	245,21	247,72	232,06	225,97	15.-23.5.
19	241,46	245,57	231,52	224,90	2.-13.3.
20	240,22	240,95	230,48	226,86	5.-13.3.
21	244,43	245,21	229,96	219,08	28.3.-5.4.
22	244,14	247,52	236,00	209,25	5.-13.3.
25	244,64	247,29	237,62	235,17	22.3.-3.4.
27	245,13	247,30	239,75	231,08	3.-11.4.
31	247,16	247,54	233,69	223,91	13.-23.4.
32	242,23	246,32	232,05	215,48	23.3.-3.4.
34	243,06	245,55	228,08	222,89	4.-17.4.
35	239,10	258,55	230,84	229,82	6.-16.5.
36	238,48	245,17	230,67	213,98	28.6.-10.7.
38	233,48	244,41	226,20	225,95	15.-28.6.

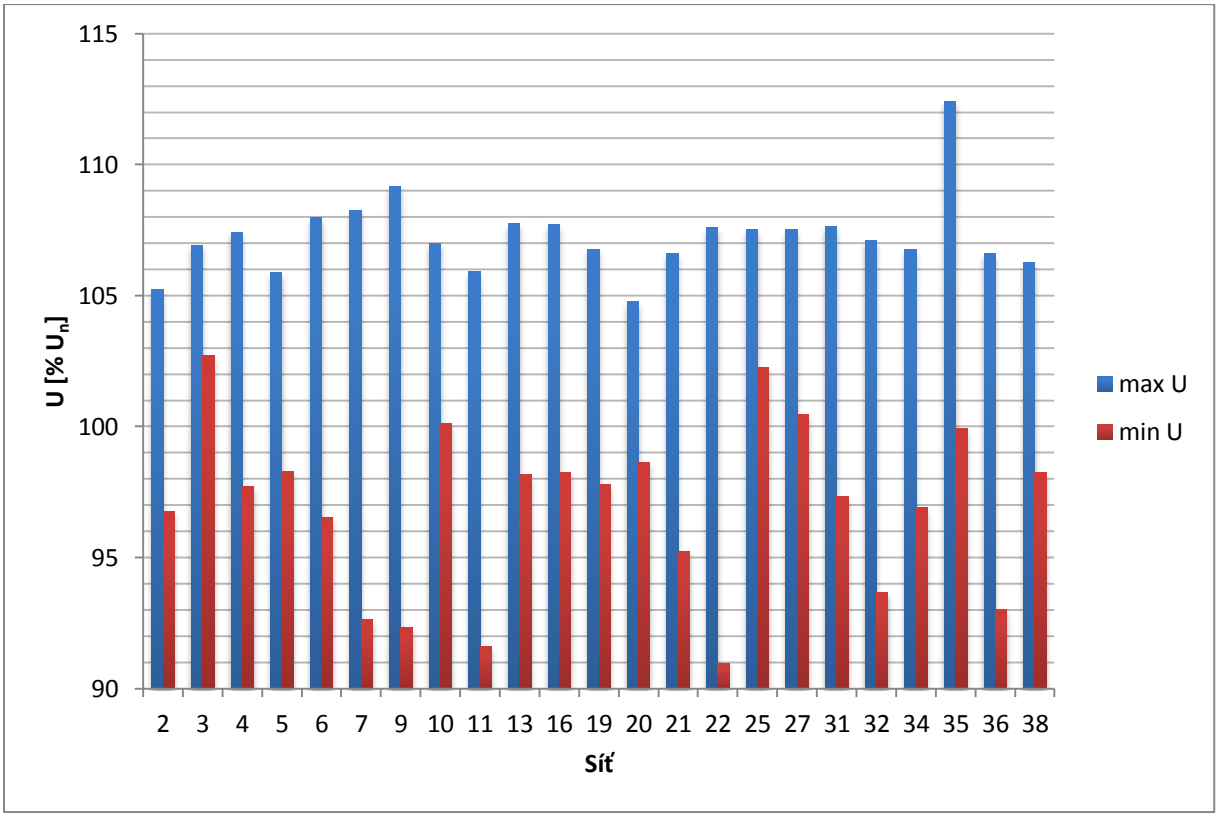
Tabulka 9 Maxima a minima napětí při měření v roce 2012

Z tabulky je zřejmé, že u téměř všech nevyhovujících sítí měla provedená opatření za následek snížení maxima napětí pod hranici 253 V. Všechny vyhodnocované sítě již vyhovují normě až na jednu výjimku. Tu představuje síť číslo 35, kde maximum napětí dosahuje 258,55 V, což znamená překročení o více jak 5 V. Na DT v síti 31 byla v roce 2012 oproti roku 2011 přenastavena odbočka, díky tomu zde už nedochází k přepětí. Graf 10 shrnuje výsledná změřená maxima, jedna nevyhovující síť s přepětím 112,4% U_n představuje 4,3% ze všech sítí. Všechna zjištěná minima efektivních hodnot napětí z obou sledovaných let byla v povolené toleranci dle ČSN EN 50160.



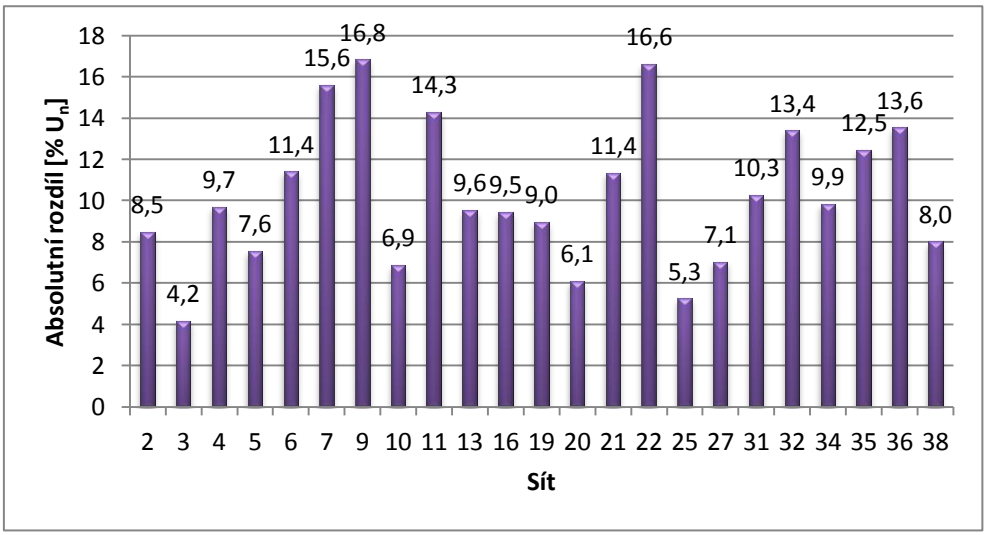
Graf 10 Maxima napětí při měření v roce 2012

Další graf 11 dokládá změny napětí na svorkách FVE během měření v roce 2012.

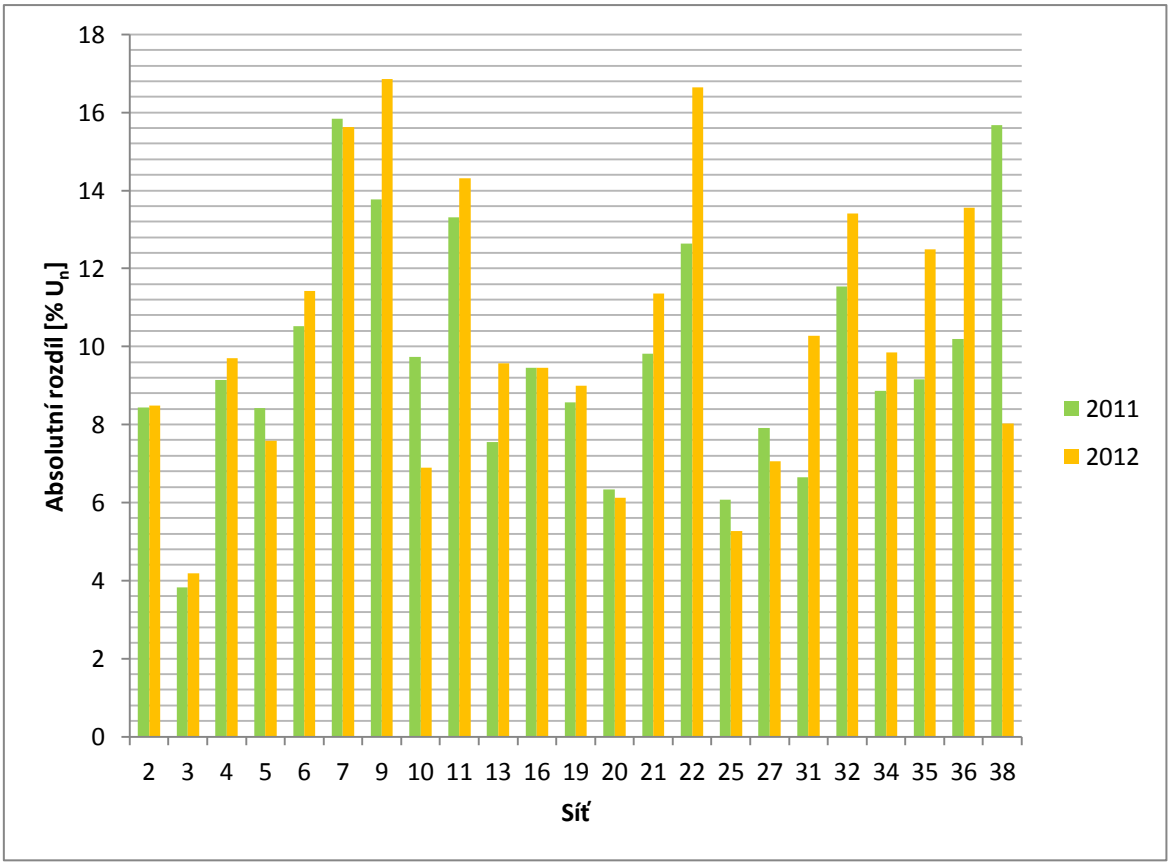


Graf 11 Maximální a minimální napětí na FVE (měření 2012)

Nevyšší absolutní rozdíl, ještě vyšší než v roce 2011, byl zjištěn v roce 2012 (graf 12) u sítí 9 a 22 téměř 17% U_n. Konkrétně 16,8 a 16,6% U_n.



Graf 12 Absolutní rozdíl napětí na FVE (měření 2012)

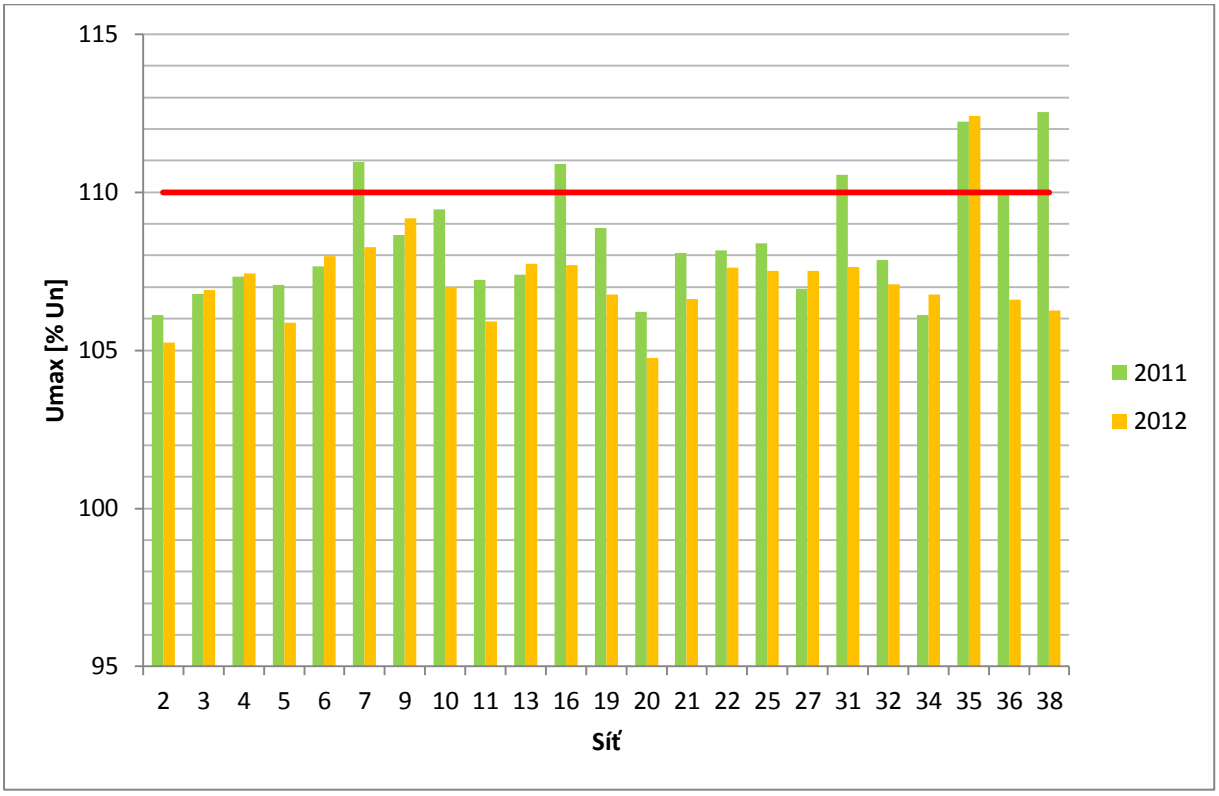


Graf 13 Porovnání absolutního rozdílu napětí na FVE v letech 2011 a 2012

Graf 13 zobrazuje porovnání absolutního rozdílu napětí na FVE z obou let měření. U některých sítí došlo ke zvýšení tohoto rozdílu. Vysvětluji si to tím, že nebyly při měření v uvažovaných sítích stejné poměry. Velikosti okamžitých odběrů nebyly totožné a také

fotovoltaická elektrárna vyráběla vždy jiné množství energie, dle aktuálních klimatických podmínek.

Měření mělo za následek zjištění přepěťových stavů, způsobených provozem fotovoltaických elektráren, a jejich následné odstranění. Ukázal se negativní přínos FVE pro distribuční síť, na kterou jsou připojeny. V grafu 14 jsou shrnuty výsledky nápravných opatření.



Graf 14 Maxima napětí na svorkách FVE v letech 2011 a 2012

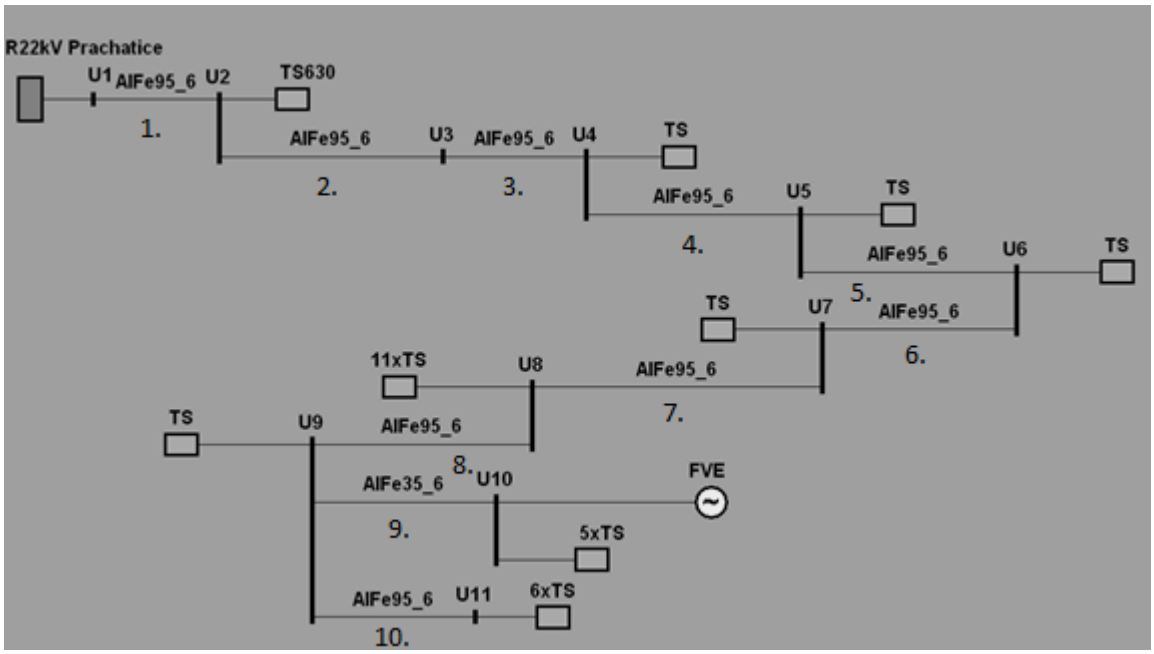
Přetrvávající přepětí u sítě č. 35 vysvětluje následující výpočet:

- v místě připojení FVE nn je přibližně 1f impedance $Z \doteq 1\ \Omega$
- např. na 1f FVE 5 kW: $I=P/U=5000/230=21{,}74\ A$
- zvýšení napětí na FVE: $\Delta U=Z \cdot I=1 \cdot 21{,}74=\mathbf{\underline{21{,}74\ V}}$
- změna odbočky na DT (snížení napětí): $2{,}5\% \cdot U_n=\mathbf{\underline{5{,}75\ V}}$

Z výsledků je patrné, že snížení napětí na DT o 5,75 V je nedostačující vůči zvýšení napětí na FVE (21,74 V). Značné zvýšení napětí provozem fotovoltaické výrobny je způsobeno velkou impedancí. Z tohoto závěru vyplývá fakt, že přenastavení regulační odbočky v DTS není dokonalé nápravné opatření, není účinné v sítích s dlouhými vývody nn zakončených připojenou fotovoltaickou výrobnou. Zde musí být přepětí řešeno jinak, například změnou konfigurace sítě.

6 Posouzení připojitelnosti konkrétní FVE

Pro posouzení připojitelnosti jsem dostal k dispozici konkrétní fotovoltaickou elektrárnu připojenou na hladinu vysokého napětí, síť je vyvedena z rozvodny R22kV v Prachaticích v Jihočeském kraji. Schéma sítě (obr. 6) a velikosti všech parametrů mi poskytla společnost E.ON.



Obrázek 6 Schéma sítě [6]

V uvažované síti se nachází 11 uzlů, které jsou propojeny kabely AlFe95. Pouze mezi uzly 9 a 10 je kabel AlFe35. Fotovoltaická výrobna je připojena do uzlu 10, její výkon je 600 kW. Úseky mezi jednotlivými uzly jsem si pracovně označil čísly 1-10, těmito indexy jsem poté značil počítané veličiny. Odběry jsou zde označeny TS, jejich velikosti jsou shrnuty v následující tabulce.

Odběr	Velikost odběru [kW]
TS	100
TS630	100
5xTS	500
11xTS	1 100
6xTS	600

Tabulka 10 Velikosti odběrů v síti [6]

Pro výpočty jsem potřeboval znát parametry (R a X) jednotlivých kabelů mezi uzly, jejich hodnoty lze jednoduše zjistit podle vtahů: $R=R_K \cdot l$; $X=X_K \cdot l$, kde l značí délku kabelu. Vypočtené hodnoty jsou v tabulce 11.

Úsek	Kabel	R_K [Ω/km]	X_K [Ω/km]	l [km]	R [Ω]	X [Ω]
1.	AlFe95	0,301	0,374	0,195	0,059	0,073
2.	AlFe95	0,301	0,374	4,867	1,465	1,820
3.	AlFe95	0,301	0,374	0,306	0,092	0,114
4.	AlFe95	0,301	0,374	1,003	0,302	0,375
5.	AlFe95	0,301	0,374	1,477	0,445	0,552
6.	AlFe95	0,301	0,374	0,574	0,173	0,215
7.	AlFe95	0,301	0,374	3,065	0,923	1,146
8.	AlFe95	0,301	0,374	0,639	0,192	0,239
9.	AlFe35	0,778	0,389	0,773	0,601	0,301
10.	AlFe95	0,301	0,374	0,644	0,194	0,241

Tabulka 11 Vypočtené parametry kabelů [6]

Dále je nutné uvažovat nadřazenou síť, jejíž maximální zkratový výkon je 182,142 MVA. Musím tedy brát v úvahu její odpor a reaktanci (R_S a X_S). Tyto hodnoty jsem vypočítal dle následujících rovnic.

$$X_s = c \cdot \frac{U_n^2}{S''_{Kmin}} \qquad (6a)$$

$$R_S = X_S \cdot 0{,}1 \qquad (6b)$$

Zadaný mám pouze maximální zkratový výkon, jako minimální zkratový výkon uvažuji maximální hodnotu podělenou 1,1 → S''_{Kmin}=165,584 MVA.

$$X_s = 1 \cdot \frac{22^2}{165{,}584} = 2{,}923\ \Omega$$

$$R_s = 2{,}923 \cdot 0{,}1 = 0{,}292\ \Omega$$

Pro posouzení zpětných vlivů FV jsme po domluvě s konzultantem DP zvolili dva sledované parametry, u nichž se dá předpokládat nevyšší negativní přínos do distribuční sítě. Vyhodnocoval jsem tedy harmonické proudy a zvýšení napětí.

6.1 Zhodnocení zvýšení napětí

Abych mohl vyhodnotit, zda připojená FVE způsobuje navýšení napětí, využil jsem metodu výpočtu úbytku napětí v přípojném bodě U10. Tím jsem získal k porovnání dvě hodnoty, stav bez a s připojenou fotovoltaickou výrobnou. Výsledný úbytek napětí v uzlu U10 je součet všech úbytků napětí na jednotlivých kabelech a na nadřazené síti. Tento výpočet jsem opakoval pro 3 různé účiníky (cos φ=1; 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní).

Výpočty jsou velmi dlouhé, proto následně uvedu zkráceně postup výpočtu nejprve pro cos φ=1, bez připojené FVE. Kompletně vypočtené hodnoty jsou v příloze 5.

- proud tekoucí úsekem 1: $I_1 = \frac{\sum P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot cos\varphi} = \frac{2800}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 1} = 73{,}481\ A$

kde ∑ P označuje součet všech připojených odběrů

- úbytek napětí v úseku 1: $\Delta U_1 = R_1 \cdot I_1 \cdot cos\varphi + X_1 \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}059 \cdot 73{,}481 \cdot 1 + 0{,}073 \cdot 73{,}481 \cdot 0 = 4{,}313\ V$

- obdobně jsem spočítal úbytky napětí na všech úsecích

- úbytek napětí na nadřazené síti: $\Delta U_s = R_S \cdot I_1 \cdot cos\varphi + X_S \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}292 \cdot 73{,}481 \cdot 1 + 2{,}923 \cdot 73{,}481 \cdot 0 = 21{,}478\ V$

- celkový úbytek napětí v uzlu U10: $\Delta U_C = \sum_{i=1}^{9} \Delta U_i + \Delta U_s = 266{,}403\ V$

- vyjádřeno procentně: $\Delta u_{C\,\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_C}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 266{,}403}{22000} \cdot 100 = \mathbf{2{,}097}\%$

Následně jsem vypočítal úbytek napětí v uzlu U10 s připojenou 600 kW FVE.

- proud tekoucí úsekem 1: $I_1 = \frac{\sum P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot cos\varphi} = \frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 1} = 57{,}735\ A$

- úbytek napětí v úseku 1: $\Delta U_1 = R_1 \cdot I_1 \cdot cos\varphi + X_1 \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}059 \cdot 57{,}735 \cdot 1 + 0{,}073 \cdot 57{,}735 \cdot 0 = 3{,}389\ V$

- úbytek napětí na nadřazené síti: $\Delta U_s = R_S \cdot I_1 \cdot cos\varphi + X_S \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}292 \cdot 57{,}735 \cdot 1 + 2{,}923 \cdot 57{,}735 \cdot 0 = 16{,}876\ V$

- celkový úbytek napětí v uzlu U10: $\Delta U_C = \sum_{i=1}^{9} \Delta U_i + \Delta U_s = 198{,}016\ V$

- vyjádřeno procentně: $\Delta u_{C\,\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_C}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 198{,}172}{22000} \cdot 100 = \mathbf{1{,}559}\%$

Nyní lze spočítat výsledné navýšení napětí při cos φ=1:

$navýšení\ napětí = \Delta u_{C\,\%\ bez\ FVE} - \Delta u_{C\,\%\ s\ FVE} = 2{,}097 - 1{,}559 = \mathbf{0{,}538}\%$

S tímto výsledkem (0,538% U_n) mohu říci, že výrobna s uvažovaným účiníkem cos φ=1 splňuje podmínku o navýšení napětí dle bodu 4.3.1 této diplomové práce, který udává maximální navýšení napětí pro FVE připojenou na vn 2%. Tato hodnota je v souladu s PPDS přílohou 4.

Pro cos φ=0,95 induktivní je výpočet totožný, výpočet je znázorněn v příloze 6. Zde bych zmínil pouze výsledek, navýšení napětí vyšlo o 0,850% U_n. Hodnota se o něco zvýšila, i tak je ale ovšem dodržena podmínka z PPDS s velkou reservou.

Při cos φ=0,95 kapacitní nastává změna v tom, že u jednotlivých výpočtů úbytků napětí je jalová složka odečítána, místo přičítána, jak tomu bylo v předchozích výpočtech. Následně je opět naznačen postup výpočtu nejdříve bez připojené FVE, detailní výpočet je proveden v příloze 7.

- proud tekoucí úsekem 1: $I_1 = \frac{\sum P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot cos\varphi} = \frac{2800}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 0{,}95} = 77{,}348\ A$

- úbytek napětí v úseku 1: $\Delta U_1 = R_1 \cdot I_1 \cdot cos\varphi - X_1 \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}059 \cdot 77{,}348 \cdot 0{,}95 - 0{,}073 \cdot 77{,}348 \cdot 0{,}31 = 2{,}552\ V$

- úbytek napětí na nadřazené síti: $\Delta U_s = R_S \cdot I_1 \cdot cos\varphi - X_S \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}292 \cdot 77{,}348 \cdot 0{,}95 - 2{,}923 \cdot 77{,}348 \cdot 0{,}31 = -49{,}118\ V$

- celkový úbytek napětí v uzlu U10: $\Delta U_C = \sum_{i=1}^{9} \Delta U_i + \Delta U_s = 97{,}706\ V$

- vyjádřeno procentně: $\Delta u_{C\,\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_C}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 97{,}706}{22000} \cdot 100 = \mathbf{0{,}769}\%$

S připojenou 600 kW FVE.

- proud tekoucí úsekem 1: $I_1 = \frac{\sum P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot cos\varphi} = \frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 0{,}95} = 60{,}774\ A$

- úbytek napětí v úseku 1: $\Delta U_1 = R_1 \cdot I_1 \cdot cos\varphi - X_1 \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}059 \cdot 60{,}774 \cdot 0{,}95 - 0{,}073 \cdot 60{,}774 \cdot 0{,}31 = 2{,}005\ V$

- úbytek napětí na nadřazené síti: $\Delta U_s = R_S \cdot I_1 \cdot cos\varphi - X_S \cdot I_1 \cdot sin\varphi = 0{,}292 \cdot 60{,}774 \cdot 0{,}95 - 2{,}923 \cdot 60{,}774 \cdot 0{,}31 = -38{,}593\ V$

- celkový úbytek napětí v uzlu U10: $\Delta U_C = \sum_{i=1}^{9} \Delta U_i + \Delta U_s = 68{,}956\ V$

- vyjádřeno procentně: $\Delta u_{C\,\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_C}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 68{,}956}{22000} \cdot 100 = \mathbf{0{,}543}\%$

$navýšení\ napětí = \Delta u_{C\,\%\ bez\ FVE} - \Delta u_{C\,\%\ s\ FVE} = 0{,}769 - 0{,}543 = \mathbf{0{,}226}\%$

V následující tabulce 12 jsou přehledně uvedeny všechny získané výsledky, z nichž je patrné, že ani v jednom případě nedošlo k překročení povolené hranice 2% navýšení napětí připojenou fotovoltaickou elektrárnou. Pro účiník cos φ=0,95 induktivního charakteru byl zjištěn nejnepříznivější stav, zde bylo vypočtené zvýšení napětí nejvyšší, konkrétně 0,850% U_n.

cos φ	$\Delta u_{C\%\ bez\ FVE}$ [%]	$\Delta u_{C\%\ s\ FVE}$ [%]	Navýšení napětí [% Un]
1	2,097	1,559	**0,538**
0,95 induk.	3,426	2,575	**0,850**
0,95 kap.	0,769	0,543	**0,226**

Tabulka 12 Výsledky výpočtů zvýšení napětí vlivem připojené FVE

6.2 Zhodnocení harmonických proudů

Přípustné harmonické proudy lze určit dle pravidel provozování distribučních soustav přílohy 4, zde je dán vztah:

$$I_{v\,p\check{r}} = i_{v\,p\check{r}} \cdot S_{Kv} \qquad (6.2a)$$

kde $I_{v\,př}$ přípustný proud v daném řádu harmonické

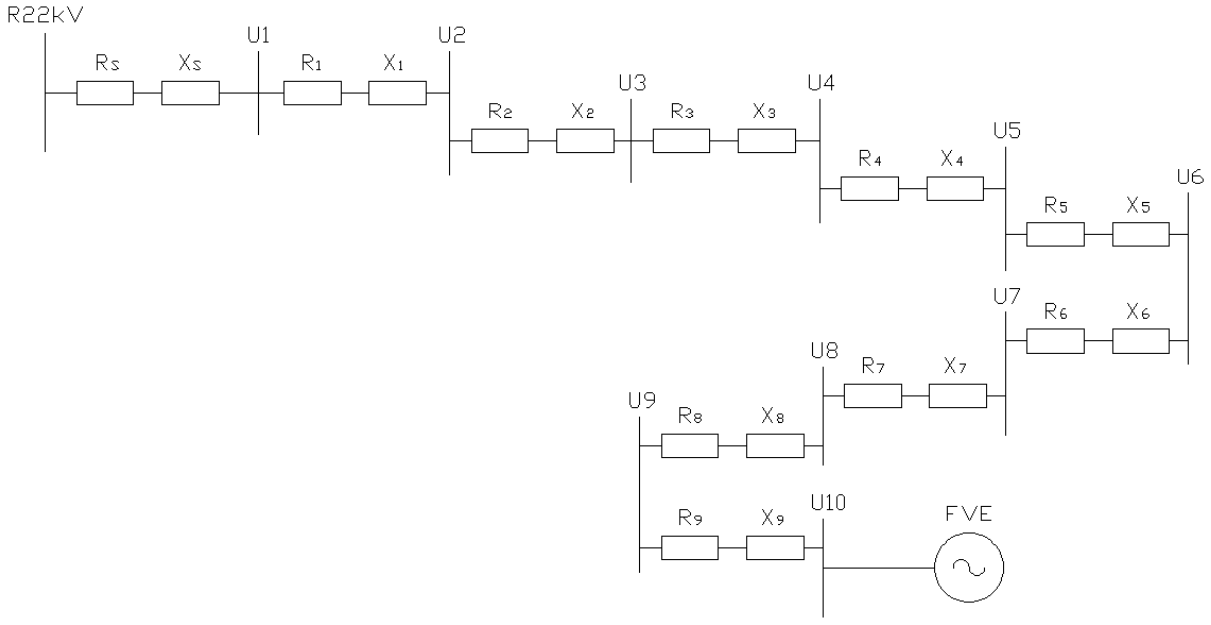
$i_{v\,př}$ vztažný přípustný proud v daném řádu harmonické (viz tab. 13)

S_{Kv} zkratový výkon v přípojném bodě FVE

Řád harmonické μ,ν	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\mu,vpř}$ [A/MVA]		
	síť 10 kV	síť 22 kV	síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/ν	0,03/ν	0,017/ν
μ < 40	0,06/μ	0,03/μ	0,017/μ
μ > 40	0,16/μ	0,09/μ	0,046/μ

Tabulka 13 Vztažné přípustné proudy harmonických [23]

Pro výpočet uvedeného vzorce potřebuji znát zkratový výkon v uzlu U10, v němž je připojena fotovoltaická elektrárna. Abych mohl spočítat S_{Kv} sestavil jsem si náhradní schéma sítě (obr. 6.2). Dále jsem podle tohoto schématu stanovil celkovou impedanci k uzlu U10, z níž jsem vypočítal zkratový výkon.



Obrázek 6.2 Náhradní schéma sítě

$$R_C = R_S + \sum_{i=1}^{9} R_i \quad (6.2b)$$

$R_C = 4{,}544\ \Omega$

$$X_C = X_S + \sum_{i=1}^{9} X_i \quad (6.2c)$$

$X_C = 7{,}759\ \Omega$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad (6.2d)$$

$Z_C = \sqrt{4{,}544^2 + 7{,}759^2} = 8{,}991\ \Omega$

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_C} \quad (6.2e)$$

$$I_K'' = \frac{1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 8{,}991} = 1{,}413\ kA$$

$$S_{Kv} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_K'' \quad (6.2f)$$

$S_{Kv} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 1{,}413 = \mathbf{53{,}830\ MVA}$

FVE produkuje stejnosměrné napětí, proto musí před předávkou do distribuční sítě proběhnout nastřídání pomocí střídače. U naší konkrétní fotovoltaické výrobny toto zabezpečují 2 střídače Solar Max 300C, které pracují soufázově. Pro posouzení harmonických proudů střídače, potřebujeme znát emise daných harmonických. Tyto hodnoty, které udává výrobce v technické dokumentaci, jsou uvedeny v příloze 8. Jsou vztaženy na hladinu 0,4 kV, musím tedy provést přepočet na hladinu 22 kV. Výpočet jsem provedl pro významné liché harmonické, pro něž znám dle PPDS vztažné přípustné proudy, a také pro sudé harmonické do 24 řádu. Následující výpočet ukazuje postup posouzení harmonického proudu pro 5. harmonickou.

- přípustný proud 5. harmonické: $I_{5p\check{r}} = i_{5p\check{r}} \cdot S_{Kv} = 0{,}058 \cdot 53{,}830 = \mathbf{3{,}122\ A}$
- emise jednoho střídače pro 5. harmonickou (příloha 8): $I_h = 5{,}816$ A (pro 0,4 kV)
- 2 střídače pracující soufázově → $I_{h(0,4kV)} = 2 \cdot 5{,}816 = 11{,}632$ A
- pro přepočet emisí na hladinu 22 kV uvažuji transformaci přes starší typ transformátoru s převodem 0,4/22 kV, vycházím tedy z rovnice pro převod:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (6.2g)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \rightarrow I_2 = \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2} \quad (6.2h)$$

$$I_{h(22kV)} = \frac{U_{1(0,4kV)} \cdot I_{h(0,4kV)}}{U_{2(22kV)}} = \frac{0{,}4 \cdot 11{,}632}{22} = \mathbf{0{,}211\ A}$$

- podmínka splnění PPDS:

$$I_{h(22kV)} < I_{5p\check{r}} \quad (6.2i)$$

0,211 < 3,122 → podmínka je splněna, proud 5. harmonické střídače vyhověl PPDS.

Řád harmonické v	$i_{v\ př}$ [A/MVA]	$I_{v\ př}$ [A]	$I_{h(0,4kV)}$ [A]	$2 \cdot I_{h(0,4kV)}$ [A]	$I_{h(22kV)}$ [A]	$I_{h(22kV)} < I_{v\ př}$
2	0,015	0,807	7,584	15,168	0,276	OK
4	0,008	0,404	2,714	5,428	0,099	OK
5	0,058	3,122	5,816	11,632	0,211	OK
6	0,005	0,269	0,496	0,992	0,018	OK
7	0,041	2,207	2,084	4,168	0,076	OK
8	0,004	0,202	0,772	1,544	0,028	OK
10	0,003	0,161	0,564	1,128	0,021	OK
11	0,026	1,400	0,510	1,020	0,019	OK
12	0,003	0,135	0,648	1,296	0,024	OK
13	0,019	1,023	0,573	1,146	0,021	OK
14	0,002	0,115	0,551	1,102	0,020	OK
16	0,002	0,101	0,509	1,018	0,019	OK
17	0,011	0,592	0,651	1,302	0,024	OK
18	0,002	0,090	0,551	1,102	0,020	OK
19	0,009	0,484	0,487	0,974	0,018	OK
20	0,002	0,081	0,607	1,214	0,022	OK
22	0,001	0,073	0,611	1,222	0,022	OK
23	0,006	0,323	0,557	1,114	0,020	OK
24	0,001	0,067	0,463	0,926	0,017	OK
25	0,005	0,269	0,514	1,028	0,019	OK

Tabulka 14 Výsledky posouzení harmonických proudů

Z tabulky 14, která shrnuje výpočty příslušných harmonických proudů, vyplývá, že ve všech uvedených řádech harmonických byla splněna podmínka maximálního přípustného proudu. Z čehož stanovuji závěr, že použitý střídač vyhovuje PPDS příloze 4. Posuzování harmonických napětí a jejich kontrola s ČSN EN 50160 je již zbytečná, protože PPDS řeší podmínky pro jednotlivé výrobny, zatímco norma ČSN stanovuje podmínky při kumulaci více zdrojů v části DS. Omezení daná PPDS jsou mnohem přísnější, než ty které udává norma, vyhověla-li tedy výrobna Podmínkám provozování distribuční sítě, zcela jistě splňuje taktéž normu ČSN EN 50160.

Zkoumaná fotovoltaická elektrárna dle mých výsledků produkuje zpětné vlivy na DS v rámci dovolených mezí, může tedy být připojena do uvažované sítě.

7 Závěr

Tato diplomová práce uceleně seznamuje čtenáře s problematikou obnovitelných zdrojů, konkrétně zaměřenou na fotovoltaické výrobny elektřiny. Tento zdroj energie prodělal v minulých 5 letech v České republice nebývalý rozmach. Nejhojnější byly roky 2008 - 2011, kdy byly počty nově připojených FVE do distribuční sítě nejvyšší, na čemž měla zcela určitě svůj podíl tehdejší výše výkupních cen a zelených bonusů.

Jedním z bodů zadání byl výpočet návratnosti investice. Nejprve jsem čtenáře seznámil s pojmy výkupní cena a zelený bonus, poté provedl samotný výpočet. Výsledky ukazují, že návratnost se v obou případech, jak prodeji za výkupní cenu, tak i za zelený bonus, pohybuje v horizontu 10 let. Ovšem varianta zeleného bonusu vychází finančně výhodněji.

Dále se praktická část zabývá vyhodnocením měření, kontrolujícím odchylky napětí v přípojných místech fotovoltaických elektráren. Měření byla provedena ve dvou po sobě jdoucích letech, mezi nimiž došlo v nevyhovujících sítích k nápravným opatřením. Po analýze výsledků měření z roku 2011 jsem zjistil, že 6 z 23 posuzovaných sítí nevyhovuje normě ČSN EN 50160 ohledně dodržení odchylek napětí. U jedné sítě nastalo přepětí jak na svorkách FVE, tak i v distribuční transformační stanici. Zde nebylo přepětí následkem připojené FVE, nýbrž na distribučním transformátoru byla chybně nastavená regulační odbočka. U zbylých 5 nevyhovujících sítí bylo sníženo napětí pomocí přenastavení regulační odbočky na DT. Vlivem tohoto opatření v následujícím roce 2012 již všechny sítě splnily podmínky dané normou, až na jednu jedinou síť, u které přepětí přetrvalo. Po konzultaci s panem Ing. Martinem Kašpírekem, Ph.D. jsem se dozvěděl, že se jedná o dlouhý nn vývod, na jehož konci je připojena fotovoltaická výrobna. Snížení napětí v DTS o jednu regulační odbočku tedy nestačí, elektrárna způsobuje mnohem větší navýšení napětí. Při dalším snižování napětí na DT by ovšem napětí mohlo poklesnout pod spodní hranici dovolené odchylky, což je nepřípustné. Možné řešení tohoto problému bych viděl ve změně konfigurace sítě.

Posledním bodem zadání bylo posoudit připojitelnost konkrétní FVE do distribuční sítě s ohledem na produkované zpětné vlivy. Zde jsem zkoumal dva nejočekávanější negativní vlivy. Navýšení napětí v důsledku připojené fotovoltaické výrobny a harmonické proudy, zda jsou dodrženy jejich přípustné hodnoty. Od společnosti E.ON. jsem obdržel data o konkrétním zdroji, jednalo se o 600 kW elektrárnu, napojenou na DS 22 kV nedaleko Prachatic v Jihočeském kraji. Navýšení napětí jsem počítal pro 3 různé účiníky. Nejnižší navýšení (0,226% U_n) vyšlo pro cos φ=0,95 kapacitní, ovšem i zbylé dva účiníky vyhověly PPDS,

které udávají jako maximální navýšení 2% U_n. Střídač, kterým výrobna disponuje, také plní stanovené podmínky. Proudy všech uvažovaných harmonických jsou nižší než přípustné pro dané řády harmonických. Závěr tohoto posouzení tedy je takový, že výrobna může být připojena do distribuční sítě.

Můj osobní názor na solární energii je takový, že v ní vidím jednu z možností získávání elektřiny v budoucnosti. Jisté je, že dnes využívané zdroje jednou vyčerpáme. Stále ale nejsem rozhodnut v tom, jaký z obnovitelných zdrojů energie bych preferoval, proto bych solární energii nechal dál vyvíjet. Poté v horizontu 10 až 15 let dle výsledků rozvoje, či bude možné energii ze Slunce přeměnit ve více elektrické energie než dnes, bych se rozhodl, jaký zdroj vybrat jako primární pro další generace.

Použitá literatura

[1] ČEZ [online]. *Energie z obnovitelných zdrojů*. [cit. 15.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje.html>

[2] ČEZ [online]. *Fotovoltaická elektrárna Ralsko*. [cit. 16.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce/provozovane-fotovoltaicke-elektrarny/fotovoltaicka-elektrarna-ralsko.html>

[3] ČEZ [online]. *Voda*. [cit. 15.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda.html>

[4] ČEZ [online]. *Využití sluneční energie*. [cit. 15.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce/informace-o-slunecni-energetice.html>

[5] ČSN EN 50160. *Česká technická norma: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. ed. 3. 2011, 32 s.

[6] E.ON. *FVE výrobna*. 2013. Informace od konzultanta DP

[7] E.ON. *FVE-vykony*. 2012. Informace od konzultanta DP

[8] E.ON. *Vývoj OZE-Dan 2013*. 2013. Informace od konzultanta DP

[9] EPIADEV [online]. *Global Market Outlook 2016*. [cit. 17.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://epiadev.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf>

[10] ERÚ [online]. *Energetický regulační věštník*. [cit. 6.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV8_2012.pdf>

[11] ERÚ [online]. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2011*. [cit. 16.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2011/Rocni_zprava_ES_CR_FINAL.pdf>

[12] ERÚ [online]. *Vývoj počtu solárních elektráren*. [cit. 16.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://eru.cz/user_data/files/licence/info_o_drzitelich/OZE/12_01_SLE.pdf>

[13] ERÚ [online]. *Základní informace o významných energetických subjektech*. [cit. 7.4.2013]. Dostupné z WWW: <http://eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2010/pdf/subjekty.pdf>

[14] FOTOVOLTAIKA [online]. *Fotovoltaika v roce 2012. Jaká bude výše dotací?*. [cit. 16.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.fotovoltaika-panely.com/fotovoltaika-2012/>

[15] KAPOUN, M. *Zhodnocení fotovoltaických systémů na území Španělska*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce: Bělík M.

[16] KREJCAR, R. [online]. *Podpora výroby elektřiny z biomasy a bioplynu v roce 2012*. [cit. 4.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/Biomasa2011/R.Krejcar.pdf>

[17] LIBRA, M. [online]. *Solární energie*. [cit. 3.1.2013]. Dostupné z WWW: <http://tf.czu.cz/~libra/mereni1.gif>

[18] LIBRA, M.; POULEK, V. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2

[19] MURTINGER, K.; BERANOVSKÝ, J.; TOMEŠ, M. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 1. vyd. Brno: ERA, 2007, 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7

[20] PEŠKOVÁ, A. *Fotovoltaická energetika v ČR*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce: Soukup R.

[21] PNE 33 3430-7. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. 2. vyd. 2005, 45 s.

[22] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav; příloha 3: kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení.* 2011, 43 s.

[23] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav; příloha 4: pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2011, 71 s.

[24] SOLARENVI [online]. *Fotovoltaická elektrárna 4,18 kWp na klíč*. [cit. 7.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.solarenvi.cz/slunecni-elektrarny/produkty/instalace-na-klic/fotovoltaicka-elektrarna-4-18-kwp-na-klic/>

[25] SOLARENVI [online]. *Fotovoltaický panel Suntech STP190S-24/Ad+*. [cit. 6.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.solarenvi.cz/slunecni-elektrarny/produkty/fotovoltaicke-panely/fotovoltaicky-panel-suntech-stp190s-24-ad/>

[26] SOLARENVI [online]. *IBC MonoSol 190 MS, 195 MS*. [cit. 7.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.solarenvi.cz/assets/Downloads/datasheets/fv_IBC-MonoSol-195-Wp.pdf>

[27] SOLARENVI [online]. *Systémy připojení na síť*. [cit. 6.12.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.solarenvi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/fve-pripojene-na-sit/>

[28] SOLARTEC [online]. *Princip fotovoltaiky*. [cit. 27.10.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.solartec.cz/male-instalace-do-30kwp/informace-o-fotovoltaice/princip-fotovoltaiky>

[29] ŠPIKA, J. *Fotovoltaika v podmínkách České republiky*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce: Šafařík M.

[30] TESAŘOVÁ, M. *Přednášky z předmětu průmyslová energetika*. Plzeň, 2012

[31] TRAXLE [online]. *Solar trackers and concentrators*. [cit. 15.11.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.pvpumps.com/tra-siv.jpg>

Přílohy

Příloha 1: **S**luneční energie dopadající na vodorovnou plochu v ČR a ve Španělsku

Příloha 2: Průběhy dodávaných činných výkonů FVE (Pn=1920 kW) za oblačného a slunečného dne

Příloha 3: Výpočet průměrné roční úspory elektrické energie pro rodinný dům při pokrytí části spotřeby FV

Příloha 4: Výpočet návratnosti investice do solárního systému na střechu rodinného domu

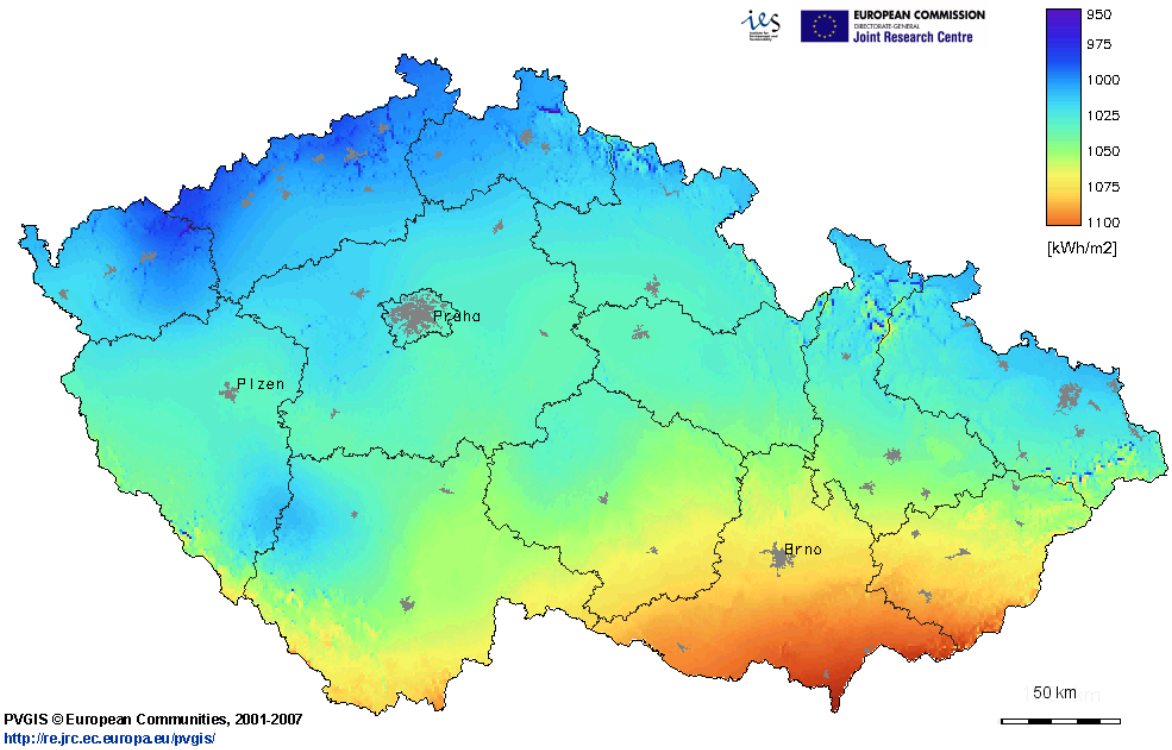
Příloha 5: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=1

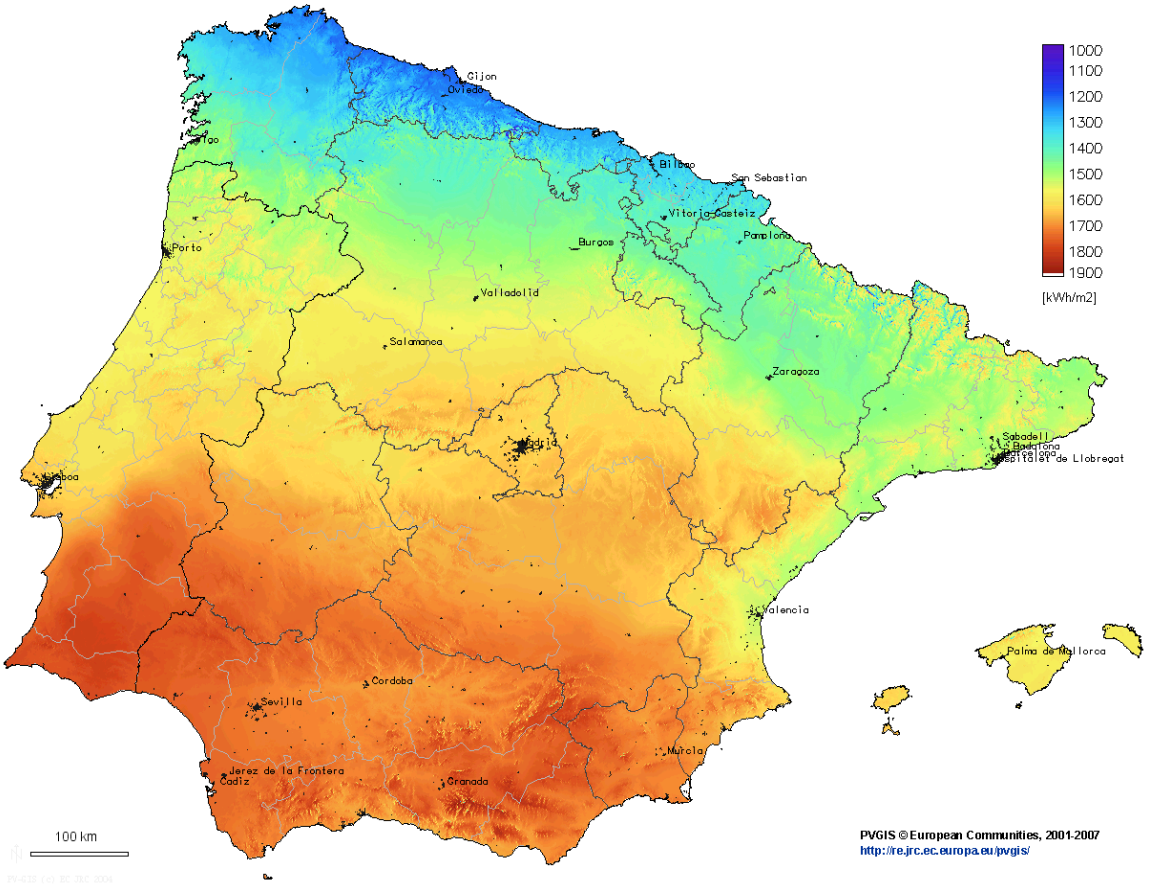
Příloha 6: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=0,95 induktivní

Příloha 7: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=0,95 kapacitní

Příloha 8: Emise harmonických proudů v ampérech na výstupu z jednoho střídače (SM300C), vztažené na hladinu 0,4 kV

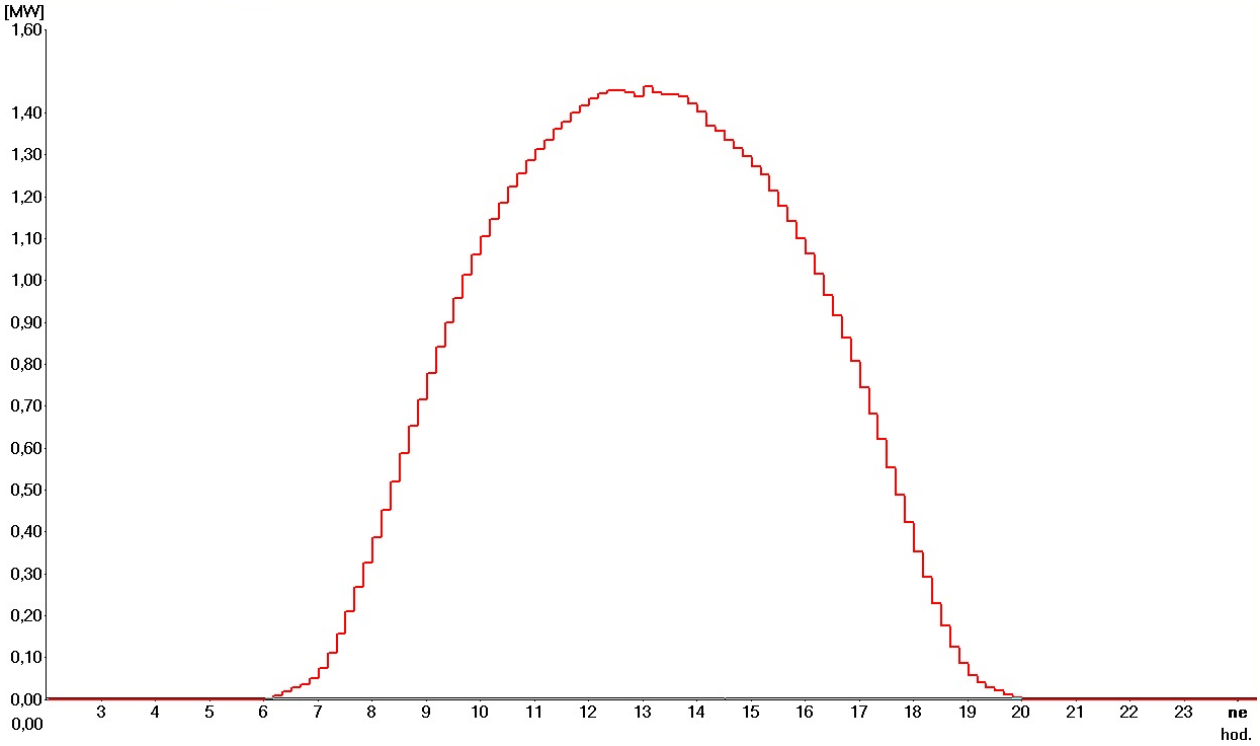
Příloha 1: Sluneční energie dopadající na vodorovnou plochu v ČR a ve Španělsku



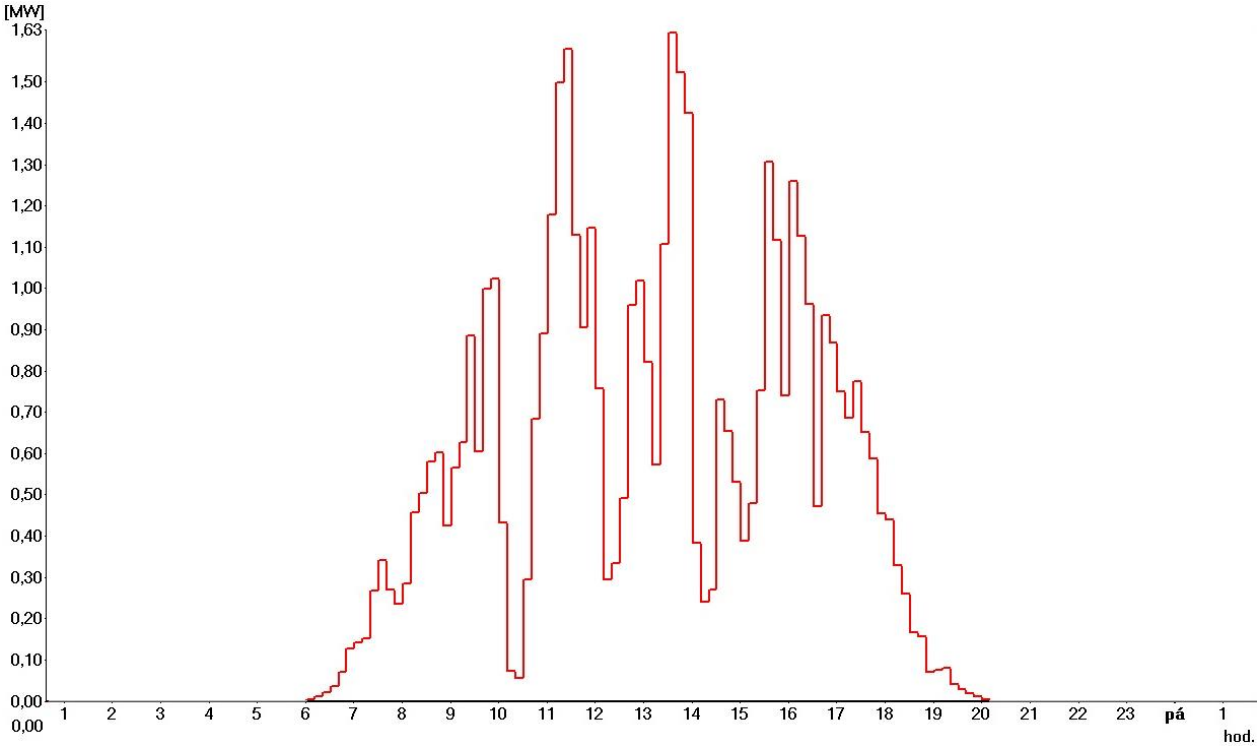


Zdroj: KAPOUN, M. Zhodnocení fotovoltaických systémů na území Španělska. DP.

Příloha 2: Průběhy dodávaných činných výkonů FVE (Pn=1920 kW) za oblačného a slunečného dne



Slunečný den



Oblačný den

Zdroj: E.ON. FVE-vykony.

Příloha 3: Výpočet průměrné roční úspory elektrické energie pro rodinný dům při pokrytí části spotřeby FV

Výpočet průměrné roční spotřeby za poslední 3 roky:

rok	VT [kWh]	NT [kWh]	Celkem [kWh]
2009	337,0	13 376,7	13 713,7
2010	394,5	14 815,7	15 210,2
2011	395,3	13 224,2	13 619,5
Φ:	375,6	13 805,5	14 181,1

Výpočet spotřeby uhrazené z FV, pro zjednodušení byla vypočítána průměrná spotřeba za hodinu (podělená 8 760h za rok) a tato hodnota následně vynásobena průměrnou dobou ročního využití maxima instalovaného výkonu FV (980 h):

	VT [kWh]	NT [kWh]
spotřeba / h	0,043	1,576
pokrytí FV	42,019	1544,455
přepočteno na MWh	0,042	1,544

V následující tabulce je vývoj ceny elektřiny dle fakturace společnosti E.ON:

rok	VT [Kč/MWh]	NT [Kč/MWh]
2009	2 467	1 935
2010	2 043	1 525
2011	2 043	1 525
Φ:	2 184,3	1 661,7

Dům je připojen k DS přes tarif 20h NT, k vytápění jsou použity přímotopy, bude počítáno s následujícími průměrnými cenami:

VT:	2184,3 Kč/MWh
NT:	1661,7 Kč/MWh

Dále je nutné zahrnout do úspory také platby za související služby, jejich částky (v Kč/MWh) nejsou závislé na druhu tarifu (VT či NT). Tyto částky jsou shrnuty v následující tabulce:

rok	Systémové služby	Částka za služby OTE	Částka za OZE, KVET a DZ
2009	141,010	4,750	52,180
2010	155,400	4,750	166,340
2011	155,400	4,750	370,000
Φ:	150,603	4,750	196,173
∑:	351,526		

Následně je úspora energie vynásobena průměrnými cenami, připočtena je úspora za související služby:

	VT:	NT:	VT+NT
úspora [MWh]	0,042	1,544	1,586
úspora [Kč/rok]	91,8	2 566,4	557,7
∑ [Kč/rok]	3215,9		

Příloha 4: Výpočet návratnosti investice do solárního systému na střechu rodinného domu

Rok	Garantovaný výkon P_G [%]	Vyrobená energie při zahrnutí minimálního výkonu E [kWh]	Zisk z výkupní ceny N_{VC}	Provozní náklady elektrárny N_P	Návratnost při prodeji elektřiny distributorovi ROI_{VC}	Zisk ze zeleného bonusu N_{ZB}	Úspora na vlastní spotřebě domu N_{VS}	Návratnost při využití zeleného bonusu ROI_{ZB}
1.	100%	3724	23 401,6 Kč	-1 500,0 Kč	-203 097,4 Kč	21 353,4 Kč	3 215,9 Kč	-201 929,7 Kč
2.	99%	3686,76	23 167,6 Kč	-1 500,0 Kč	-181 429,8 Kč	21 139,9 Kč	3 215,9 Kč	-179 073,9 Kč
3.	98%	3649,52	22 933,6 Kč	-1 500,0 Kč	-159 996,2 Kč	20 926,3 Kč	3 215,9 Kč	-156 431,7 Kč
4.	97%	3612,28	22 699,6 Kč	-1 500,0 Kč	-138 796,6 Kč	20 712,8 Kč	3 215,9 Kč	-134 002,9 Kč
5.	96%	3575,04	22 465,6 Kč	-1 500,0 Kč	-117 831,1 Kč	20 499,3 Kč	3 215,9 Kč	-111 787,8 Kč
6.	95%	3537,8	22 231,5 Kč	-1 500,0 Kč	-97 099,5 Kč	20 285,7 Kč	3 215,9 Kč	-89 786,1 Kč
7.	94%	3500,56	21 997,5 Kč	-1 500,0 Kč	-76 602,0 Kč	20 072,2 Kč	3 215,9 Kč	-67 998,0 Kč
8.	93%	3463,32	21 763,5 Kč	-1 500,0 Kč	-56 338,5 Kč	19 858,7 Kč	3 215,9 Kč	-46 423,4 Kč
9.	92%	3426,08	21 529,5 Kč	-1 500,0 Kč	-36 309,0 Kč	19 645,1 Kč	3 215,9 Kč	-25 062,4 Kč
10.	91%	3388,84	21 295,5 Kč	-1 500,0 Kč	-16 513,6 Kč	19 431,6 Kč	3 215,9 Kč	-3 914,9 Kč
11.	90%	3351,6	21 061,5 Kč	-1 500,0 Kč	3 047,9 Kč	19 218,1 Kč	3 215,9 Kč	17 019,1 Kč
12.	89%	3314,36	20 827,4 Kč	-1 500,0 Kč	22 375,3 Kč	19 004,5 Kč	3 215,9 Kč	37 739,5 Kč
13.	88%	3277,12	20 593,4 Kč	-1 500,0 Kč	41 468,7 Kč	18 791,0 Kč	3 215,9 Kč	58 246,4 Kč
14.	87%	3239,88	20 359,4 Kč	-1 500,0 Kč	60 328,2 Kč	18 577,5 Kč	3 215,9 Kč	78 539,8 Kč
15.	86%	3202,64	20 125,4 Kč	-1 500,0 Kč	78 953,5 Kč	18 363,9 Kč	3 215,9 Kč	98 619,7 Kč
16.	85%	3165,4	19 891,4 Kč	-1 500,0 Kč	97 344,9 Kč	18 150,4 Kč	3 215,9 Kč	118 486,0 Kč
17.	84%	3128,16	19 657,4 Kč	-1 500,0 Kč	115 502,3 Kč	17 936,9 Kč	3 215,9 Kč	138 138,7 Kč
18.	83%	3090,92	19 423,3 Kč	-1 500,0 Kč	133 425,6 Kč	17 723,3 Kč	3 215,9 Kč	157 578,0 Kč
19.	82%	3053,68	19 189,3 Kč	-1 500,0 Kč	151 114,9 Kč	17 509,8 Kč	3 215,9 Kč	176 803,7 Kč
20.	81%	3016,44	18 955,3 Kč	-1 500,0 Kč	168 570,2 Kč	17 296,3 Kč	3 215,9 Kč	195 815,8 Kč
21.	80%	2979,2	18 721,3 Kč	-1 500,0 Kč	185 791,5 Kč	17 082,7 Kč	3 215,9 Kč	214 614,5 Kč
22.	79%	2941,96	18 487,3 Kč	-1 500,0 Kč	202 778,8 Kč	16 869,2 Kč	3 215,9 Kč	233 199,6 Kč
23.	78%	2904,72	18 253,3 Kč	-1 500,0 Kč	219 532,1 Kč	16 655,7 Kč	3 215,9 Kč	251 571,1 Kč
24.	77%	2867,48	18 019,2 Kč	-1 500,0 Kč	236 051,3 Kč	16 442,1 Kč	3 215,9 Kč	269 729,2 Kč
25.	76%	2830,24	17 785,2 Kč	-1 500,0 Kč	252 336,6 Kč	16 228,6 Kč	3 215,9 Kč	287 673,7 Kč

Příloha 5: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=1

Pc	2200	cos(fí)	1		po připojení
I1	57,73503				
deltaU1	3,388757	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	55,11071	odber TS630	100		
deltaU2	80,73537	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	5,076027	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	52,48639	odberTS	100		
deltaU4	15,8458	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	49,86207	odberTS	100		
deltaU5	22,16753	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	47,23775	odberTS	100		
deltaU6	8,161455	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	44,61343	odberTS	100		
deltaU7	41,15879	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	15,74592	odber11xTS	1100		
deltaU8	3,028554	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	2,624319				
deltaU9	1,57825	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	198,0164				
deltaUc%	1,558975				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	16,87591	Rs	0,292299	Xs	2,922994

Pc	2800	cos(fí)	1		před připojením
I1	73,48094				
deltaU1	4,312964	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	70,85662	odber TS630	100		
deltaU2	103,8026	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	6,52632	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	68,2323	odberTS	100		
deltaU4	20,59954	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	65,60799	odberTS	100		
deltaU5	29,1678	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	62,98367	odberTS	100		
deltaU6	10,88194	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	60,35935	odberTS	100		
deltaU7	55,68542	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	31,49183	odber11xTS	1100		
deltaU8	6,057108	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	13,1216				
deltaU9	7,89125	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	266,4034				
deltaUc%	2,097383				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	21,47844	Rs	0,292299	Xs	2,922994

změna napětí	-0,53841

Příloha 6: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=0,95 induktivní

Pc	2200	cos(fí)	0,95		po připojení
I1	60,77371				
deltaU1	4,77272	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	58,01127	odber TS630	100		
deltaU2	113,7075	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	7,149067	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	55,24883	odberTS	100		
deltaU4	22,31719	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	52,48639	odberTS	100		
deltaU5	31,22071	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	49,72395	odberTS	100		
deltaU6	11,49458	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	46,96151	odberTS	100		
deltaU7	57,96796	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	16,57465	odber11xTS	1100		
deltaU8	4,26541	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	2,762441				
deltaU9	1,837623	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	327,0772				
deltaUc%	2,575065				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	72,34436	Rs	0,292299	Xs	2,922994

Pc	2800	cos(fí)	0,95		před připojením
I1	77,34836				
deltaU1	6,074371	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	74,58592	odber TS630	100		
deltaU2	146,1954	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	9,191658	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	71,82348	odberTS	100		
deltaU4	29,01235	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	69,06104	odberTS	100		
deltaU5	41,07988	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	66,2986	odberTS	100		
deltaU6	15,3261	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	63,53615	odberTS	100		
deltaU7	78,42725	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	33,1493	odber11xTS	1100		
deltaU8	8,530819	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	13,81221				
deltaU9	9,188114	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	435,1006				
deltaUc%	3,425529				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	92,07464	Rs	0,292299	Xs	2,922994

změna napětí	-0,85046

Příloha 7: Výpočet zvýšení napětí po připojení FVE při cos φ=0,95 kapacitní

Pc	2200	cos(fí)	0,95		po připojení
I1	60,77371				
deltaU1	2,004795	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	58,01127	odber TS630	100		
deltaU2	47,76319	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	3,002987	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	55,24883	odberTS	100		
deltaU4	9,374403	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	52,48639	odberTS	100		
deltaU5	13,11435	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	49,72395	odberTS	100		
deltaU6	4,828331	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	46,96151	odberTS	100		
deltaU7	24,34961	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	16,57465	odber11xTS	1100		
deltaU8	1,791698	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	2,762441				
deltaU9	1,318877	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	68,95571				
deltaUc%	0,542885				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	-38,5925	Rs	0,292299	Xs	2,922994

Pc	2800	cos(fí)	0,95		před připojením
I1	77,34836				
deltaU1	2,551557	R1	0,058695	X1	0,07293
I2	74,58592	odber TS630	100		
deltaU2	61,40982	R2	1,464967	X2	1,820258
deltaU3	3,860983	R3	0,092106	X3	0,114444
I4	71,82348	odberTS	100		
deltaU4	12,18672	R4	0,301903	X4	0,375122
I5	69,06104	odberTS	100		
deltaU5	17,25572	R5	0,444577	X5	0,552398
I6	66,2986	odberTS	100		
deltaU6	6,437775	R6	0,172774	X6	0,214676
I7	63,53615	odberTS	100		
deltaU7	32,9436	R7	0,922565	X7	1,14631
I8	33,1493	odber11xTS	1100		
deltaU8	3,583396	R8	0,192339	X8	0,238986
I9	13,81221				
deltaU9	6,594386	R9	0,601394	X9	0,300697
deltaUc	97,70618				
deltaUc%	0,769237				
ubytek napětí na nadřazené síti					
deltaUs	-49,1178	Rs	0,292299	Xs	2,922994

změna napětí	-0,22635

Příloha 8: Emise harmonických proudů v ampérech na výstupu z jednoho střídače (SM300C), vztažené na hladinu 0,4 kV

Ordungszahl Nr. Oberwelle	Referenz SolarMax25C Haberlin	Referenz SolarMax25C [%]	SM20C	SM25C	SM30C	SM35C	SM50C	SM80C	SM100C	SM300C
Pac [W]			20000	25000	30000	35000	50000	80000	100000	300000
1	31.24	100	28.9865072	36.2318841	43.4782609	50.7246377	72.4637681	115.942029	144.927536	434.782609
2	0.5449	1.744238156	0.50557628	0.63197035	0.75836442	0.88475849	1.26394069	2.02230511	2.52788139	7.58364416
3	0.2817	0.901728653	0.2613706	0.32671324	0.39205589	0.45739854	0.65342649	1.04548238	1.30685298	3.92055893
4	0.19499	0.624167734	0.18091818	0.22614773	0.27137728	0.31660682	0.46229546	0.72367273	0.90459092	2.71377276
5	0.4179	1.337708067	0.38774147	0.48467684	0.5816122	0.67854757	0.96935367	1.55096587	1.93870734	5.81612203
6	0.03582	0.114620487	0.03304942	0.04131177	0.04957412	0.05783648	0.08262354	0.13219767	0.16524708	0.49574125
7	0.14976	0.479385403	0.13895229	0.17369036	0.20842844	0.24316651	0.34738073	0.55580916	0.69476145	2.08428436
8	0.05545	0.177496799	0.05144835	0.06431043	0.07717252	0.09003461	0.12862087	0.20579339	0.25724174	0.77172521
9	0.03609	0.115524968	0.0334855	0.04185687	0.05022825	0.05859962	0.08371374	0.13394199	0.16742749	0.50228247
10	0.04051	0.129673496	0.03758652	0.04698315	0.05637978	0.06577641	0.0939663	0.15034608	0.1879326	0.56379781
11	0.03666	0.117349552	0.03401436	0.04251795	0.05102154	0.05952513	0.08503591	0.13605745	0.17007181	0.51021544
12	0.04657	0.149071703	0.04320919	0.05401149	0.06481378	0.07561608	0.10802297	0.17283676	0.21604595	0.64813784
13	0.04114	0.131690141	0.03817106	0.04771382	0.05725658	0.06679935	0.09542764	0.15268422	0.19085528	0.57256583
14	0.03956	0.126632522	0.03670508	0.04588135	0.05505762	0.06423389	0.0917627	0.14682032	0.18352539	0.55057618
15	0.03816	0.122151088	0.03540611	0.04425764	0.05310917	0.0619607	0.08851528	0.14162445	0.17703056	0.53109169
16	0.03657	0.11706146	0.03393086	0.04241357	0.05089629	0.059379	0.08482714	0.13572343	0.16965429	0.50896287
17	0.04677	0.149711908	0.04339476	0.05424344	0.06509213	0.07594082	0.10848689	0.17357902	0.21697378	0.65092134
18	0.03956	0.126632522	0.03670508	0.04588135	0.05505762	0.06423389	0.0917627	0.14682032	0.18352539	0.55057618
19	0.03497	0.111939821	0.03244632	0.04055791	0.04866949	0.05678107	0.08111581	0.1297853	0.16223162	0.48669487
20	0.04365	0.139724712	0.04049992	0.0506249	0.06074987	0.07087485	0.10124979	0.16199967	0.20249958	0.60749875
21	0.0466	0.149167734	0.04323702	0.05404628	0.06485554	0.07566479	0.10809256	0.1729481	0.21618512	0.64855536
22	0.04392	0.140588988	0.04075043	0.05093804	0.06112565	0.07131326	0.10187608	0.16300173	0.20375216	0.61125647
23	0.04005	0.128201024	0.03715972	0.04644965	0.05573958	0.06502951	0.09289929	0.14863887	0.18579859	0.55739576
24	0.03324	0.106402049	0.03084117	0.03855147	0.04626176	0.05397205	0.07710293	0.12336469	0.15420587	0.4626176
25	0.03693	0.118213828	0.03426488	0.0428311	0.05139732	0.05996354	0.08566219	0.13705951	0.17132439	0.51397317
26	0.03941	0.126152369	0.0365659	0.04570738	0.05484886	0.06399033	0.09141476	0.14626362	0.18282952	0.54848856
27	0.03486	0.111587708	0.03234426	0.04043033	0.04851639	0.05660246	0.08086066	0.12937705	0.16172132	0.48516395
28	0.03418	0.109411012	0.03171334	0.03964167	0.04757001	0.05549834	0.07928334	0.12685335	0.15856668	0.47570005
29	0.05997	0.191965429	0.05564215	0.06955269	0.08346323	0.09737377	0.13910538	0.22256861	0.27821077	0.8346323
30	0.0479	0.153329065	0.04444321	0.05555401	0.06666481	0.07777561	0.11110802	0.17777283	0.22221604	0.66664811
31	0.05269	0.168661972	0.04888753	0.06110941	0.07333129	0.08555317	0.12221882	0.19555011	0.24443764	0.73331292
32	0.04061	0.129993598	0.0376793	0.04709913	0.05651896	0.06593878	0.09419826	0.15071722	0.18839652	0.56518956
33	0.05028	0.160947503	0.04665145	0.05831431	0.06997718	0.08164004	0.11662863	0.1866058	0.23325725	0.69977175
34	0.04198	0.134379001	0.03895044	0.04868804	0.05842565	0.06816326	0.09737609	0.15580174	0.19475218	0.58425653
35	0.03467	0.110979513	0.03216797	0.04020997	0.04825196	0.05629396	0.08041994	0.1286719	0.16083987	0.48251962
36	0.03681	0.117829706	0.03415354	0.04269192	0.05123031	0.05976869	0.08538384	0.13661415	0.17076769	0.51230307
37	0.03827	0.122503201	0.03550817	0.04438522	0.05326226	0.0621393	0.08877044	0.1420327	0.17754087	0.53262261
38	0.03917	0.125384123	0.03634322	0.04542903	0.05451484	0.06360064	0.09085806	0.1453729	0.18171612	0.54514836
39	0.02809	0.089916773	0.02606283	0.03257854	0.03909425	0.04560996	0.06515708	0.10425133	0.13031416	0.39094249
40	0.04057	0.129865657	0.03764219	0.04705274	0.05646329	0.06587383	0.09410548	0.15056876	0.18821095	0.56463286

Zdroj: E.ON. FVE výrobna.