

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyhodnocení kvality napětí v místě připojení

fotovoltaických elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Pavel ČERNOHORSKÝ**
Osobní číslo: **E16B0007P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Vyhodnocení kvality napětí v místech připojení fotovoltaických elektráren**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Provedte stručný rozbor tzv. charakteristik napětí, podle nichž se hodnotí kvalita napětí v distribuční soustavě.
2. Zdůvodněte, na které z těchto charakteristik má vliv provoz fotovoltaických elektráren.
3. Vyhodnoťte z naměřených dat kvalitu napětí v místech připojení fotovoltaických elektráren.
4. Vyhodnoťte míru vlivu provozu elektráren na klíčové parametry napětí, např. při minimálním či maximálním dodávaném výkonu.
5. Provedte celkové zhodnocení kvality napětí v místech připojení, např. vyhodnocením úrovně významných parametrů napětí vzhledem k limitním hodnotám.

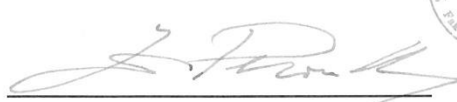
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 3.vydání 2012.
2. Pravidla provozování distribučních soustav, 2011.
3. TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. Průmyslová elektroenergetika. ZČU v Plzni, 2000.

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

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Anotace

Obsahem této práce je vyhodnocení kvality napětí v distribučních sítích 22 kV v místech připojení fotovoltaických elektráren. Cílem je vyhodnotit odchylky napětí a další významné charakteristiky napětí, a posoudit do jaké míry je kvalita ovlivněna připojením FVE. Kvalita napětí v síti musí být v plném souladu s normou ČSN EN 50160.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, kvalita napětí, dodávaný výkon, norma ČSN EN 50160

Annotation

The content of this work is the evaluation of voltage quality in the electrical system at the connection points of photovoltaic power plants. The aim is to evaluate voltage variations and other important voltage characteristics and voltage parameters, assess the extent to which the quality is affected by the PV plant. Voltage quality in the network must be in full compliance with the ČSN EN 50160 standard.

Keywords

Photovoltaic power plant, deviations and voltage quality, power of PV, standard ČSN EN 50160

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce paní doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za poskytnutí kvalitních informací, cenných rad a celkovém přístupu při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	10
1. Kvalita elektrické energie dodávaná do distribuční soustavy.....	12
1.1 Důvody pro hodnocení kvalita energie	12
1.2 Charakteristiky napětí dodávaného z DS	12
1.3 Pravidla provozování DS.....	13
2. Charakteristiky parametrů elektrické energie vn	14
2.1 Frekvence.....	14
2.2 Velikost napětí a odchylky od napájecího napětí	15
2.2.1 Zkušební metoda	15
2.3 Rychlé změny napětí, míra vjemu flikru	16
2.4 Nesymetrie	17
2.5 Harmonické napětí, THD	18
3. Vlivy provozu FVE na kvalitu a charakteristiky napětí	19
3.1 Hodnocení celkového provozu FVE v ČR za rok.....	19
3.2 Dodávka elektřiny do ES v průběhu roku	22
3.3 Kolísání výroby a závislost na osvitu.....	23
3.4 Vliv kolísání výroby na odchylky napětí	25
4. Vyhodnocení naměřených dat v místě připojení FVE	26
4.1 Vyhodnocení využití instalovaného výkonu	27
4.2 Odchylky napětí.....	30
4.3 Kolísání napětí – míra vjemu flikru	34
4.4 Nesymetrie napětí	35
4.5 Deformace křivky napětí.....	36
5. Vliv provozu FVE na klíčové parametry.....	39
5.1 Vliv výkonu na velikosti napětí	39
5.2. Vliv výkonu (max a min) na dlouhodobý flikr	40

5.3. Vliv výkonu (max a min) na nesymetrii.....	41
6. Celkové vyhodnocení vzhledem k limitním hodnotám.....	42
6.1 Procentuální vyjádření odchylek napětí vůči limitním hodnotám normy	42
6.2 Procentuální vyjádření flikru, nesymetrie a THDu vzhledem k limitním hodnotám	44
6.3 Procentuální vyjádření vyšších harmonických vzhledem k limitní hodnotě normy	45
Závěr	46
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	48
Přílohy.....	49

Úvod

Vzhledem k životnímu prostředí se v dnešní době klade velký důraz na hospodárnost a způsob výroby elektrické energie. Proto jsou pro výrobu žádány obnovitelné zdroje energie, mezi které patří právě fotovoltaické elektrárny. Každá výrobní elektrická energie připojená do distribuční sítě, musí splňovat limity zpětných vlivů pro danou síť.

FVE musí být do sítě připojena tak, aby neovlivňovala kvalitu napětí svými zpětnými vlivy. Nesmí přispívat ke zhoršení kvality napětí natolik, aby nedocházelo k překročení limitů hodnocených parametrů napětí. Zároveň je sledována kvalita napětí v místě připojení elektráren v bodě kde jsou připojeni i ostatní uživatelé, kteří mají také vliv na síť. Zde se sleduje celková kvalita napětí v konkrétním uzlu připojení. Ta musí být v souladu s normou ČSN EN 50160.

Bakalářská práce vyhodnocuje naměřené hodnoty střídavých napětí v místě připojení fotovoltaických elektráren k síti 22 kV. Posuzováno bylo 10 FVE. Praktická část obsahuje vyhodnocení naměřených parametrů napětí v distribuční síti v místě připojení FVE. Porovnává, zda-li jsou v mezích normy ČSN EN 50160, která udává limitní hodnoty pro kvalitu napětí v distribučních sítích.

Seznam symbolů a zkratk

a – Výtěžnost [%]

DS – Distribuční síť

ES – Elektrizační soustava

E_m – Energie skutečná [kWh]

E_{te} – Energie teoretická [kWh]

ERÚ - Energetický regulační úřad

FVE – Fotovoltaická elektrárna

HDO – Hromadné dálkové ovládání

NN – Nízké napětí

OZE – Obnovitelné zdroje energie

P – Činný výkon [W]

PDS – Provozovatel distribuční soustavy

P_{inst} – Instalovaný výkon [W]

P_{lt} – Dlouhodobá míra vjemu flikru

P_s - Střední hodnota činného výkonu [W]

P_{st} – Krátkodobá míra vjemu flikru

THD – Celkové harmonické zkreslení (total harmonic distortion)

U – Napětí [V]

U_n – Jmenovité napětí [V]

U_h – Harmonické napětí [V]

VN – Vysoké napětí

VVN – Velmi vysoké napětí

1. Kvalita elektrické energie dodávaná do distribuční soustavy

Kvalita elektrické energie je jasně definována charakteristikami napětí, které musí za normálních provozních podmínek splňovat, pro všechny odběratele, při nepřetržitém provozu v celé distribuční soustavě. Protože síť má určitou impedanci a dochází na ni k úbytkům napětí, dochází k ovlivňování vlastností a parametrů elektrické energie. [3]

1.1 Důvody pro hodnocení kvalita energie

V každém odběrovém místě musí být dodavatelem zajištěna dostatečná kvalita elektrické energie pro koncového uživatele, který energii odebírá jako produkt. Vzhledem k velkému ovlivňování sítě zařízeními s nelineární provozní charakteristikou dochází k destabilizování parametrů napětí. Nekvalitní a kolísavé napětí může mít za následky častější poruchy a výpadky připojených elektrických zařízení, přístrojů a spotřebičů, proto je potřeba kvalitu regulovat a držet ve stanovených mezích.

Výrobce dodávající elektřinu do DS ovlivňuje parametry kvality jednak dodávaným proudem a jeho kolísáním, proudovými rázy při připojování zdroje k síti, dodávkou nebo odsáváním harmonických proudů a proudů signálu HDO ze sítě, dodávkou nebo odsáváním zpětné složky proudu. Projevuje se současně jako zátěž i jako zdroj. Pro elektřinu dodávanou regionálními výrobci platí ve společném napájecím bodě stejné parametry kvality, jako jsou uvedeny v Pravidlech provozování distribučních soustav, příloze 3.[4]

1.2 Charakteristiky napětí dodávaného z DS

Charakteristiky dodávky elektrické energie pro NN, VN a VVN jsou dány legislativní normou ČSN EN 50160, která jasně udává limitní hodnoty pro střídavé napětí v elektrizační soustavě.

Jsou to:

- a) kmitočet sítě
- b) velikost napájecího napětí
- c) odchylky napájecího napětí
- d) rychlé změny napětí
- velikost rychlých změn napětí

- míra vjemu flikru
- e) krátkodobé poklesy napájecího napětí
- f) nesymetrie napájecího napětí
- g) harmonická napětí
- h) meziharmonická napětí
- i) úrovně napětí signálů v napájecím napětí
- j) krátkodobá přerušení napájecího napětí
- k) dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- l) dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- m) přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí.

Pro charakteristiky a) až i) platí pro odběrná místa z DS s napětíovou úrovní nn a vn.

- zaručované hodnoty
- měřicí intervaly
- doby pozorování
- mezní pravděpodobnosti splnění stanovených limitů, stanovené v ČSN EN50160.

Pro charakteristiky j) až m) uvádí ČSN EN 50160 pouze informativní hodnoty. [4]

1.3 Pravidla provozování DS

Při zřizování výroby a elektrického akumulčního zařízení je zapotřebí dodržovat platná nařízení a předpisy, na to, aby byla vhodná pro paralelní provoz se sítí PDS a aby bylo vyloučeno rušivé zpětné působení na síť nebo zařízení dalších odběratelů.

Při zřizování a provozu těchto elektrických zařízení je zapotřebí dodržovat:

- současně platné zákonné a úřední předpisy, především zákon 458/2000 Sb., ČSN EN 50160 a vyhlášky ERÚ č. 16/2016 Sb.
- platné normy ČSN, PNE, případně PN PDS
- předpisy pro ochranu pracovníků a bezpečnost práce
- nařízení a směrnice PDS.

Projektování, výstavbu a připojení výrobní a elektrického akumulčního zařízení k síti PDS je zapotřebí zadat odborné firmě.

Připojení k síti je třeba projednat a odsouhlasit s PDS.

PDS může ve smyslu zákona 458/200 Sb. požadovat změny a doplnění na nově zřizovaném nebo už provozovaném zařízení, pokud je to nutné z důvodů bezpečného a bezporuchového napájení nebo také z hlediska zpětného ovlivnění distribuční soustavy. Konzultace s PDS by proto měly být prováděny již ve stadiu přípravy, nejpozději při projektování vlastní výrobní. [2]

2. Charakteristiky parametrů elektrické energie VN

Elektrická energie musí splňovat jisté kvalitní parametry. Rušení od jednotlivých uživatelů se po síti šíří a může ovlivňovat kvalitu u odběratelů v okolí. Mezi nejvýznamnější jevy způsobující rušení energetických sítí patří:

- kolísání napětí
- nesymetrie napětí
- vyšší harmonické
- zvýšené napětí [5]

Průběžné jevy jsou spojitě odchytky jmenovitých parametrů vyskytující se v průběhu času, které mohou být způsobeny změnami nebo nelinearitou zatížení. Dle vyhlášky ČSN EN 50160 jsou průběžné jevy na hladině VN definovány od 1kV do 36kV včetně, kam spadají všechny hladiny napětí, na kterých jsou připojeny vyhodnocované elektrárny. Při plynulém a stálém provozu DS musí být splněny parametry popsané v této kapitole.

2.1 Frekvence

Jmenovitá hodnota frekvence napětí sítě je stanovena na 50Hz. Při normálním provozu, probíhá měření v intervalu 10 s a střední hodnota základní harmonické musí být u systémů se synchronním připojením k propojenému systému v daných rozmezích:

- 50 Hz \pm 1 % (tj. 49,5 ...50,5 Hz) během 99,5 % roku
- 50 Hz + 4 %/-6% (tj. 47...52 Hz) po 100 % času[1]

Příčiny: nedostatečné pokrytí odběru v síti nebo zdroje a spotřebiče s nelineární charakteristikou.

Následky: poklesy frekvence by se mohli projevit například změnou sycení, na transformátorechby docházelo k deformaci sinusovky napětí. Při poklesu frekvence často klesá činný i jalový výkon. omezení funkčnosti všech zařízení připojených v DS.

2.2 Velikost napětí a odchylky od napájecího napětí

Pro zmírnění ztrát činných a jalových je lepší udržovat vyšší napětí při přenosu el. energie. Na hladinách vn se velikost napětí za normálních provozních podmínek musí udržovat v toleranci $\pm 10\% U_n$. [2]

2.2.1 Zkušební metoda

Jsou-li vyžadována měření napětí, provedou se podle EN 61000-4-30 s intervalem měření nejméně jeden týden.

Pro ověření shody se použijí následující limity:

– během každého týdne musí být 99 % naměřených průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu menším než mezní limit $\pm 10\%$
- všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $\pm 15\% U_n$. [1]

Příčiny: náhlé spínání velkých soustředných odběrů jakéhokoli charakteru např. motory a obloukové pece

Následky: při vyšším napětí – zkrácení životnosti připojených zařízení, náchylnost k poruchovosti; při nižším napětí – narušení funkčnosti a hrozí až vypnutí zařízení, poklesy výkonů.

Prevence: tvrdost sítě, velký zkratový výkon sítě v místě připojení; postupné spínání velkých rozběhů

2.3 Rychlé změny napětí, míra vjemu flikru

Rychlé změny v síti jsou způsobeny převážně poruchami, spínáním nebo náhlou změnou zatížení sítě.

Flikr je velmi negativní jev způsobený kolísáním napětí. Jedná se sled rychlých změn, které následují těsně po sobě. Při těchto změnách se napětí stále pohybuje v rozmezí $\pm 10\% U_n$. Na tento jev kolísání velmi nepříznivě reaguje lidské oko, při vnímání světelného toku svítidel, proto flikr označujeme jako míru vjemu blikání. Jakékoli blikání je pro člověka nepříjemné, ruší ho v činnosti, může mít podíl na lidské únavě a ovlivňovat náladu. Lidské oko reaguje nejcitlivěji při 18 změnách za sekundu. [5]

Při normálních provozních podmínkách musí být v jakémkoliv týdenním období dlouhodobá míra vjemu flikru do hodnoty $1(P_{1t} \leq 1)$ po 95 % času na hladině vn. [1]

$P_{st}(P_{1t})$ - krátkodobá (dlouhodobá) míra vjemu blikání. P_{st} je měřená v intervalu 10 minut, vhodná metoda k ověření zdrojů rušení s krátkým cyklem rušení. P_{1t} je metoda měřená v intervalu 120min.

Flikr je nejzávažnějším problémem z hlediska kvality napětí na hladině NN a nejčastější příčina nesplnění požadavků normy ČSN EN 50160.

Příčiny: u FVE se jedná o střídače s nelineární charakteristikou a kolísání v době změny osvitů.

V síti je kolísání napětí způsobeno také časově proměnlivou zátěží, jejíž frekvence změn je nižší než frekvence sítě. V průmyslu mezi hlavní zdroje patří obloukové a odporové svářečky, elektrické pece, rozběh velkých motorů. [5]

Následky: při změnách světelného toku, dochází k ovlivnění zrakové pohody lidského oka, ale může dojít také k negativnímu ovlivnění provozu zobrazovacích zařízení.

Prevence: kolísání lze omezit zvýšením impedance sítě v místě připojení tj. zvýšení zkratového výkonu nebo připojením kompenzace jalového výkonu, která potlačí periodické kolísání. [5]

2.4 Nesymetrie

Nesymetrie udává jak nerovnoměrné je zatížení jednotlivých fází sítě. Sít je nazývána symetrickou v případě stejné velikosti amplitudy napětí na všech fázích v jednom okamžiku a současně je splněn fázový posuv mezi fázemi. V případě nesplnění jedné nebo obou z těchto podmínek je sít' nesymetrická. Dle normy ČSN EN 50160 ed.2 musí být za normálních provozních podmínek, v jakémkoli týdenním období 95% měřených středních efektivních hodnot napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 %, při měření v deseti minutových intervalech. [6]

Napěťová nesymetrie je charakterizována poměrem zpětné složky napětí ku sousledné složce. Poměr je nazýván jako stupeň nesymetrie:

$$u_2 = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Povolená hranice nesymetrie v DS 2% platí pro dlouhodobě působící nesymetrii, která může vést k nepřijatelnému oteplení napájecích zařízení. Například během poruch, se v síti může vyskytnout i vyšší hodnota nesymetrie. Nejčastější příčinou je nesymetrické zatížení jedné fáze, mezi velké jednofázové zatížení patří napájecí stanice trakce. [5]

Zařízení zatížené jednofázovým odběrem může mít až cca dvojnásobné proudové zatížení oproti zatížení při stejném výkonu symetrické zátěže. [5]

Příčiny: nerovnoměrné rozložení zátěže na třífázové síti.

Následky: nárůst tepelných ztrát v soustavě, omezení životnosti a využitelnosti transformátorů a vedení.

Prevence: nesymetrii se dá předcházet rovnoměrným rozložením předpokládaných toků proudu do jednotlivých fází. To je důležité zejména při jednofázových odběrech.

2.5 Harmonické napětí, THD

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě uvedené v následující tabulce. Při rezonanci některých harmonických může docházet ke způsobení vyššího napětí.

Tabulka 1: Úrovně jednotlivých harmonických sítí VN podle ČSN EN50160

liché harmonické - nenásobky 3		liché harmonické - násobky 3		sudé harmonické	
řád harmonické h	harmonické napětí [%]	řád harmonické h	harmonické napětí [%]	řád harmonické h	harmonické napětí [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19,23,25	1,5				

Hodnoty pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních účinků obtížně předvídatelné. Mimo to celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu (40) musí být menší nebo roven 8 %.

THD se určí podle vztahu:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} (u_h)^2}$$

,kde u_h je poměr amplitudy konkrétní harmonické (U_h) k amplitudě základní harmonické U_1 .

[1]

Příčiny: vyšší harmonické jsou způsobeny nelineárními spotřebiči. To znamená spotřebič, který při sinusovém průběhu napětí odebírá nesinusový proud např.: frekvenční měniče, usměrňovače nebo mikrovlnné trouby.

Následky: zhoršení účinnosti přenosu vlivem přídavných ztrát, zkrácení doby životnosti transformátorů a motorů vlivem ztrát, ovlivnění činnosti HDO.

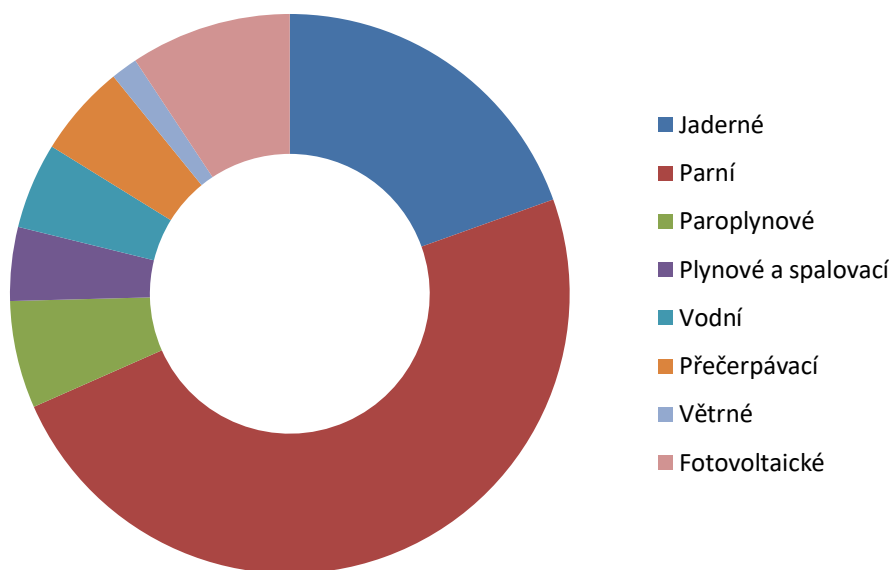
Prevence: volba vhodného připojení – zvýšení zkratového výkonu; použití vhodného zapojení transformátoru D/Y zamezí vstupu třetí harmonické; připojení filtrů, které mohou odvádět konkrétní zvýšenou harmonickou. [5]

3. Vlivy provozu FVE na kvalitu a charakteristiky napětí

Připojená elektrárna při výrobě dodává do sítě výkon, kterým může ovlivnit parametry napětí v místě připojení. Nejvýraznějším vlivem může být např. změna odchylek napětí při různém dodávaném výkonu.

3.1 Hodnocení celkového provozu FVE v ČR za rok

Od roku 2010 až do současnosti v české republice činí celkový instalovaný výkon ve FVE dva tisíce MW. Tato hodnota se meziročně měnila maximálně o několik desítek MW, takže ji lze považovat za konstantní po dobu deseti let. K prosinci 2019 byla hodnota instalovaného výkonu 2044,3 MW. Celkový instalovaný výkon v ES ČR je 22MW a FVE v české republice tvoří 9 % z celkového instalovaného výkonu. Jedná se o třetí největší zastoupení. [7]



Obrázek 1 : Podíl instalovaného výkonu v ES ČR [7]

Tabulka 2: instalovaný výkon v ES [7]

Jaderné	4290,0	20%
Parní	10729,9	49%
Paroplynové	1363,5	6%
Plynové a spalovací	935,5	4%
Vodní	1091,8	5%
Přečerpávací	1171,5	5%
Větrné	339,4	2%
Fotovoltaické	2044,3	9%

Vzhledem poměrně vysokému zastoupení instalovaného výkonu je podíl na výrobě znatelně nižší i přesto, že FVE patří mezi OZE, ze kterých je upřednostňován odběr energie. Za rok 2018 celkového počtu vyrobené energie 88 000 GWh, FVE přispěli do výroby 2 339,7 GWh. Naproti 9 % instalovaného výkonu tvoří podíl na výrobě jen necelé 3 %. [7]

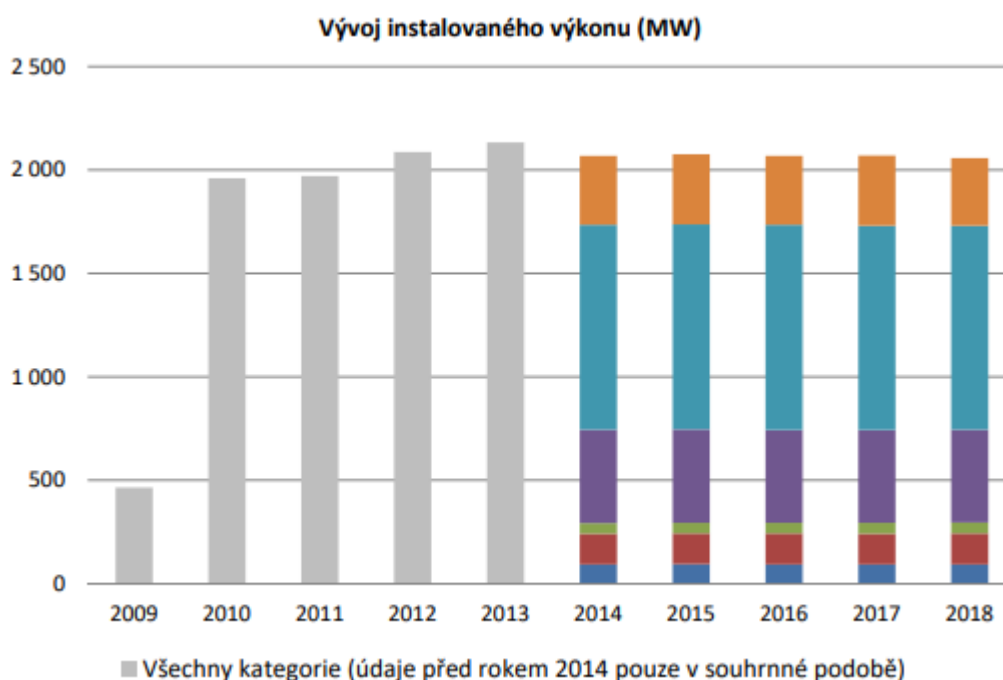
Za podmínky, že by FVE vyráběly energii po celou dobu při plné kapacitě instalovaného výkonu mohli by za rok vyrobit okolo 17 500 GWh energie. Tato energie by stačila k pokrytí téměř 30 % spotřebované energie v ČR za jeden rok.

	Celkový instalovaný výkon [MW _e]	Výroba elektřiny brutto [MWh]	Technologická vlastní spotřeba elektřiny na výrobu elektřiny [MWh]	Výroba elektřiny netto [MWh]	Dodávka elektřiny do ES [MWh]
Fotovoltaické elektrárny (FVE) ¹⁾	2 056,8	2 339 677,4	20 939,6	2 318 737,9	2 168 981,1
do 10 kW včetně	94,5	99 322,8	64,2	99 258,6	66 074,0
nad 10 do 30 kW včetně	148,7	151 135,6	149,3	150 986,3	93 770,8
nad 30 kW do 100 kW včetně	52,9	54 616,0	207,9	54 408,2	42 562,5
nad 100 kW do 1 MW včetně	448,4	506 030,5	4 757,5	501 273,0	468 276,9
nad 1 do 5 MW včetně	986,7	1 137 089,2	10 079,7	1 127 009,5	1 116 831,4
nad 5 MW	325,6	391 483,4	5 681,0	385 802,3	381 465,6

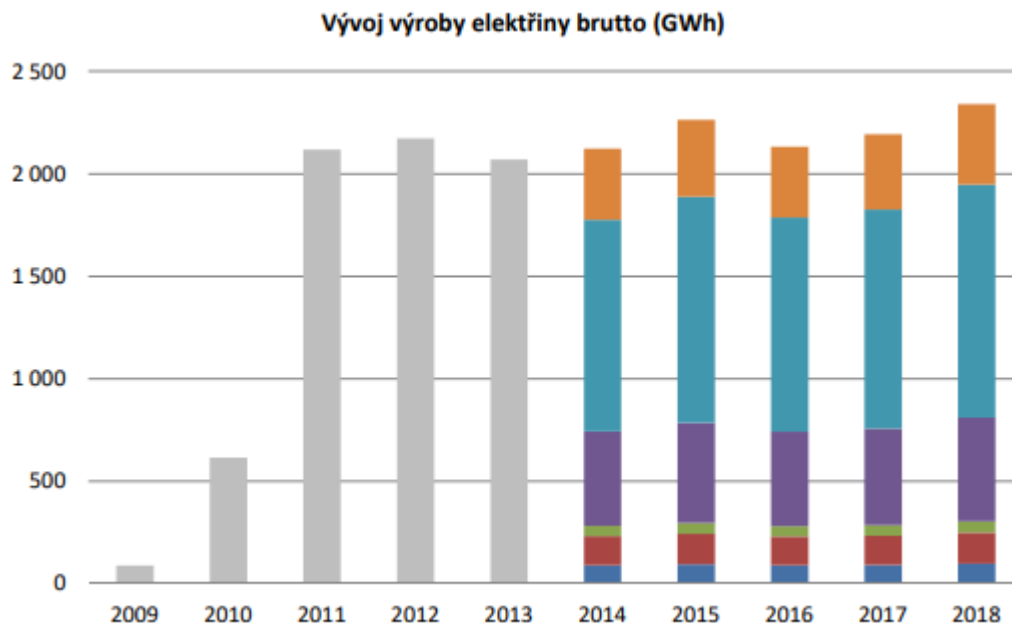
¹⁾ členěno do kategorií dle instalovaného výkonu provozovny

zdroj dat: OTE, a.s.

Obrázek 2: Členění FVE dle instalovaných výkonů [7]



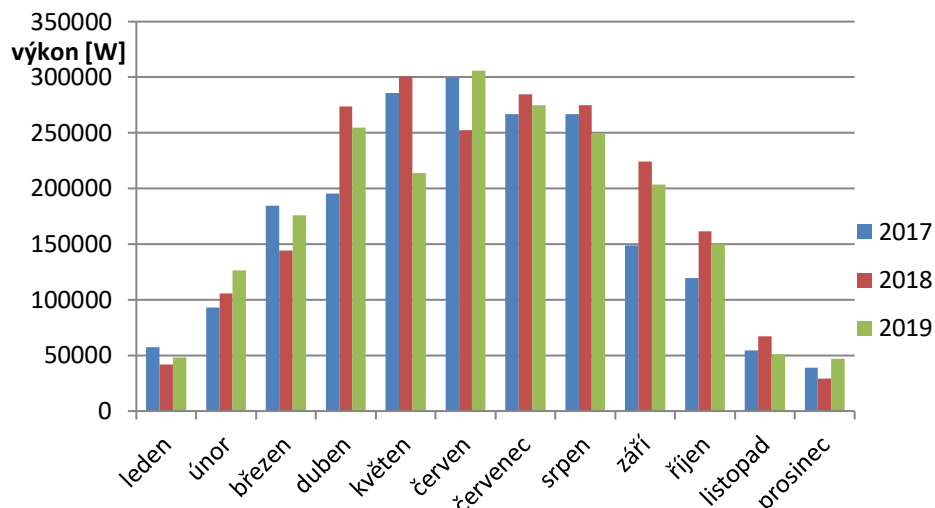
Obrázek 3 : Instalovaný výkon FVE v ČR [7]



Obrázek 4: Skutečná výroba FVE [7]

3.2 Dodávka elektřiny do ES v průběhu roku

Relativně nízký podíl elektřiny vyrobené FVE je dán hlavně nepravidelným dodáváním do sítě, protože výroba je silně závislá na spoustě okolních vlivů. FVE je schopna vyrábět jen při dostatečném denním slunečním osvětlení, ale podíl na účinnosti má také umístění a správná orientace jednotlivých panelů, okolní teplota elektrárny, doba slunečního svitu a často měnící se oblačnost.



Graf 1 : Dodávka elektřiny z FVE do ES v průběhu roku [7][8][9]

Z dostupných dat energetického regulačního úřadu (ERU) je v grafu znázorněno, jak probíhala dodávka spotřeby do sítě v letech 2017 – 2019. Z grafu je jednoznačně vidět téměř totožný každoroční vývoj dodávky pro jednotlivé měsíce. S výjimkou září 2017, června 2018 a května 2019, kdy byla dodávka výrazněji nižší než ve stejném měsíci v ostatních letech.

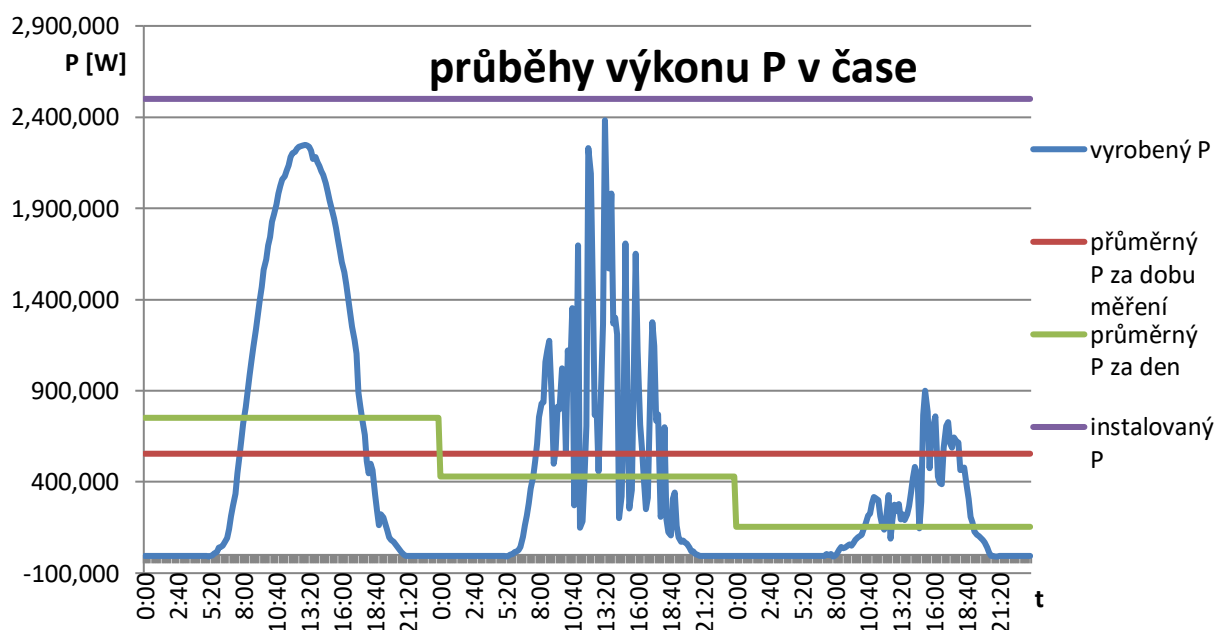
Největší výroba energie dosahuje hodnot okolo 300 000 MWh za měsíc. V 5 až 6 měsících se každoročně hodnoty pohybují přes 200 tisíc MWh. Naopak od listopadu do ledna FVE přispívají k výrobě velmi zřídka hodnotou okolo 50 tisíc MWh. Graf také ukazuje velice zajímavý údaj, kdy k největší výrobě nedochází v nejteplejších letních měsících (červenec, srpen), ale k nejvyšší výrobě dochází pravidelně v květnu a červnu, kdy se průměrná venkovní teplota za měsíc pohybuje níž než například v červenci. Panel je v květnu dobře chlazen okolním ovzduším a nedochází k přehřívání, tím je jeho účinnost vyšší a zároveň je v květnu už je dostatečná intenzita přímého slunečního záření.

3.3 Kolísání výroby a závislost na osvětlení

Graf je zpracovaný naměřených hodnot pro vyhodnocení ve FVE Blatná a jsou v něm znázorněny tři možné a velmi odlišné průběhy kolísání dodávaného výkonu do ES v průběhu dne. Na FVE Blatná probíhalo měření 13.6. – 3.7. 2017. Tři graficky znázorněné průběhy, které jsou od sebe velmi odlišné, jsou naměřeny v rozmezí pouze v osmi dnech. A názorně z nich vyplývá nestálost a závislost denních teplot, osvětlení a podnebí.

denní průběhy:

1. „téměř ideální“ - 24.6. naměřen první průběh v grafu - dodávání energie do ES probíhá od ranního východu až po večerní západ slunce. Bez kolísání (oblačnosti) se stálým nárůstem do 13:00h, kdy hodnota dosahuje denního maxima 2,25 MW z 2,5 MW možného výkonu. O kvalitě vypovídá číselný fakt, kdy průměrný výkon 751 MW za den byl nadprůměrným výkonem za 20ti denní měření. Denní průměr odpovídá 30% instalovaného výkonu.
2. „kolísavý/proměnný“ - 1.7. naměřen druhý průběh v grafu- dodávání energie do ES probíhá v celé šíři jako ideální, ale s tím rozdílem, že v průběhu celého dne docházelo ke střídání oblačností a ke změně osvětlení FVE, proto i hodnoty dodávané energie se v čase velmi skokově měnily. I když ve 13:20h bylo dosaženo výkonu 2,382MW dosahoval průměrný výkon dne 0,428 MW. Celý den docházelo ke kolísání a průběh P se často dostával i pod 0,4 MW. Denní průměr odpovídá 17% instalovaného výkonu.
3. „velmi nepříznivý výrobě“– 29.6. naměřen třetí průběh v grafu- dodávání energie do ES probíhalo v dopoledních hodinách maximálně do 0,3 MW, odpoledne byl P v okolí 0,5 MW. Poslední den odpovídá velmi slabému dodávání energie s průměrným P 0,154 MW. Denní průměr odpovídá 6% instalovaného výkonu.



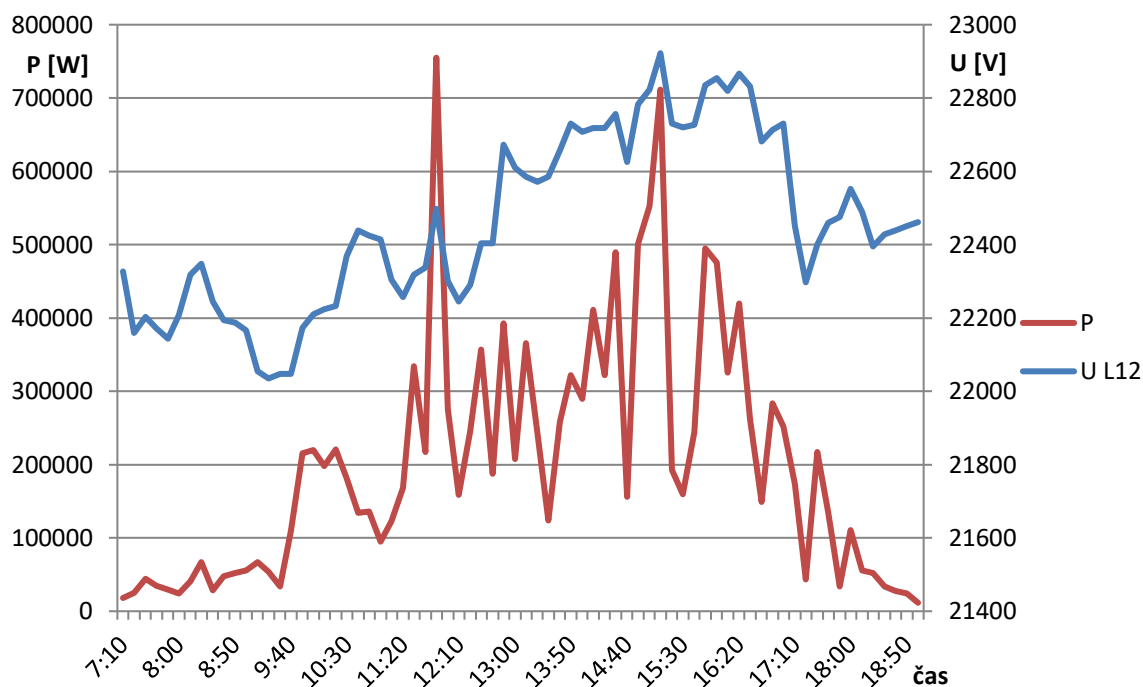
Graf 2 : Denní průběh odsvícení, závislost výkonu

3.4 Vliv kolísání výroby na odchylky napětí

V místě připojení FVE, kde dochází k přispívání energie do sítě, může docházet k ovlivňování parametrů napětí v závislosti na dodávaném výkonu. Pokud ve FVE dochází k výrazným skokovým změnám dodávky energie, může to také skokově poznamenat velikost napětí nebo flikru to velmi negativně. Velkou roli na míře ovlivnitelnosti sítě má tvrdost sítě v místě připojení. Tvrdost sítě je daná velikostí impedance sítě v místě připojení. Tvrdá síť má malou impedanci a měkká síť má velkou impedanci. Zpětné vlivy na síť, v místě připojení, nemusí mít jen FVE, ale také mnoho dalších odběratelů v okolí. Znatelné ovlivňování kvality napětí může také způsobovat např. okolní průmysl – časté nebo nekontrolované rozběhy některých strojů s velkým odběrem. Aby nedocházelo k velkému ovlivňování sítě, je důležité, aby síť byla co nejtvrdší.

V následujícím grafu je zaznamenán průběh napětí a výkonu při měření v místě připojení FVE České Velenice Renpower. Vyobrazený je denní průběh dne 6.4.2017. Dodávaná energie do sítě měla po celý den kolísavý průběh. Mírná závislost je vidět v průběhu celého dne a došlo zde také k ukázkové situaci ve 12 a 15hod, kdy výrazně povyskočila úroveň dodávané energie do sítě a to se odrazilo na okamžitým zvýšení velikosti napětí v síti. Přesto že zde lze tyto závislosti velmi jasně prokázat, je naměřená velikost napětí v pořádku. V první špičce došloběhem desetiminutového intervalu k rapidnímu nárůstu dodaného výkonu až o trojnásobné zvýšení, ale na napětí se to projevilo zvýšením jen o 161 V a nedošlo k žádnému překročení limitních hodnot pro napětí. Závislost napětí na výkonu není jen ve špičkách, ale je znatelná v celém rozsahu grafu a lze ji podložit koeficientem kolerace, který je pro tuto závislost 0,658.

To znamená, že dochází k ovlivnění napětí výkonem po 65,8 % času. Zkratový výkon v místě připojení je 30,5 MVA.



Graf 3: Závislost činného výkonu FVE na hladinu napětí v místě připojení

4. Vyhodnocení naměřených dat v místě připojení FVE

Deset jednotlivých měření FVE probíhalo v období měsíců března až července. Toto období zahrnuje měsíce, kdy se dá očekávat nejvyšší výtěžnost energie z FVE. Účinnost v těchto měsících dosahuje vyšších hodnot a to by se mělo projevit nadprůměrnou dodávkou energie do sítě, než ve zbylé části roku.

Vlivem neustálého zatěžování sítě zpětnými vlivy dochází ovlivňování parametrů napětí v síti. Z naměřených dat v místě připojení FVE, je třeba ověřit, zda nedochází k velké deformaci parametrů právě vlivem připojení elektrárny. V těchto měsících, při vyšším dodávaném výkonu, může být ovlivnění citlivější. Případné ovlivnění kvality by se promítlo výrazněji v naměřených hodnotách.

4.1 Vyhodnocení využití instalovaného výkonu

Všechny měřené FVE jsou připojeny na hladině VN 22 kV. Instalované výkony FVE se pohybuje od 750 do 2500 kW. Největší zastoupení (6) mají elektrárny s výkonem 1 000 – 2 000 kW, jedna FVE má kapacitu 750 kW a tři elektrárny jsou s výkonem vyšším než 2000 kW.

První uvedená tabulka shrnuje a porovnává výkony elektráren. U každé elektrárny můžeme porovnat dosažení maximálního výkonu s instalovaným výkonem. U třech elektráren (Volary I, Nová Včelnice a Blatná) se maximální výkon dostal nad hodnotu 95 %. Čtyři elektrárny zaznamenaly maximální výkon 81 – 86 % a tři elektrárny využili maximální výkon těsně pod hranici 75 % instalovaného.

Tabulka 3: Porovnání výkonů pro jednotlivé FVE

FVE	Instalovaný výkon (kW)	maximální výkon (kW)	Maximální / instalovaný výkon (%)	Průměrný dodávaný výkon(kW)	Zkratový výkon v místě připojení (MVA)
České Velenice Solar	1424	1067,90	74,99%	136,39	29,7
České Velenice RenPower	1240	912,13	73,56%	127,46	30,5
Stráž nad Nežárkou	2380	1780,75	74,82%	238,57	32,7
Volary I	1400	1336,44	95,46%	198,77	46
Kamenice nad Lipou	1350	1123,60	83,23%	282,06	48,2
Nová Včelnice	2500	2385,15	95,41%	291,47	49
Krašovice	750	611,45	81,53%	148,48	55
Blatná	2500	2382,80	95,31%	554,86	60,2
Podolí	1400	1200,07	85,72%	247,03	95,8
Komorovice	2350	1965,13	83,62%	409,23	126,4

Porovnání výtěžnosti v následující tabulce udává procentuální plnění instalovaného výkonu po dobu měření. V těchto příznivějších měsících výrobě můžeme očekávat nadprůměrnou výtěžnost oproti celoročnímu průměru. Ze statistik ERU, ze zpráv o provozu ES, jsem došel k závěru, že průměrná roční výtěžnost za posledních 5 let, se u FVE pohybuje v blízkosti 11 až 12 %. [7]

Výtěžnost vyšší než 12 % byla u šesti měřených elektráren. U poloviny elektráren (5) s výtěžností 15 % a více můžeme potvrdit, že se pravděpodobně projevilo období, ve kterém bylo měření provedeno. Dodávka energie byla vyšší oproti celorepublikovému průměru z průběhu celého roku.

Druhou polovinu elektráren, kde výtěžnost nedosáhla na 15 %, spojuje fakt, že byli měřeni v dubnu. Jak je uvedeno v kapitole 3.2, v dubnu 2017 byla výrazně nižší i celorepubliková výroba energie z FVE oproti rokům 2018 a 2019. Za nižší výtěžností těchto elektráren stojí vliv méně příznivého počasí. Dokazuje to velmi silnou závislost výroby elektrické energie FVE na počasí.

Data českého hydrometeorologického ukazují, že tento měsíc byl nadprůměrně srážkový a také teploty dosahovali průměrně nižších hodnot než v několika předchozích letech. [10]

výtěžnost:

pod 10 % - České Velenice Solar

10 – 15 % - České Velenice RenPower, Stráž nad Nežárkou, Volary I, Nová Včelnice

15 - 20 % - Krašovice, Podolí, Komorovice

20 a více % - Kamenice nad Lipou, Blatná

Tabulka 4: Vyhodnocení výtěžnosti a dodané energie pro jednotlivé FVE

FVE	Instalovaný výkon (kW)	Průměrný dodávaný výkon(kW)	Výtěžnost za dobu měření (%)	Celková dodaná energie (MWh)	doba měření (hodiny)	Termín měření
České Velenice Solar	1424	136,39	9,58	49,9	366	11. - 26.4.
České Velenice RenPower	1240	127,46	10,28	24,0	188	3. - 11.4.
Stráž nad Nežárkou	2380	238,57	10,02	86,0	360	11. - 26.4.
Volary I	1400	198,77	14,20	91,1	458	31.3. - 19.4.
Kamenice nad Lipou	1350	282,06	20,89	67,2	238	24.3. - 3.4.
Nová Včelnice	2500	291,47	11,66	104,8	360	11. - 26.4.
Krašovice	750	148,48	19,80	49,9	336	16. - 30.5.
Blatná	2500	554,86	22,19	261,5	471	13.6. - 3.7.
Podolí	1400	247,03	17,65	94,6	383	27.6. - 13.7.
Komorovice	2350	409,23	17,41	156,7	383	27.6. - 13.7.

Výpočet výtěžnosti:

1. Suma energií vyrobených za 10min

$$P_p = \frac{\sum P_s}{n} [kW]$$

P_p - suma energií za 10min ; P_s - naměřené střední hodnoty výkonu v intervalu 10 min ; n- počet měření

2. celková energie za dobu měření

$$E_m = \sum P_{pi} \cdot t_i [kWh]$$

E_m - vyrobená energie za dobu měření ; t- doba měření

3. teoretická energie (kdyby elektrárna vyráběla po celou dobu o velikosti instalovaného výkonu)

$$E_{te} = P_{inst} \cdot t [kWh]$$

E_{te} -teoretická energie při P_{inst} ; P_{inst} – instalovaný výkon

4. výtěžnost

$$a = \frac{E_m}{E_{te}} [\%]$$

a - výtěžnost

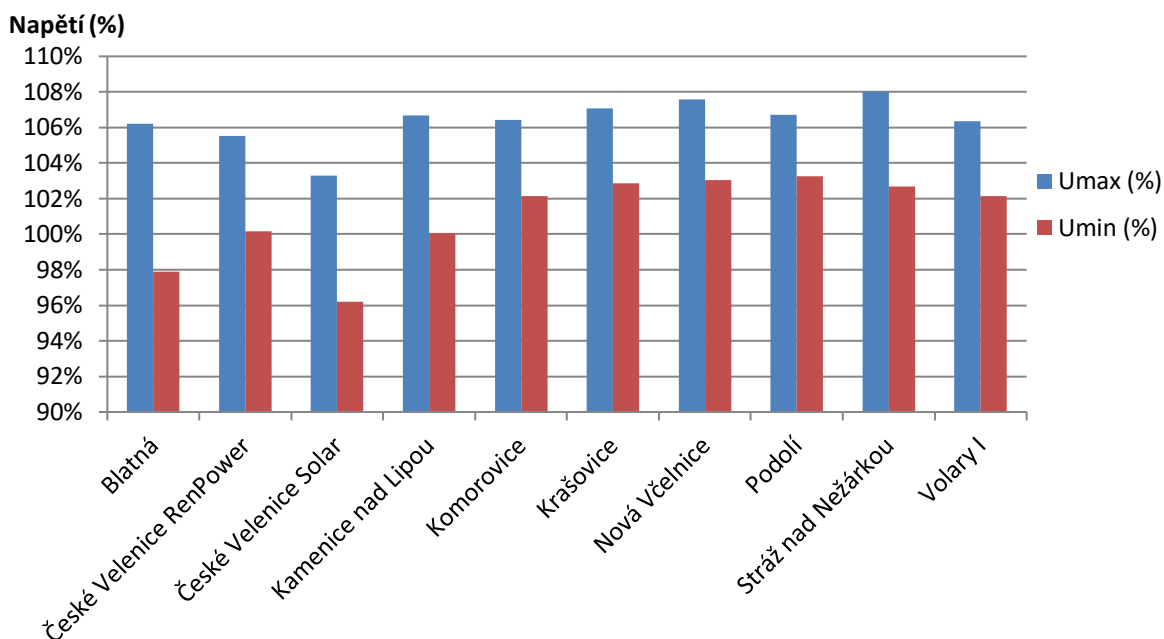
4.2 Odchytky napětí

Odchytky napětí v DS ČR jsou definovány normou ČSN EN 50160. Pro měřené hladiny 22 kV dovolují kolísání U_n nejvýše o 10 % po 99 % času a všechny měřené hodnoty musí být v toleranci 85 – 115 % U_n . Z toho vyplývá, že naměřené hodnoty napětí v DS budou v rozsahu 19,8 kV až 24,2 kV a 1 % měřených efektivních hodnot může zakolísání dolu na 18,7 kV a nahoru na 25,3 kV.

Naměřené maxima a minima v grafu dokazují, že většina naměřených hodnot, i těch minimálních, se pohybuje nad hranicí 100% U_n . Pod U_n se pohybují jen naměřená minima FVE Blatná a České Velenice Solar.

Největší rozpětí hodnot mezi minimem a maximem bylo naměřeno u FVE Blatná, rozdíl byl více než 8% U_n . Rozpětí hodnot 7% bylo naměřeno u FVE České Velenice Solar a 6 % u Kamenice nad Lipou.

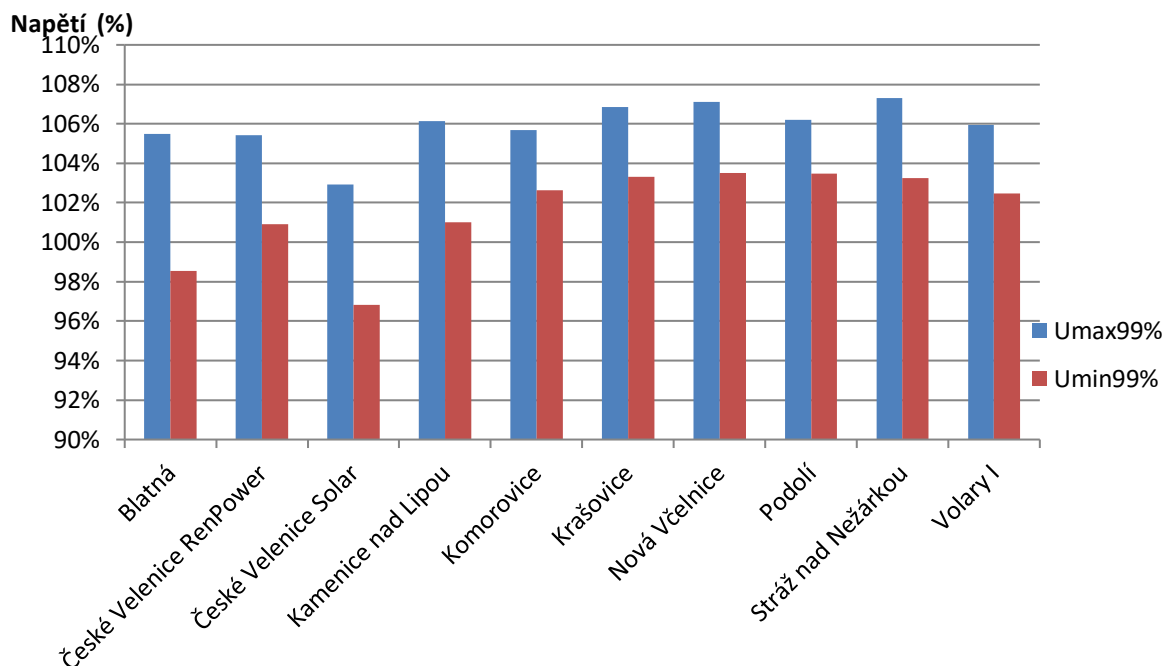
Nejvyšší napětí bylo naměřeno u FVE Stráž nad Nežárkou 108 % U_n naopak nejnižší naměřená hodnota byla 96,1 % u FVE České Velenice Solar. Z těchto hodnot měření vyplývá, že kolísání napětí bylo na všech FVE do + - 10 % U_n , tj. v souladu s ČSN EN50160



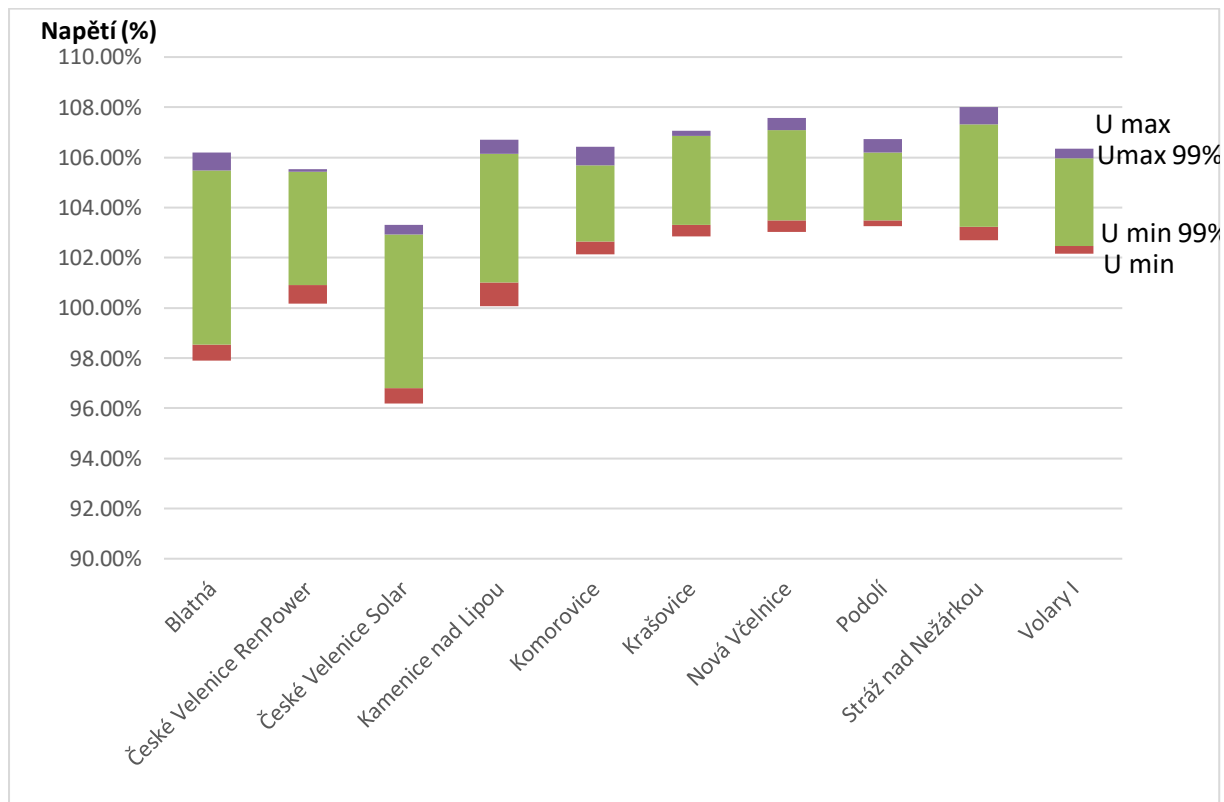
Graf 4: Vyhodnocení odchylek napájecího napětí pro FVE (absolutní minima a maxima)

U prvních čtyř elektráren v předchozím i následujícím grafu je vidět výraznější rozdíl. Rozdíl napětí znatelný i pro percentil 99 % ukazuje, že kolísání netrvalo jen krátce. Vliv na kolísání těchto hodnot může mít tvrdost sítě. Pokud se podíváme zpět do tabulky v kapitole 4.1, můžeme vidět, že velikost zkratového výkonu v místě připojení těchto čtyř elektráren patří mezi pět nejměkčích sítí. U FVE s vyšším zkratovým výkonem v místě připojení docházelo k menšímu kolísání napětí.

Vyhodnocení hodnot s percentilem 99 % má odhalit případné zakolísání nebo „uskočení“ maxima či minima, které by trvalo jen po krátkou dobu. Situace je zde velmi podobná jako u předchozího grafu. Tento graf ukazuje snížení maximálního rozptylu hodnot z 8,3 na 6,95 % u FVE Blatná a rozptyl je zde stále největší.



Graf 5: Vyhodnocení odchylek napájecího napětí pro FVE (99% percentily)



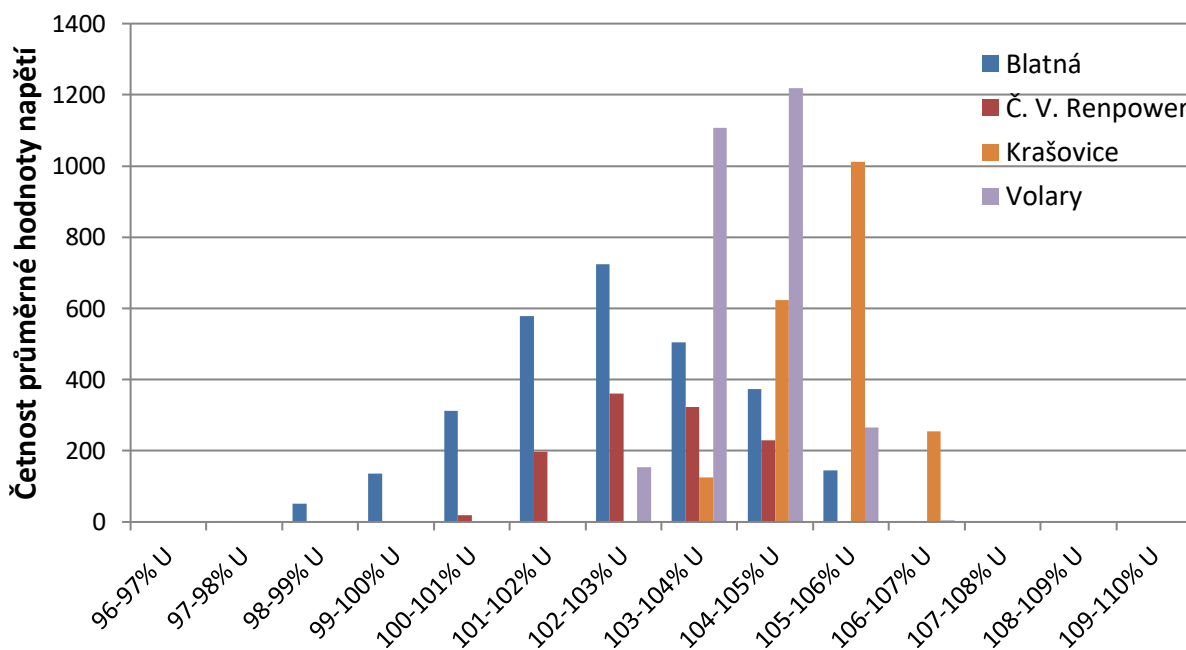
Graf 6: Vyhodnocení odchylek a percentilů napájecího napětí FVE

Třetí graf vyhodnocení odchylek napětí, jako sloučení dvou předchozích, graficky znázorňuje rozdíl a šíři zastoupení hodnot U (min, max) pro percentily 100 a 99. U druhé elektrárny je vidět, že kolísání kU_{max} probíhalo poměrně často a proto rozdíl U_{max} a $U_{max} 99$ je velmi malý. Naopak u FVE Blatná se četnost naměřených hodnot pohybovala méně často k U_{max} i k U_{min} a jsou zde znatelnější rozdíly pro percentily 99 a 100.

Následující graf dokumentuje četnost průměrných hodnot napětí pro vybrané elektrárny a ukazuje procentuální rozložení naměřených hodnot napětí. Z deseti měřených elektráren byla největší četnost na hodnotách 103 – 105 % U_n . Tuto četnost v grafu dokazují vybrané elektrárny Krašovice a Volary.

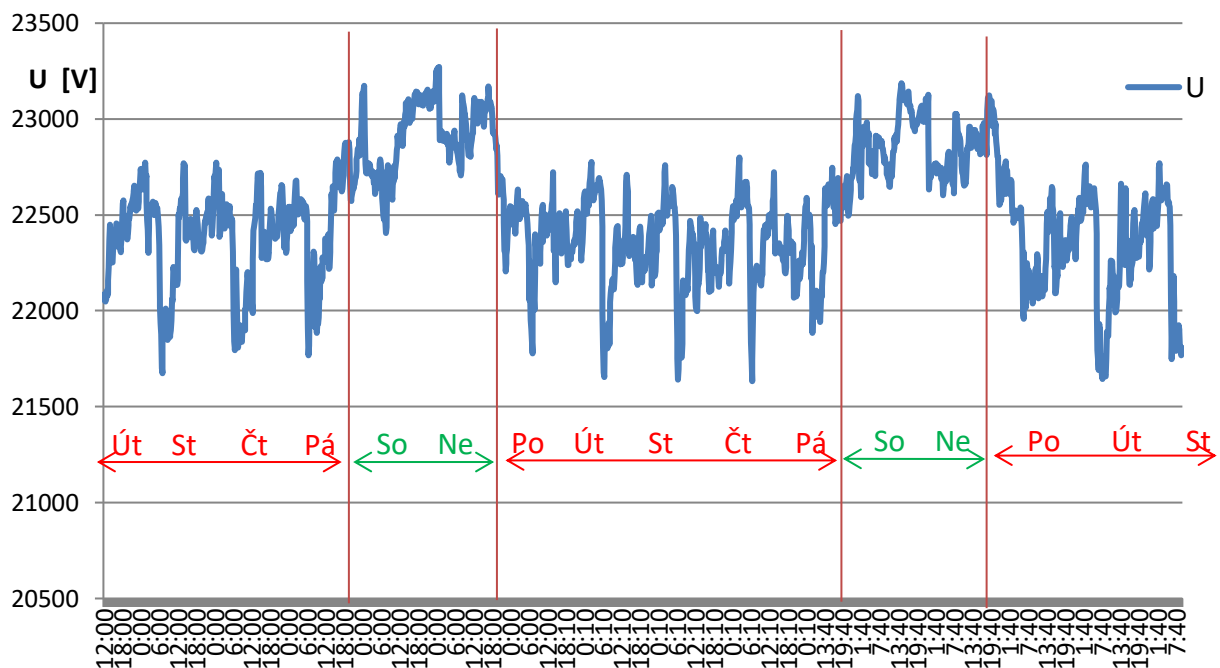
V naměřených hodnotách na elektrárně Volary bylo naměřeno téměř 85% hodnot na velikosti napětí 103 a 104 % U_n . Tato statistika poukazuje na tvrdost sítě, proto docházelo k potlačení rušivých vlivů okolí.

Opakem je FVE Blatná největší četnost hodnot je sice uprostřed rozpětí naměřených U_n , ale rozpětí velikostí napětí je velmi široké od 97 do 106 % U_n . Napětí je v souladu s legislativou, ale elektrizační soustava se v místě připojení nechová jako tak tvrdá oproti ostatním FVE. Dochází zde ke kolísání napětí v širším pásmu hodnot.



Graf 7: Porovnání četnosti průměrných hodnot napětí v % pro jednotlivé FVE

Na vinu širšího pásma hodnot může mít pravděpodobně velký vliv nějaký okolní průmysl, protože po bližším zkoumání jsem došel k závěru, že průměrné hodnoty jsou pravidelně rozdílné ve všední dny a o víkendech. Ve všední dny průměrná hodnota napětí byla 22 376 V a o víkendu 22 905 V. Rozdíl těchto dvou průměrů je 529 V, který není zanedbatelný a dokládá fakt rozložení napětí do širokého pásma hodnot. Také stojí za povšimnutí pravidelný pokles napětí každý všední den po šesté hodině ranní, v čase kdy FVE téměř nedodává energii a má v tento čas minimální vliv na negativní parametry napětí. Průběh napětí z měření je zobrazen v následujícím grafu od úterý 13.6. do středy 28.6.2017.



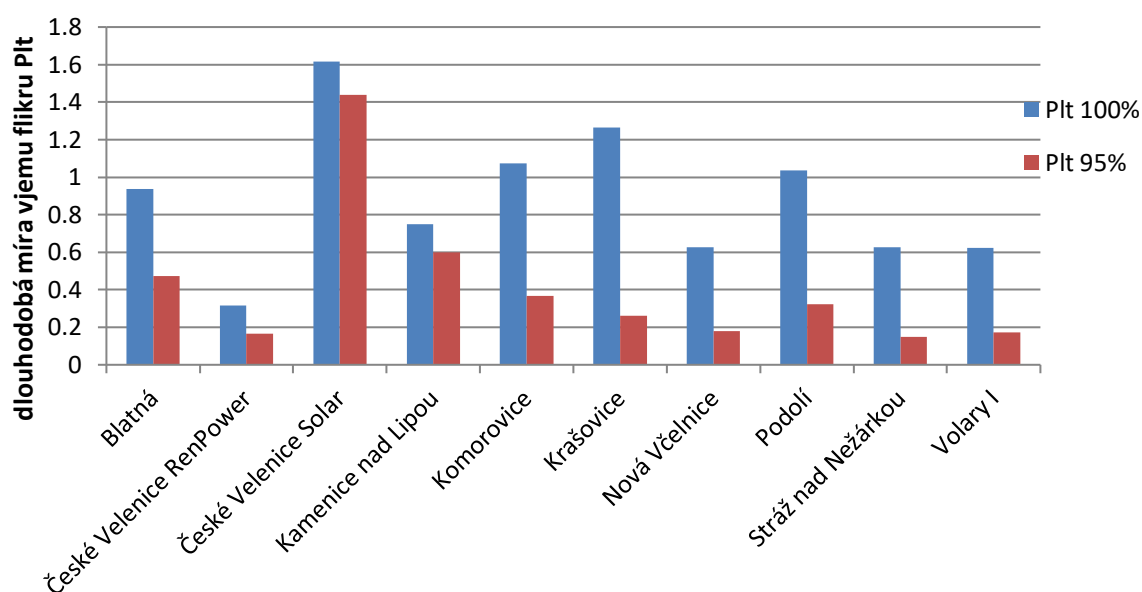
Graf 8: Průběh napětí FVE Blatná za dobu měření

4.3 Kolísání napětí – míra vjemu flikru

Míra vjemu flikru (P_{fl}) má být v místě připojení pod hodnotou 1 po 95 % času, to bylo splněno u devíti FVE. Omezení flikru pro 100 % času není v normě definováno, takže hodnoty maximálně v 5 % z doby měření mohou klidně vzrůst do velmi vysokých hodnot. Flikr o větší velikosti než 1 byl naměřen u čtyř elektráren. U tří z nich se jednalo velmi krátké zakolísání, 95 % hodnot bylo v plném souladu s normou a nedošlo k žádnému porušení.

Nejvyšší hodnota u těchto tří elektráren byla 1,26, takže se ani nejednalo o tak velké překročení.

Problém vyšších hodnot flikru i pro více než 95 % hodnot byl naměřen u FVE České Velenice Solar, kde P_{It} 95 % je na úrovni flikru 1,438. Limitní hranice byla překročena ve více než 70 % naměřených hodnot a to je velice nevyhovující legislativě. P_{It} 95 % u zbylých elektráren dosáhl maximální hodnoty 0,599 v místě připojení FVE Kamenice nad Lipou.



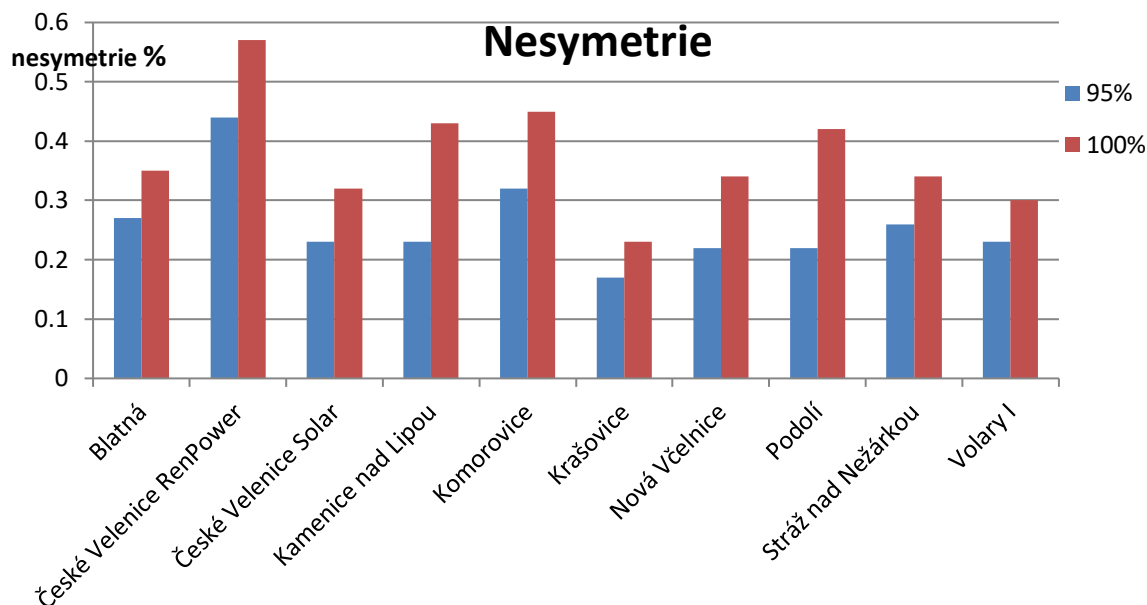
Graf 9: Vyhodnocení dlouhodobé míry vjemu flikru pro jednotlivé FVE

4.4 Nesymetrie napětí

Jedná se o nerovnoměrné zatěžování sítě. Nesymetrie napětí v síti je definována podobně jako flikr. Nemá omezení pro celou dobu měření, ale po 95 % času musí být v rozsahu 0 až 2 % v desetiminutových intervalech měření.

U měřených elektráren byli v toleranci hodnoty nesymetrie pro všechny měření po 100 % času. Nejvyšší hodnota nesymetrie byla naměřena 0,57 u FVE Velenice RenPower, ostatní maxima nepřekročila ani hranici 0,5 %.

Nejnižší hodnoty nesymetrie byli u elektrárny s nejnižším instalovaným výkonem FVE Krašovice po celou dobu měření se pohybovali nejvýše okolo hranice 0,2 a pro 95 % času byla nejvyšší hodnota 0,17.



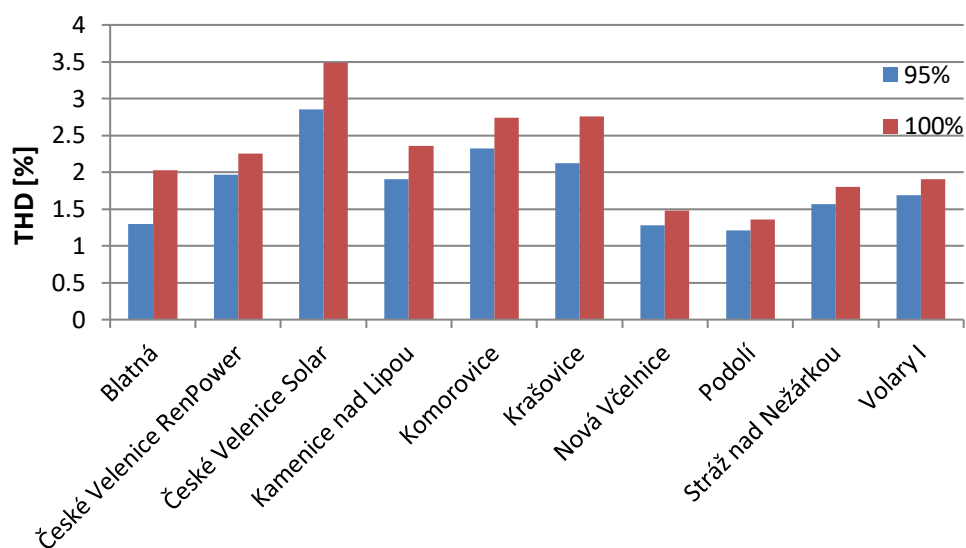
Graf 10: Vyhodnocení nesymetrie pro jednotlivé FVE

4.5 Deformace křivky napětí

Liché harmonické, které nejsou násobkem 3, přispívají největší mírou deformace do velikosti a tvaru sinusovky napětí v síti a mají velký dopad na negativní účinky ztrát v síti, ovlivnění činnosti HDO nebo třeba ovlivnění životnosti celé elektrizační soustavy včetně připojených zařízení. [5]

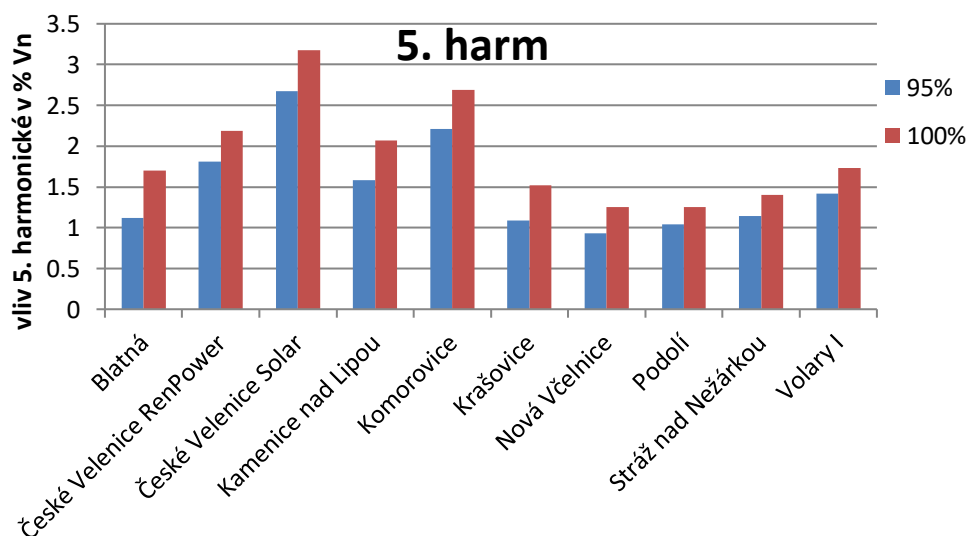
Nejvyšší naměřené hodnoty celkového harmonického zkreslení se u měřených elektráren pohybovali od 1,36 (Podolí) do 3,49 (Č.V. Solar). Na měřených hladinách 22 kV je limitní hodnota pro THD 8 %. Nejvýraznější hodnota byla naměřena stejně jako pro flickr u Č.V. Solar, ale velikost THD se nedostala ani na polovinu limitní hodnoty. I v tomto případě lze tvrdit, že na vině je pravděpodobně nižší zkratový výkon než v ostatních místech připojení. Toto tvrzení nemůžeme uvádět jako jediný faktor, protože druhé nejvyšší zkreslení bylo naměřeno u FVE Krašovice (2,76 %), kde je zkratový výkon výrazně nejvyšší ze všech měřených elektráren.

S percentilem 95 % si nejlépe stojí Blatná, Nová Včelnice a Podolí, kde se celkové zkreslení pohybuje do hodnoty 1,5 %.



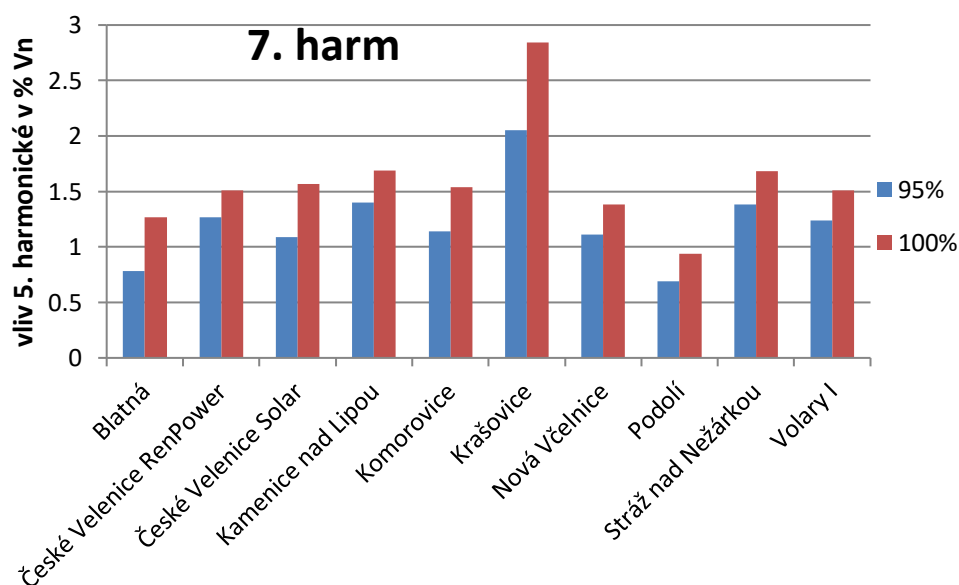
Graf 11: Celkové harmonické zkreslení THD pro jednotlivé elektrárny

Při zaměření na 5. Harmonickou vidíme, že nejvyšších hodnot dosahuje FVE České Velenice Solar stejně jako u flikru. Vliv 5. harmonické dosahuje i přes 3 % a s percentilem 95 je na hodnotě 2,67. Na rozdíl od flikru vliv této harmonické nepřesahuje limitních 6 %.



Graf 12: Vyhodnocení vlivu 5. Harmonické pro jednotlivé FVE

Přispívání 7. harmonické do velikosti napětí probíhá ve většině měřených míst připojení téměř stejně v rozmezí 1 – 1,5 %. V Podolí a Blatné byla harmonická potlačena i pod hodnotu jedna. K pravidelnému vyššímu ovlivnění napětí sedmou harmonickou došlo v Krašovicích, kde hodnoty vystoupali až na 2,84 z povolených 5 %.



Graf 13: Vyhodnocení vlivu 7. harmonické pro jednotlivé FVE

5. Vliv provozu FVE na klíčové parametry

V okolí místa připojení FVE je mnoho uživatelů (odběratelů i dodavatelů) ES, každý z nich má podíl na deformaci parametrů napětí vlivem svého užívání. Z naměřených dat je třeba odlišit, jak ovlivnili chod sítě elektrárny a jak jiní uživatelé v době měření.

5.1 Vliv výkonu na velikosti napětí

Abych mohl potvrdit přímou a největší závislost dodávaného výkonu na okolní síť, tak při maximálním dodávaném výkonu by hodnota napětí musela být největší a při minimálním nebo nulovém výkonu by napětí mělo klesat k nejnižším hodnotám.

Jak je z grafu na první pohled patrné, některé hodnoty napětí jsou při maximálním dodávaném výkonu nižší, než při minimálním výkonu. U těchto elektráren můžeme s největší pravděpodobností vyloučit přímou vazbu a znatelné ovlivnění velikosti napětí v závislosti na dodávaném výkonu. Jedná se o elektrárny s nižším instalovaným výkonem, jmenovitě:

České Velenice RenPower ($P_{inst} = 1240$; zkratový výkon 30,5 MVA),

České Velenice Solar ($P_{inst} = 1424$; zkratový výkon 29,7 MVA),

Krašovice ($P_{inst} = 750$; zkratový výkon 126,4 MVA),

Podolí ($P_{inst} = 1400$; zkratový výkon 49 MVA).

Šest dalších elektráren, kde napětí při maximálním výkonu byli vyšší než při minimálním dodávaném výkonu, by mohli na první pohled vykazovat jistou závislost. Ani u jedné z těchto elektráren nenastala situace, že by napětí při maximálním výkonu bylo stejné jako maximální napětí za celou dobu měření. V porovnání s hodnotami maximálního napětí s percentilem 99 za celou dobu měření je ale vidět, že pro FVE Stráž nad Nežárkou a Nová Včelnice dosahují hodnoty ke 107 % v obou případech. U těchto dvou elektráren se může jednat o závislost velikosti napětí na dodávaném výkonu. K této kapitole patří elektrárny:

Blatná ($P_{inst} = 2500$; zkratový výkon 48,5 MVA),

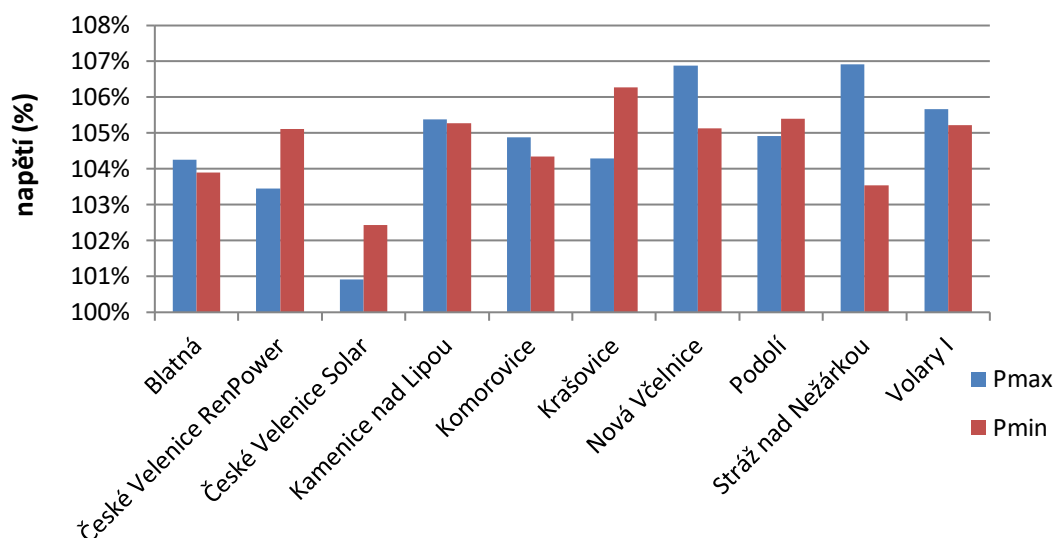
Kamenice nad Lipou ($P_{inst} = 1350$; zkratový výkon 46 MVA),

Komorovice ($P_{inst} = 2350$; zkratový výkon 95,8 MVA),

Nová Včelnice ($P_{inst} = 2500$; zkratový výkon 60,2 MVA),

Střáž nad Nežárkou ($P_{inst} = 2380$; zkratový výkon 55 MVA),

Volary I ($P_{inst} = 1400$; zkratový výkon 32,7 MVA).



Graf 14: Napětí při maximálním a minimálním činném výkonu

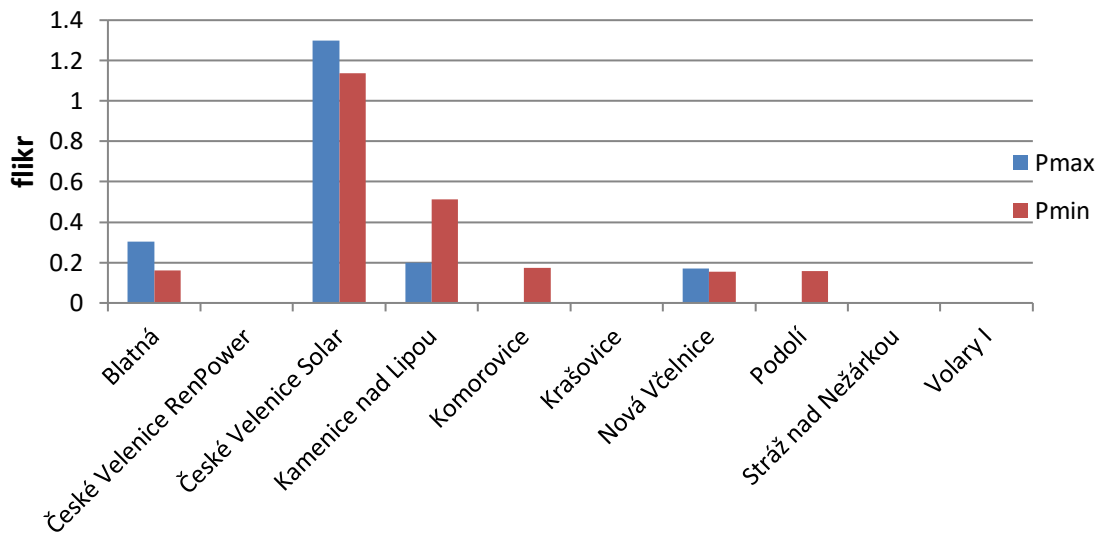
5.2. Vliv výkonu (max a min) na dlouhodobý flickr

Vliv flickru v krajních hodnotách výkonu jednotlivých elektráren ukazuje na fakt, že v porovnání flickru elektráren mezi sebou si stojí totožně jako při flickru všech měřených hodnot s percentilem 95 v kapitole 4.3.

FVE České Velenice Solar má stále největší flitr, přesahuje povolenou hodnotu 1 a to při maximálním i minimálním dodávaném výkonu. Jelikož k překračování dlouhodobého flickru docházelo u více než 70 % měřených hodnot, nelze jasně potvrdit přímou závislost na velikosti dodávaného výkonu, protože flickr dosahoval stálých hodnot po celou dobu měření a to i v době téměř konstantních výkonů.

U třech dalších elektráren, kde se vyskytoval flickr ve špičce Pmax, byl zanedbatelný. Při Pmin byla vyšší hodnota flickru (0,513) v Kamenici nad Lipou, blížila se k hodnotě flickru s percentilem 95 (0,599) pouze u této elektrárny můžeme uvažovat o závislosti velikosti výkonu na flickru.

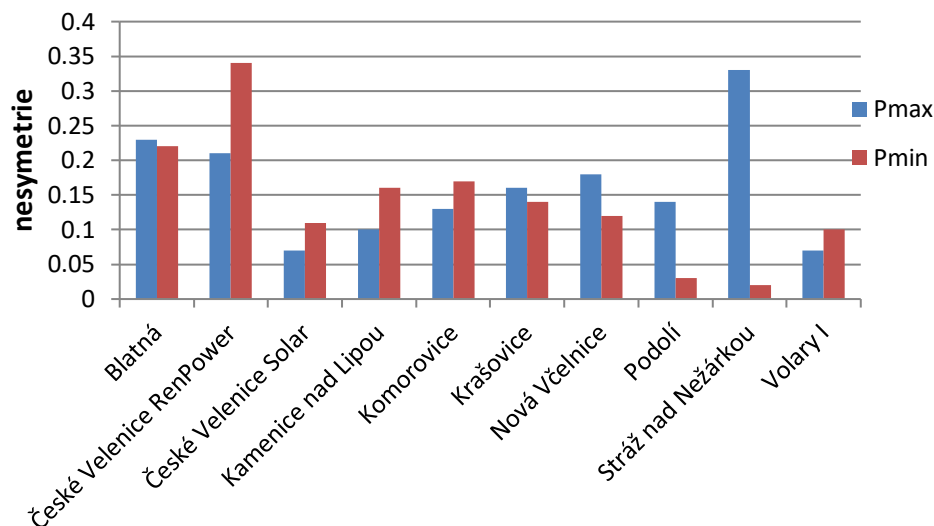
Pro ostatní elektrárny byl flickr v době špiček (max i min) výkonu nulový. Z toho lze soudit, že v těchto časech nedocházelo k náhlému a výraznému kolísání napětí a výkon neměl na flickr vliv.



Graf 15: Závislost flickru při Pmax a Pmin

5.3. Vliv výkonu (max a min) na nesymetrii

Vliv výkonu na napěťovou nesymetrii v grafu ukazuje na možnou závislost v FVE Stráž nad Nežárkou. Nejvyšší hodnota nesymetrie byla naměřena 0,34 a při P max dosahuje na 0,33. Hodnoty se liší o setinu procenta a závislost na výkonu je zde pravděpodobná. U ostatních elektráren jsou hodnoty nesymetrie při P max a min znatelně menší než maximální hodnoty po dobu měření a deformace symetrie v závislosti na výkonu se neprojevuje.



Graf 16: Závislost nesymetrie při Pmax a Pmin

6. Celkové vyhodnocení vzhledem k limitním hodnotám

V celkovém vyhodnocení je porovnání naměřených a zpracovaných dat vzhledem k limitním hodnotám daných normou ČSN EN 50 160.

Toto vyjádření nám může ukázat, na kterých místech je nebo není možné připojení dalšího zdroje energie, ať už by se jednalo o nový zdroj nebo zvýšení instalovaného výkonu stávajících elektráren. V místě, kde se naměřené hodnoty blíží maximálním limitním hodnotám, je velmi nutné uvážení, jaký dopad a ovlivnění by nastalo třeba v případě připojení nové elektrárny v okolí. Vzhledem k možným negativním vlivům na síť, by mohlo docházet k překročení limitních hodnot normy. To by vedlo k sankcím nebo by bylo nutné na dotčeném místě provést rekonstrukci sítě, tak aby došlo k navýšení její kapacity a provozní hodnoty by měli větší rezervu k limitním hodnotám.

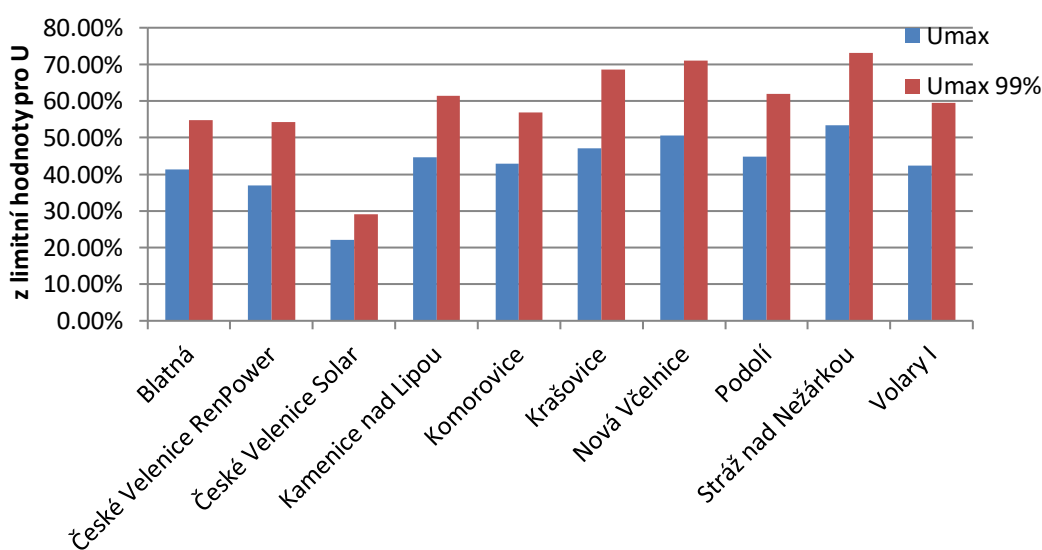
6.1 Procentuální vyjádření odchylek napětí vůči limitním hodnotám normy

Většina naměřených hodnot minimálního napětí v místě připojení FVE se pohybovala nad úrovní U_n , 22kV. Pod úrovní 22 kV byli naměřeny minimální hodnoty napětí jen u dvou míst připojení a to u FVE Blatná (97,86 % U_n) a Č.V. Solar (96,19 % U_n). Velikosti minimálních hodnot napětí s percentilem 99 % byly téměř totožné Blatná (98,54 % U_n) a Č.V. Solar (96,81 % U_n).

Pro vyhodnocení maximálního napětí byly údaje z hlediska četnosti zajímavější, než hodnoty minimální, vzhledem ke grafickému vyhodnocení. V následujícím grafu je vyjádřeno procentuální plnění maximálních odchylek vzhledem k limitním hodnotám normy. Pro U_{max} (pro 100 % hodnot) je normou povolená odchylka na hladině 22kV 15 % U_n . Plnění úrovně této hodnoty se u měřených elektráren pohybovalo od 22,1 do 53,4 %. Z toho plyne, že nejvyšší odchylka maximálního napětí se pohybovala mírně nad polovinou povolené hranice, nedošlo zde k žádnému překročení a naměřená U_{max} byla v toleranci s téměř poloviční rezervou velikosti odchylky u všech elektráren.

Pro hodnoty U_{max} s percentilem 99 % je normou povolená odchylka 10 % U_n . U devíti z deseti FVE byla tato odchylka plněna na více než 50 %. Nejblíže k překročení limitních hodnot normy bylo u FVE Nová Včelnice a Stráž nad Nežárkou.

Znatelně níže jsou obě maxima u FVE Č. V. Solar. Z pohledu plnění maximální odchylky se zde jeví jako nejpriznivější ke jmenovité hodnotě napětí 22kV.



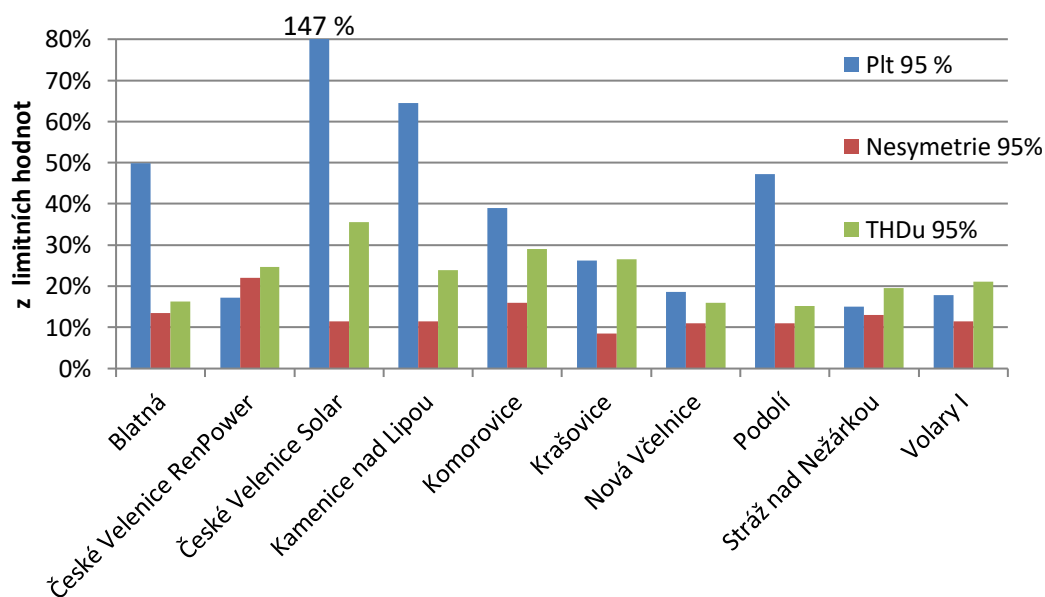
Graf 17: Procentuální vyjádření normy ČSN EN 50160 – odchylky maximálního napětí

6.2 Procentuální vyjádření flikru, nesymetrie a THDu vzhledem k limitním hodnotám

V této kapitole je shrnuto dosažení limitních hodnot normy pro dlouhodobý flikr, nesymetrii a THDu. Graficky je vše vyjádřeno v procentuálním vyjádření vzhledem k limitním hodnotám.

Velmi jasně je na první pohled vidět, že k procentuálnímu porušení normy má nejbližše flikr. Na čtyřech místech výrazně převyšuje plnění ostatních hodnot. Až na jeden případ, překročení limitů flikru, jsou i tyto všechny naměřené hodnoty v souladu s normou a nic nebrání dalšímu užívání a provozování bez žádných opatření.

Vliv THDu dosáhl nejvýše na 35 % a polovina měřených hodnot nedosahovala ani na velikost 20 % normou povolené hodnoty. Vliv nesymetrie pouze jednou překročil 20 % a ve většině případů se pohyboval okolo 10 % a procentuálně je nesymetrie v plnění normy na nejlepší úrovni.

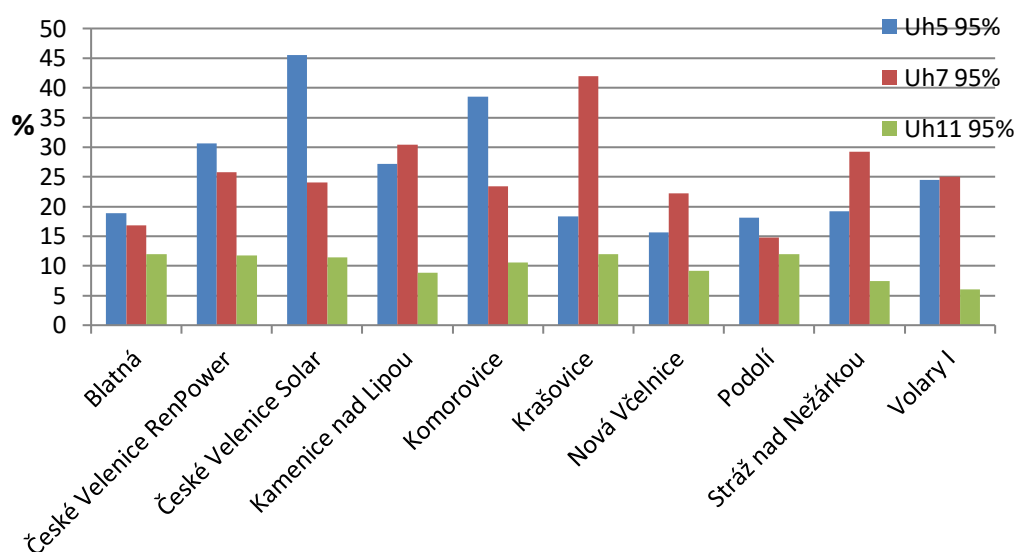


Graf 18: Procentuální vyjádření normy ČSN EN 50160 –Plt, nesymetrie a THDu

6.3 Procentuální vyjádření vyšších harmonických vzhledem k limitní hodnotě normy

Měření podílu jednotlivých vyšších harmonických na celkovém napětí, bylo provedeno od 1. do 25. harmonické. Následující vyhodnocení harmonických napětí je uvedeno pro 5., 7. a 11. Jedná se o vybrané harmonické, které měli, z naměřených dat, procentuálně nejbližší k překročení limitních hodnot normy.

Vyhodnocení se provádí pro 95 % percentil. K překročení obsahu vyšších harmonických nedošlo u žádné elektrárny. Pro pátý řád harmonické je povoleno 6 % z obsahu napětí. Nejvyšší spočítané hodnoty byly u FVE - České Velenice Solar i Renpower a Komorovice. Pro jmenované elektrárny byl obsah páté harmonické větší než 30 %, z povolené hodnoty. Výraznější hodnota sedmé harmonické oproti ostatním elektrárnám byla naměřena u FVE Krašovice (42 %). Měření jedenácté a dalších harmonických bylo okolo hodnoty 10 % a nižší z normou povolených hranic.



Graf 19: Procentuální vyjádření normy ČSN EN 50160 – vyšší harmonické

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit kvalitu napětí v místě připojení FVE. Zjistit na jaké parametry sítě má vliv připojení elektrárny a do jaké míry dochází k ovlivnění kvality napětí vlivem jejich připojení. Napětí jsem vyhodnocoval dle normy ČSN EN 50160, která udává maximální hodnoty parametrů napětí. Distributor ručí svým zákazníkům za kvalitu napětí, je důležité ji sledovat, posuzovat a dodržovat ve stanovených mezích.

Vyhodnocení bylo provedeno pro deset různých míst s připojením FVE. Měření kvality napětí musí probíhat alespoň týden v deseti minutových intervalech. Jednotlivá měření elektráren probíhala od konce měsíce března až do července.

Shrnutí číselného a grafického zhodnocení naměřených dat v předchozích kapitolách ukazuje, že téměř všechny měřené veličiny jsou v rozmezích stanovených normou ČSN EN 50160. V rozporu s normou měřených hodnot jsou jen naměřené hodnoty míry vjemu dlouhodobého flikru v místě připojení FVE České Velenice Solar. Nejvyšší naměřená hodnota flikru byla 1,616. Povolená hodnota flikru je 1 pro 95 % hodnot. Velikost flikru pro 95 % hodnot u této elektrárny byla 1,47. FVE s druhým největším flikrem s percentilem 95 byla Kamenice nad Lipou (0,599) s dostatečnou rezervou zde nedocházelo k překročení limitů, které udává norma.

Měření odchylek velikosti napětí bylo u všech elektráren v pořádku. Hodnoty napětí se po celou dobu všech měření pohybovaly od 96 % do 108% U_n . Největší rozmezí měřených hodnot napětí bylo u FVE Blatná, kde byly relativně velké rozdíly mezi provozem ve všední den a o víkend. Znatelně nižší bylo napětí ve všední dny. Zejména okolo šesté ranní hodiny, ale i to bylo v souladu s normou.

THD parametr, nesymetrie a vyšší harmonické při měření neukázaly žádné vyšší hodnoty, proto u těchto parametrů nepředpokládáme žádné problémy s překročením limitů.

Podíl na tom, do jaké míry může být síť ovlivněna zpětnými vlivy jednotlivých uživatelů, má velikost zkratového výkonu v místě připojení. FVE České Velenice Solar má velikost nejmenší 29,7 MVA a právě zde byl překročen limit pro flikr. To dokládá souvislost tvrdosti sítě s hodnotami parametrů napětí. Zvýšení zkratového výkonu přestavbou sítě zajistí větší tvrdost a omezí kolísání parametrů napětí. Zvýšení zkratového výkonu určitě bude mít za

následek snížení velikosti flikru, který je zde překračován. Došlo by k potlačení zpětných vlivů na síť od všech místních uživatelů a napětí by mělo mít ustálenější hodnotu. Zvýšila by se zde rezerva všech hodnocených a sledovaných parametrů kvality napětí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Norma ČSN EN 50160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*, 3 vydání, 2012.
- [2] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4. *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Energetický regulační úřad, 2018
- [3] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednášky z předmětu Průmyslová energetika*. Plzeň, 2016
- [4] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 3. *Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Energetický regulační úřad, 2018
- [5] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová energetika*. 1. Vydání Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 154 s. ISBN 80-7082-703-3.
- [6] PNE 333430-0: *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*. Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, 5. vydání 2015
- [7] Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2018 [online]. [cit. 20.4.2020]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c
- [8] Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2017 [online]. [cit. 20.4.2020]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88
- [9] Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2019 [online]. [cit. 20.4.2020]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Ctvrtletni_zprava_2019_IV_Q.pdf/78ade820-c6b2-41e0-8a72-56bd8d20a94d
- [10] Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 7.5.202] Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky#>

Přílohy

Příloha 1: souhrnné zhodnocení kvality napětí v místech připojení FVE

Příloha 2: Parametry kvality napětí při P_{MAX} a P_{MIN}

Příloha 1: souhrnné zhodnocení kvality napětí v místech připojení FVE

Procentuální plnění úrovně parametrů, vztažené k limitní hodnotě uváděné v normě ČSN EN 50160

	Umin (%)	Umax (%)		Umin 99%	Umax 99%		Plt 95%		Nesymetrie 95%		THDu 95%	
ČSN EN 50160	85,00%	115,00%		90,00%	110,00%		1,00		2,00		8,00	
Blatná	97,89%	106,20%	41,35%	98,54%	105,48%	54,82%	49,90%	49,90%	13,50%	6,75%	16,25%	2,03%
České Velenice RenPower	100,16%	105,53%	36,87%	100,92%	105,42%	54,21%	17,16%	17,16%	22,00%	11,00%	24,63%	3,08%
České Velenice Solar	96,19%	103,31%	22,06%	96,81%	102,92%	29,16%	147,00%	147,00%	11,50%	5,75%	35,63%	4,45%
Kamenice nad Lipou	100,06%	106,69%	44,61%	101,01%	106,14%	61,41%	64,56%	64,56%	11,50%	5,75%	23,88%	2,98%
Komorovice	102,13%	106,43%	42,89%	102,64%	105,69%	56,93%	38,92%	38,92%	16,00%	8,00%	29,00%	3,63%
Krašovice	102,86%	107,07%	47,14%	103,30%	106,86%	68,61%	26,30%	26,30%	8,50%	4,25%	26,50%	3,31%
Nová Včelnice	103,04%	107,58%	50,54%	103,50%	107,10%	70,99%	18,60%	18,60%	11,00%	5,50%	16,00%	2,00%
Podolí	103,26%	106,72%	44,79%	103,49%	106,20%	62,02%	47,20%	47,20%	11,00%	5,50%	15,13%	1,89%
Stráž nad Nežárkou	102,68%	108,01%	53,39%	103,23%	107,32%	73,16%	15,00%	15,00%	13,00%	6,50%	19,63%	2,45%
Volary I	102,16%	106,35%	42,34%	102,47%	105,96%	59,58%	17,80%	17,80%	11,50%	5,75%	21,13%	2,64%

Procentuální plnění úrovně parametrů, vztažené k limitní hodnotě uváděné v normě ČSN EN 50160

	Uh3 95 %		Uh5 95%		Uh7 95%		Uh9 95%		Uh11 95%		Uh13 95%		Uh15 95%	
ČSN EN 50160	5,00%		6,00%		5,00%		1,50%		3,50%		3,00%		0,50%	
Blatná	0,31	6,20	1,13	18,83	0,84	16,80	0,05	3,33	0,42	12,00	0,26	8,67	0,00	0,00
České Velenice RenPower	0,21	4,20	1,84	30,67	1,29	25,80	0,11	7,33	0,41	11,71	0,21	7,00	0,00	0,00
České Velenice Solar	0,21	4,20	2,73	45,50	1,20	24,00	0,05	3,33	0,40	11,43	0,00	0,12	0,05	10,00
Kamenice nad Lipou	0,32	6,40	1,63	27,17	1,52	30,40	0,05	3,33	0,31	8,86	0,21	7,00	0,00	0,00
Komorovice	0,26	5,20	2,31	38,50	1,17	23,44	0,06	4,00	0,37	10,57	0,21	7,00	0,11	22,00
Krašovice	0,26	5,20	1,10	18,33	2,10	42,00	0,06	4,00	0,42	12,00	0,22	7,33	0,00	0,00
Nová Včelnice	0,16	3,20	0,94	15,67	1,11	22,20	0,00	0,00	0,32	9,14	0,16	5,33	0,00	0,00
Podolí	0,21	4,20	1,09	18,17	0,74	14,80	0,06	4,00	0,42	12,00	0,16	5,33	0,00	0,00
Stráž nad Nežárkou	0,16	3,20	1,15	19,17	1,46	29,18	0,00	0,00	0,26	7,43	0,16	5,33	0,00	0,00
Volary I	0,06	1,20	1,47	24,50	1,25	25,00	0,05	3,33	0,21	6,00	0,26	8,67	0,00	0,00

Příloha 2: Parametry kvality napětí při P_{MAX} a P_{MIN}

P_{MAX} - maximální dodávaný výkon

	Datum	Čas	V prům	Plt	U2%	THD%	P (W)	Q (Var)	S (VA)	Pi%
Blatná	01.07.2017	13:20:00	104,25	0,304	0,23	1,22	2382798,0	901490,2	2547628,5	0,934
České Velenice RenPower	06.04.2017	11:50:00	103,45	0	0,21	1,76	912134,2	49074,4	756644,4	0,998
České Velenice Solar	24.04.2017	13:20:00	100,92	1,298	0,07	2,08	1067895,1	61488,7	629048,8	0,996
Kamenice nad Lipou	26.03.2017	11:50:00	105,38	0,199	0,1	1,67	1123602,4	7977,4	1124303,1	0,999
Komorovice	05.07.2017	12:20:00	104,88	0	0,13	1,61	1965127,7	78698,3	1967562,9	0,998
Krašovice	27.05.2017	13:00:00	104,29	0	0,16	1,58	611450,7	170752,1	636332,6	0,962
Nová Včelnice	18.04.2017	13:30:00	106,88	0,169	0,18	0,82	2385150,9	275063,2	2400959,1	0,993
Podolí	05.07.2017	12:50:00	104,91	0	0,14	0,92	1200074,8	108695,7	1204987,2	0,996
Stráž nad Nežárkou	23.04.2017	13:20:00	106,92	0	0,33	1,26	1780751,3	149508,9	1865612,1	0,859
Volary I	14.04.2017	12:20:00	105,66	0	0,07	1,48	1336437,4	209563,4	774972,4	0,988

P_{MIN} – Minimální dodávaný výkon

	Datum	Čas	V prům	Plt	U2%	THD%	P (W)	Q (Var)	S (VA)	Pi%
Blatná	18.06.2017	5:10:00	103,90	0,161	0,22	1,06	-8515,2	-26666,0	-28181,6	-0,289
České Velenice RenPower	06.04.2017	3:50:00	105,12	0	0,34	1,53	-4481,7	-21400,0	-22593,2	0,185
České Velenice Solar	17.04.2017	6:30:00	102,43	1,138	0,11	1,39	-4182,9	-19241,4	-19753,2	-0,208
Kamenice nad Lipou	01.04.2017	0:00:00	105,28	0,513	0,16	2,11	-14251,8	-717,1	-10442,3	-0,86
Komorovice	13.07.2017	6:10:00	104,35	0,174	0,17	2,27	-5019,5	-9411,5	10679,6	-0,471
Krašovice	20.05.2017	5:50:00	106,27	0	0,14	1,57	-2091,5	-3316,4	3920,8	-0,533
Nová Včelnice	20.04.2017	4:00:00	105,13	0,155	0,12	1,13	-12100,5	1232,5	12163,3	0,928
Podolí	13.07.2017	5:40:00	105,41	0,158	0,03	0,82	2211,0	-44577,8	44632,6	-0,05
Stráž nad Nežárkou	18.04.2017	19:50:00	103,54	0	0,02	1,51	-7887,8	-20077,9	14789,6	-0,317
Volary I	19.04.2017	3:50:00	105,23	0	0,1	1,6	-4182,9	15058,5	16084,3	0,256