

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra fyziky



Disertační práce

**Elektromechanické oscilace způsobené připojením
obnovitelných zdrojů energie v okrcích elektrické
distribuční sítě**

Školitel: Prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Doktorand: Ing. Milan Daneček

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto disertační práci s názvem "Elektromechanické oscilace způsobené připojením obnovitelných zdrojů energie v okrscích elektrické distribuční sítě" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci předkládané práce.

V Praze dne _____

Poděkování

Děkuji především prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. a prof. Ing. Ivanu Uhlířovi, DrSc., za cenné rady, připomínky a odborné vedení, které mi pomáhaly při zpracování této disertační práce. V neposlední řadě děkuji celé Katedře fyziky a také své rodině.

Elektromechanické oscilace způsobené připojením obnovitelných zdrojů energie v okrcích elektrické distribuční sítě

Abstrakt

Tato disertační práce s názvem "Elektromechanické oscilace způsobené připojením obnovitelných zdrojů energie v okrcích elektrické distribuční sítě" obsahuje literární rešerši a souhrn poznatků získaných výzkumem elektromechanických oscilací. V úvodní části je představena teorie FV článků a popis problematiky stability distribučních sítí. Následuje praktická část, která je věnována dosaženým výsledkům a doporučením pro projektování obnovitelných zdrojů energie s ohledem na jejich dynamiku.

Klíčová slova: obnovitelné zdroje, fotovoltaika, oscilace, setrvačné hmoty, monitoring

Abstract

These theses of the doctoral thesis with the name "Electromechanical oscillation caused by connection of renewable energy sources in the limited areas of the distribution network" contain literature review of given problem and the summary of proposed solutions regarding to the distribution grid stability. In the first part is introduced the fundamental theory of PV and distribution grid stability. The following part are the practical sections related to enriched results. This part also includes the suggestions for renewable sources design.

Keywords: renewable sources, photovoltaics, oscillation, inertia masses, monitoring

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíle disertační práce	3
3 Přehled současného stavu poznání	4
3.1 Princip a aplikace FV článků.....	4
3.1.1 Princip FV článku.....	4
3.1.2 Technologie a účinnost FV článků.....	6
3.1.3 Aplikace FV článků.....	7
3.2 Energetické systémy na bázi FV článků.....	8
3.2.1 Ostrovní systémy (stand-alone systems).....	8
3.2.2 Systémy připojené do sítě (grid-connected systems).....	10
3.2.3 Perspektivy FV systémů.....	13
3.3 Stabilita elektrických distribučních sítí.....	13
3.3.1 Napěťová stabilita.....	14
3.3.2 Frekvenční stabilita.....	15
3.3.3 Úhlová stabilita rotoru.....	16
3.4 Řešení stability elektrických distribučních sítí.....	17
3.4.1 Modelování distribučních sítí.....	18
3.4.2 Analýza elektromechanických oscilací.....	19
3.4.3 Vysokonapěťové stejnosměrné sítě - High Voltage Direct Current (HVDC).....	19
4 Teoretické pozadí řešené problematiky	21
4.1 Definice synchrofázu.....	21
4.2 Mechanická analogie - torzní vibrace.....	23
4.2.1 Jednohmotový torzní systém.....	23
4.2.2 Vícehmotový torzní systém.....	25
5 Metodika disertační práce	26
5.1 Definice zkoumané oblasti - omezené okrsky distribuční soustavy.....	26
5.2 Spektrální analýza systému - specifikace řešené oblasti.....	28
5.3 Elektromechanické jevy - setrvačné hmoty v distribuční síti.....	30
5.3.1 Kyvná rovnice (orig. Swing Equation).....	31
6 Vlastní výsledky	33
6.1 Monitoring výkonových charakteristik.....	33
6.1.1 Návrh převodníku - funkční provedení.....	34
6.1.2 Výsledky měření dynamických charakteristik.....	36
6.1.3 Souvislost setrvačných hmot a frekvenčních oscilací - výpočtová verifikace mechanického modelu.....	39
6.1.4 Dynamické chování okrsku s fotovoltaickými panely.....	42

6.2 Vnější monitoring FV panelů.....	43
6.2.1 Výsledky měření.....	45
6.2.2 Zhodnocení výkonových fluktuací.....	50
6.3 Dlouhodobý monitoring FV panelů.....	51
7 Shrnutí experimentálních prací.....	57
8 Závěr.....	59
9 Literatura.....	61

Seznam obrázků

Obr. 1: Vývoj instalovaného výkonu v ČR v FV panelech.....	1
Obr. 2: Struktura krystalického křemíkového článku.....	5
Obr. 3: Náhradní schéma ideálního solárního článku, čárkovaně jsou znázorněné neideální součásti.....	5
Obr. 4: Teoretická účinnost η_T ideálního solárního článku jako funkce energie zakázaného pásma EG (Ge - germanium, CIS - CuInSe ₂ , Si - křemík, InP - fosfát india, GaAs - arsenid galitý, CdTe - telurid kademnatý, a-Si:H - hydrogenovaný amorfnní křemík, Se - selen).....	7
Obr. 5: Struktura skladby FV modulu a FV pole.....	8
Obr. 6: Schéma ostrovního FV systému s bateriemi (proud energie je zleva doprava).....	9
Obr. 7: Integrace FVE do distribuční sítě (toky energií jsou znázorněny prostřednictvím šipek).....	11
Obr. 8: FV systém integrovaný na budově.....	12
Obr. 9: Základní blokové schéma obecného fotovoltaického systému pracujícího na síti. .	12
Obr. 10: Klasifikace stability distribuční sítě.....	14
Obr. 11: Sledování frekvenčních charakteristik v rámci evropských operátorů přenosové soustavy.....	16
Obr. 12: Energetické ztráty v porovnání s délkou vedení u stejnosměrných (HVDC) a střídavých sítí (HVAC).....	20
Obr. 13: Ad a) sinusoida a její reprezentace fázoru, ad b) fáz. úhel fázoru je libovolný, závisí na volbě osy $t = 0$. Délka fázoru se rovná střední kvadratické hodnotě sinusoidy....	23
Obr. 14: (a) jednohmotový vetknutý rotorový systém, (b) uvolněný disk.....	24
Obr. 15: Vícehmotový torzní systém.....	25
Obr. 16: Schéma omezeného okrsku distribuční sítě s vyznačením mechanických veličin	27
Obr. 17: Zjednodušený elektrický model soustavy, bez ohmických odporů - indukčnost při přenosu činného výkonu způsobuje fázový posuv.....	28
Obr. 18: Základní element mechanického modelu elektrické rozvodné soustavy.....	28
Obr. 19: Nahoře simulace COI výkonu, dole měření COI výkonu (WSCC - Western System Coordinating Council).....	29
Obr. 20: Příkladná spektrální charakteristika oscilačních jevů v distribuční soustavě.....	30
Obr. 21: Schéma měřící větve navrženého převodníku pro jednu fázi.....	35
Obr. 22: Pohled A - uspořádání měření, pohled B - umístění měřícího bodu.....	36

Obr. 23: Sada měření činného výkonu na G5, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti.....	37
Obr. 24: Sada měření činného výkonu na G5 s rozlišením 1 s, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti.....	38
Obr. 25: Sada měření činného výkonu na G5 s rozlišením 0.5 s na ose x, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti.....	38
Obr. 26: Oscilační spektrum úhlové frekvence sítě $S\omega(\Omega)$	39
Obr. 27: Elektromechanický vibrační set synchronního stroje.....	40
Obr. 28: Časový vývoj síťové frekvence a zátěžového úhlu.....	42
Obr. 29: Fotovoltaická elektrárna na střeše technické fakulty s monitorujícím dronem....	45
Obr. 30: Typický snímek FV panelu pořízený infračervenou kamerou.....	46
Obr. 31: Vyrobená elektrická energie v letech 2016 a 2017.....	47
Obr. 32: Závislost okamžitého výkonu na čase během tří vybraných dnů.....	48
Obr. 33: Závislost rychlosti větru na čase během tří vybraných dnů.....	49
Obr. 34: Infračervený snímek FVE se znázorněním bodů se zvýšenou teplotou.....	50
Obr. 35: FVE v Praze na střeše Technické fakulty ČZU s pevnými stojany, panely jsou orientovány směrem na jih pod úhlem 35°.....	52
Obr. 36: FVE v Praze umístěné na střeše fotbalového stadionu, FV fólie jsou umístěné téměř horizontálně bez podpěrných stojanů.....	53
Obr. 37: Množství vyrobené elektřiny v uvedených FV systémech během jednoho roku. .	54
Obr. 38: Množství vyrobené elektřiny v třinácti FVE umístěných v České republice během jednoho roku.....	56
Obr. 39: Záložní diesel generátor umístěný ve stanici pražského metra Radlická.....	58
Obr. 40: Osazená deska navrženého měřícího analogového <i>převodníku</i>	58

Seznam tabulek

Nejsou uvedeny.

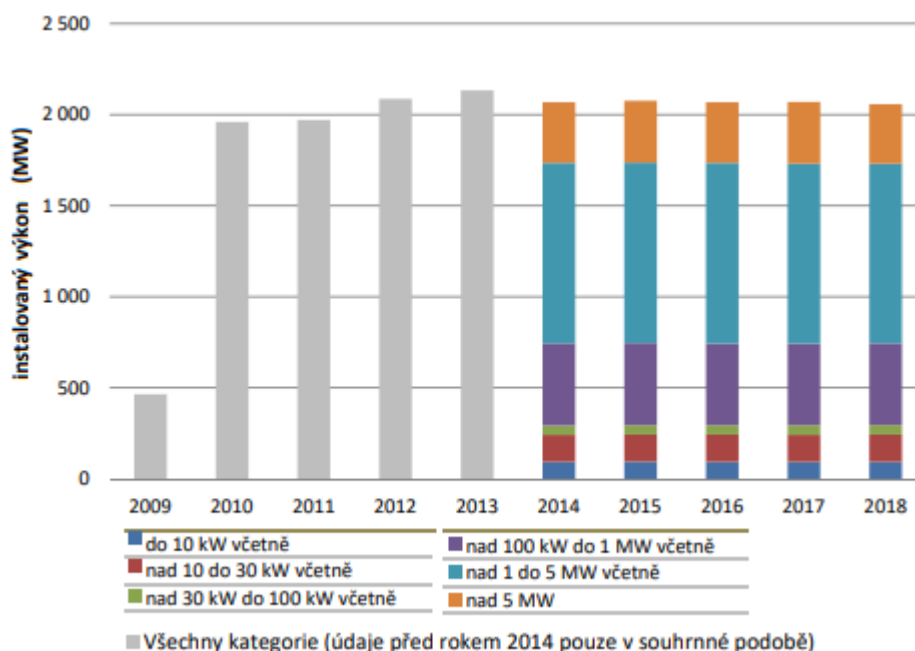
Seznam použitých zkratek

Zkratky jsou uvedeny a vysvětleny v textu práce.

1 Úvod

V posledních několika letech došlo v sektoru energetiky k intenzivnímu rozvoji obnovitelných zdrojů energie. Tento masivní rozvoj byl motivován mnoha externími faktory. Kromě globální společenské posedlosti po „zelené“ energii se jednalo například o rozhodnutí německé vlády o odklonu od produkce elektřiny s využitím jaderných elektráren.

Česká republika se v rámci podpory obnovitelných zdrojů energie (OZE) zavázala do roku 2020 pokrývat z těchto zdrojů 13 % výroby elektrické energie. S vývojem podpory OZE došlo v letech 2009 – 2010 v České republice k velkému nárůstu instalovaného výkonu ve formě fotovoltaických elektráren (FVE), viz Obr. 1 (Energetický regulační úřad, 2018). Tento fenomén byl zapříčiněn jednak změnou zákona č. 180/2005 Sb., kde byl mimo stanovení výše výkupní ceny a doby jejího vyplácení stanoven také limit meziročního poklesu výkupní ceny, ale také masivním poklesem výrobních/investičních nákladů na fotovoltaické (FV) panely.



Obr. 1: Vývoj instalovaného výkonu v ČR v FV panelech

Zdroj: (Energetický regulační úřad, 2018)

Trendy uplynulých let nám zcela jasně ukazují, že sektor energetiky jako celek prochází signifikantními změnami. V souvislosti s obnovitelnými zdroji (OZE) je nezbytné rovněž brát v úvahu související aspekty, které s sebou přináší zvýšení podílu OZE. Jedná se zejména o technické výzvy, které souvisejí s připojováním obnovitelných zdrojů k elektrické rozvodné síti. Jedná se například o výkonové

oscilace způsobené přírodními jevy, dále odlišný způsob regulace a predikce stavů distribuční soustavy v návaznosti na přírodní jevy (Muthamizh Selvam, Gnanadass, & Padhy, 2016). S ohledem na tyto skutečnosti je jasné, že čím větší bude podíl OZE v energetickém mixu, tím komplexnější se bude stávat úkol regulace a udržování provozuschopnosti distribuční soustavy.

Rozvodné sítě, budované v minulých dekádách, byly navrhovány s ohledem na letité provozní zkušenosti s „klasickými“ energetickými zdroji. Stejně tak regulace systému, predikce atp., proto je nezbytné při budoucích návrzích energetických systému s OZE zohledňovat jejich specifické chování v prostředí distribuovaných systémů

Předkládaná práce se věnuje zkoumání dynamiky přelévání energie mezi jednotlivými elektrickými a mechanickými komponenty zapojenými v omezeném okrsku a zejména pak zkoumá integrovanou odezvu okrsku jako zdroje / zátěže na vnější síť.

Omezený okrsek je výsek komplexní rozvodné sítě, propojený s ostatní rozvodnou sítí jedním, nebo několika málo spoji. Ve zkoumaném případě se rozumí, že v okrsku se nacházejí zdroje a spotřebiče různých principů:

- rotační stroje pracující jako generátory hnané parními i vodními turbínami, případně pístovými motory,
- rotační stroje pracující jako motory pohánějící nejrůznější mechanická zařízení, např. kompresory a čerpadla,
- fotovoltaické zdroje s měniči,
- větrné turbíny s měniči,
- světelné a tepelné spotřebiče,
- další elektrická zařízení, jako řízené usměrňovače, kompenzátory účiníku, aktivní filtry a vyrovnávací zásobníky energie.

2 Cíle disertační práce

Předkládaná disertační práce má celkem tři základní cíle, které jsou tematicky vymezeny tak, aby obsáhly oblast problematiky související s elektromechanickými oscilacemi, které mají velmi významný vliv na stabilitu elektrické distribuční sítě.

Prvním cílem je výzkum elektromechanického chování omezeného okrsku distribuční soustavy. Omezeným okrskem se vždy rozumí omezená část distribuční soustavy, typicky obsahující zdroj elektrické energie a spotřebiče. Tento omezený okrsek je omezen připojovacím bodem do distribuční soustavy. Hlavním těžištěm tohoto cíle je analyzovat chování "klasických" zdrojů elektrické energie na bázi točivých strojů.

Druhým cílem této práce je výzkum vlivu obnovitelných zdrojů elektrické energie na dynamiku omezených okrsků distribuční soustavy. Tímto cílem se rozumí sledování výkonových parametrů obnovitelných zdrojů elektrické energie. Pro účely práce a s ohledem na dostupnou infrastrukturu pro experimentální měření je analyzováno pouze použití fotovoltaických panelů. Tato volba byla provedena z důvodu absence setrvačných hmot, což je klíčový parametr, který ve smyslu této práce odlišuje klasické zdroje od FVE. Lze konstatovat, že ostatní obnovitelné zdroje energie využívají k výrobě elektrické energie ve větší míře točivé stroje (generátory), jedná se například o vodní elektrárny, větrné elektrárny, geotermální energii apod. Samozřejmě existují další obnovitelné zdroje, které rovněž neobsahují setrvačné hmoty, například vodíkové palivové články.

Třetím cílem této práce jsou vlastní závěry ohledně vlivu obnovitelných zdrojů elektrické energie na distribuční síť. V rámci tohoto cíle je nezbytné formulovat doporučení vyplývající z výzkumů realizovaných v prvním a druhém cíli.

Všechny tři cíle uvedené výše nám umožňují definovat stěžejní hypotézu, které se věnuje tato práce. Jedná se o to, že pokud budeme schopni dosáhnout provozních podmínek, za kterých budou dílčí okrsky elektrické distribuční soustavy stabilní, budeme schopni dosáhnout stabilního a předvídatelného chování v distribuční soustavě jako celku. Abychom byly schopni tuto hypotézu naplnit, musíme nejdříve analyzovat a popsat dynamické chování těchto omezených okrsků podle jejich druhu (klasické zdroje a FVE) a následně navrhnout příslušná opatření.

3 Přehled současného stavu poznání

Tato kapitola je zaměřena na vysvětlení základních principů a specifik FV článků a dále na popis současného stavu poznání v oblasti stability elektrických rozvodných sítí.

3.1 Princip a aplikace FV článků

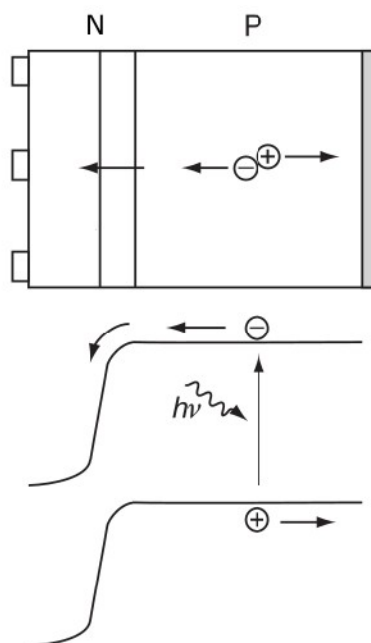
3.1.1 Princip FV článku

Fotovoltaický článek (FV) slouží k přeměně solární energie na elektrickou energii pomocí tzv. fotoelektrického jevu. Tato přeměna se skládá se dvou základních kroků. V prvním kroku je absorbováno světlo¹, což vede k vytvoření dvojice elektron-díra, přičemž elektron je vlivem pohlcení záření excitován z valenční sféry do vodivostní sféry. Elektrony a díry se pak shromažďují na příslušných stranách PN přechodu - elektrony v negativní "N" sekci a kladně nabitě díry v pozitivní "P" sekci, proto označení PN přechod.

Na Obr. 5 je znázorněna struktura krystalického křemíkového solárního článku, který je typickým solárním článkem, který se dnes používá. Velká část článku je tvořena širokou základnou typu "P", kde je absorbována většina dopadajícího světla a je generována většina energie. Po absorpci světla se minoritní nosiče (elektrony) přesouvají do levé "N" části a díry do pravé "P" části. Tím vzniká elektrické pole a mezi konci "N" a "P" s je zde vytvořeno fotoelektrické napětí. Elektrická energie je následně shromažďována kovovými kontakty na přední a zadní straně článku (Tom Markvart, 2011)

Energie, která je zapotřebí, aby elektron přeskočil vlivem pohlcení záření z valenční sféry do vodivostní sféry je dána tzv. šířkou zakázaného pásma. Šířka zakázaného pásma je hodnota energie E_G [eV], kterou je nutné elektronu dodat aby opustil valenční sféru atomu. U krystalického křemíku je hodnota $E_G = 1.12$ eV (Häberlin, 2012). Hodnota této energie nám následně slouží k výběru vhodného materiálu pro výrobu FV článků, viz dále.

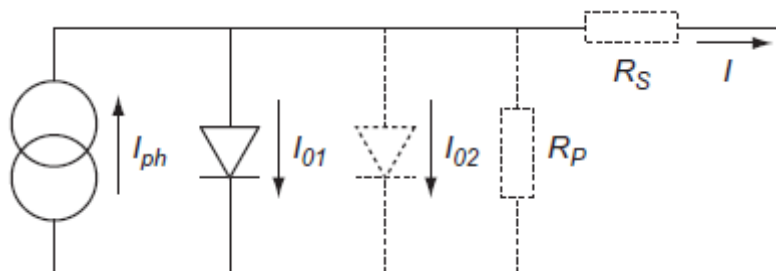
1 Na Obr. 2 je označeno "hv", což představuje energii elektromagnetického záření (dopadajícího fotonu), definovanou jako $E = hv$, kde h je Planckova konstanta a v je frekvence elektromagnetického záření.



Obr. 2: Struktura krystalického křemíkového článku

Zdroj: (Tom Markvart, 2011)

Ideální solární článek může být modelován jako zdroj proudu paralelně připojený k usměrňovací diodě. Tento ideální článek je znázorněn na Obr. 3 (Tom Markvart, 2011). Zde I_{ph} je proud generovaný dopadem fotonu, I_{01} a I_{02} jsou saturační proudy diody, R_p je paralelní vnitřní odpor, R_s je sériový vnitřní odpor a I je výsledný proud.



Obr. 3: Náhradní schéma ideálního solárního článku, čárkovaně jsou znázorněné neideální součásti

Zdroj: (Tom Markvart, 2011)

Z náhradního schématu ideálního článku je pak odvozena základní volt-ampérová charakteristika, která je popsána Shockleyho rovnicí solárního článku:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1)$$

kde I je celkový proud FV článku, k_B je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota, q (>0) je náboj elektronu, V je napětí na výstupech článku, I_{ph} je proud

generovaný dopadem fotonu, I_0 je saturační proud diody.

3.1.2 Technologie a účinnost FV článků

Základním typem FV článku jsou články na bázi krystalického křemíku, které objemově tvoří 85 % výroby (Staněk, 2012).

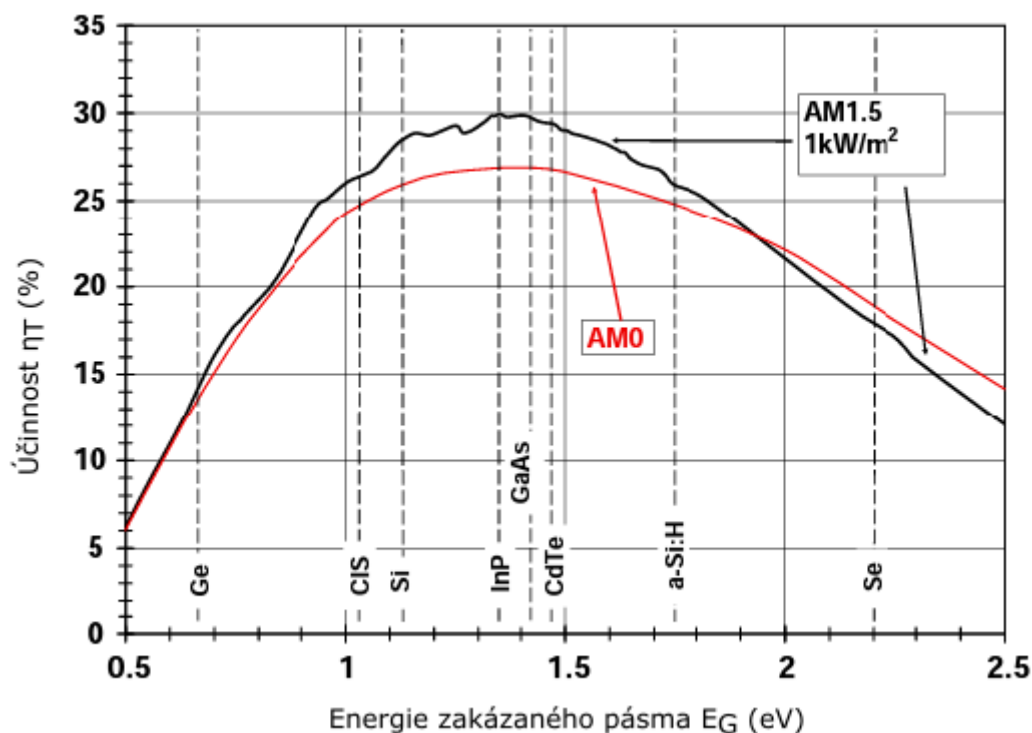
Články z krystalického křemíku jsou vyráběny z oxidu křemičitého (SiO_2), který se vyskytuje běžně v přírodě v podobě křemičitého písku nebo krystalů. Tyto polotovary se následně taví, čímž se dosáhne křemíku s čistotou blížící se 98 %. Následně je takto připravený křemík čištěn. Výsledkem procesu tavení je polykrystalický křemík. Monokrystalický křemík je pak získáván z taveniny polykrystalického křemíku tak, že se do taveniny obklopené inertním plynem umístí tyč, na které je iniciován růst krystalu křemíku. Maximální rychlost růstu krystalu se pohybuje okolo 30 cm/h (Häberlin, 2012).

Dalším materiálem pro FV články je GaAs (arsenid galitý), který má energii $E_G=1.42$ eV (Häberlin, 2012). Jelikož GaAs je přímo absorbující polovodič, je možné dosáhnout úplné absorpce světla i pomocí ultra tenké vrstvy. GaAs je tedy použitelný, jak pro krystalické, tak pro tenkovrstvé solární články. Díky tomu, že GaAs mají větší energii zakázaného pásma, jsou schopné snášet daleko vyšší tepelné zatížení a mají nižší koeficient poklesu účinnosti v závislosti na teplotě.

Vývojové trendy v oblasti FV článku se nyní zaměřují například na DSSC (dye-sensitized solar cell), CIGSS (Cu-In-Ga-Se-S), případně na FV články na bázi polymerů nebo nanotechnologií. Cílem výzkumných aktivit je docílit co nejmenší výrobní ceny, vysoké účinnosti a životnosti článku.

Účinnost FV článků je velmi úzce spjata s provozními podmínkami a volbou příslušného materiálu. Jak bylo již uvedeno výše, základním parametrem u polovodičových materiálů je hodnota šířky zakázaného pásma E_G . Na Obr. 4 je znázorněna závislost účinnosti pro jednotlivé materiály. Účinnost je vynesena na ose y a na ose x je hodnota E_G . Z Obr. 4 je patrné, že maximální účinnost pro křemíkové články pro AM0 je 21 % a pro AM1.5 je 26 %. Označení "AM" je poměr skutečné atmosférické hmotnosti (optické tloušťky), skrz kterou prochází sluneční záření, a minimální možné atmosférické hmotnosti na hladině moře (Häberlin, 2012). Pro Evropu (mírný pas) je směrodatná hodnota AM1.5.

Je třeba poznamenat, že se jedná pouze o teoretické hodnoty účinnosti, kterých je daný materiál schopen dosáhnout. Konečná účinnost daného FV panelu je závislá na zvoleném typu materiálu, výrobním procesu, ale také samotné instalaci.

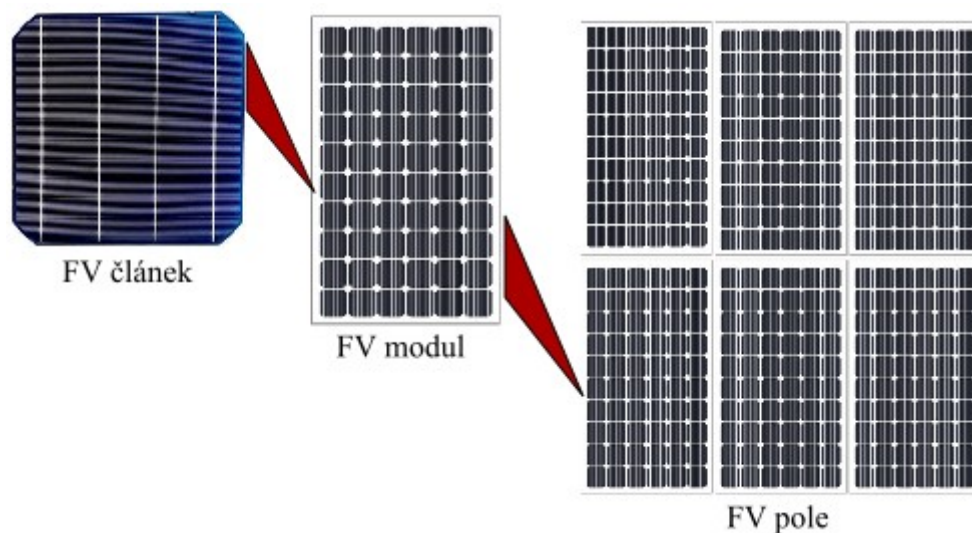


Obr. 4: Teoretická účinnost η_T ideálního solárního článku jako funkce energie zakázaného pásma E_G (Ge - germanium, CIS - $CuInSe_2$, Si - křemík, InP - fosfát india, GaAs - arsenid galitý, CdTe - tellurid kademnatý, a-Si:H - hydrogenovaný amorfní křemík, Se - selen)

Zdroj: (Häberlin, 2012)

3.1.3 Aplikace FV článků

Jeden standardní FV článek je schopen generovat stejnosměrné fotoelektrické napětí o hodnotě přibližně 0.5 V. Pro výrobu elektrické energie je tudíž nezbytné FV články spojovat do větších celků, tzv. FV modulů viz Obr. 5. Tak je dosaženo požadovaného napětí jednoho modulu. Tyto moduly jsou dále spojovány do série, čímž je dosaženo požadovaného napětí jednoho okruhu. Tyto okruhy se pak nazývají stringy.



Obr. 5: Struktura skladby FV modulu a FV pole

Zdroj: Vlastní zpracování autora

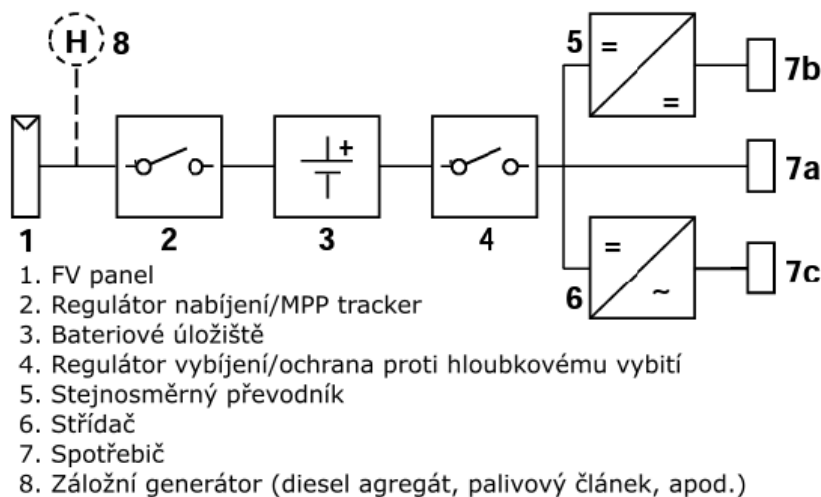
3.2 Energetické systémy na bázi FV článků

Z pohledu provozu FV systémů můžeme rozlišovat dva základní provozní režimy. Jedná se o systémy připojené k distribuční síti a tzv. ostrovní systémy, které pracují izolovaně od distribuční sítě. Při aplikaci systému s ostrovním režimem musíme brát vždy zřetel na to, že v době, kdy nejsou FV panely vystaveny slunečnímu záření, nebude docházet k výrobě elektrické energie. Této skutečnosti musí být samozřejmě přizpůsobena rovněž celá infrastruktura včetně spotřebičů. Elektrická energie z FV panelů v případě ostrovních systémů může být využita například pro chlazení, případně pro větrání. V denních hodinách máme rovněž největší potřebu chladu případně cirkulace vzduchu v prostorách s lidmi (průmyslové haly, školy apod.). Další možností je použití úložiště energie pro provoz zařízení v době, kdy nemáme dostatek slunečního záření. Úložiště energie má své uplatnění rovněž v systémech připojených k elektrické síti, kdy může sloužit pro krytí výkonových fluktuací během dne. Tímto jsou eliminovány rovněž výkonové fluktuace dodávané do distribuční sítě.

3.2.1 Ostrovní systémy (stand-alone systems)

S ohledem na to, že většina technických zařízení, jak v našich domácnostech, tak v průmyslových objektech vyžaduje neustálou dodávku elektrické energie, je provoz ostrovních systémů bez úložiště velmi ojedinělý. Ostrovní systémy jsou většinou vybaveny olověnými nebo nikl-kadmiovými bateriemi (Rezk, Abdelkareem, & Ghenai, 2019), nicméně existují také další způsoby akumulace elektrické energie.

Jedná se například o vysokootáčkové setrvačníky. Pokud bychom uvažovali o dlouhodobém skladování elektrické energie vyrobené z FV panelů, můžeme použít systém, který pomocí elektrolýzy vody produkuje vodík. Tento vodík je v plynné fázi jímán a následně může být využit pro výrobu elektrické energie v palivovém článku, nebo spalovacím motoru (kogenerační jednotky).



Obr. 6: Schéma ostrovního FV systému s bateriemi (proud energie je zleva doprava)
 Zdroj: (Häberlin, 2012)

Na Obr. 6 je znázorněno typické zapojení ostrovního FV systému, který obsahuje bateriové úložiště. Volt-ampérová charakteristika FV panelů 1 je vhodná pro nabíjení baterií. Výstupem FV panelu je rovněž stejnosměrný proud, může tedy docházet k přímému nabíjení jen s použitím regulátoru nabíjení. Regulator 2 nabíjení zabraňuje tomu, aby nedošlo k přílišnému nabití baterie. Při přílišném nabití baterie dojde k rozložení elektrolytu (zředěná kyselina sírová) na vodík a kyslík. Tato skutečnost pak může mít za následek natlakování baterie. Při přílišném nabití baterie, kdy je vyvíjen vodík a kyslík, dochází ke vzniku nebezpečné situace, která může vést až k explozi. Tato situace může nastat v případě poruchy regulátoru nabíjení. Je tedy nezbytné, aby bateriové úložiště bylo dobře větráno. Při přebití baterií rovněž dochází ke ztrátě vody, je tedy potřeba dle potřeby doplňovat destilovanou vodu. U větších instalací je možné namísto regulátoru nabíjení použít tzv. MPP (Maximum Power Point) tracker (Farajdadian & Hosseini, 2019), který zajišťuje to, že je FV panel provozován vždy v jeho optimálním bodě maximálního výkonu, čímž se předejde problémům s přebíjením baterií (Häberlin, 2012).

K ukládání elektrické energie dochází v bateriovém úložišti 3. Jmenovitá hodnota napětí je bateriového úložiště 3 je stejná jako jmenovitá hodnota napětí

ostrovního FV systému. Hodnota jmenovitého napětí FV systému může být navržena na 12 V, 24 V, 48 V nebo i více. V instalacích s vyšším instalovaným výkonem v řádech kilowattů. Jmenovité napětí FV systému rovněž určuje pracovní napětí napřímo připojených stejnosměrných spotřebičů 7a. Vedle jmenovitého napětí FV systému je také velmi důležité správně navrhnout kapacitu bateriového úložiště (skladovatelný elektrický náboj je vyjádřen v Ah). Kapacita bateriového úložiště je klíčovým parametrem, který velmi silně ovlivňuje jeho životnost. Pokud dochází k přebíjení nebo naopak k hlubokému vybití, ochranné regulátory 2; 4 odpojí buď dobíjení nebo připojené spotřebiče. Při aplikaci v rozsáhlých instalacích mohou být zařízení rozdělena do funkčních skupin, kterým mohou být přiřazeny různé priority napájení. Méně důležité skupiny spotřebičů budou vypnuty nejdříve tak, aby byla po delší čas zajištěna elektřina pro kritická zařízení z jiných skupin.

V případě ostrovního provozu je velmi časté, že provozované spotřebiče 7b pracují na různých napěťových hladinách. Pro tyto případy se používají stejnosměrné převodníky 5. Součástí ostrovního systému jsou samozřejmě také spotřebiče na střídavý proud a napětí 230 V 7c, proto musí být ostrovní systém rovněž vybaven střídačem 6.

Spotřebiče na střídavý proud (jedná se zejména o spotřební elektroniku) mohou být pomocí jednoduchých úprav převedeny na stejnosměrné spotřebiče. Tato úprava u menších ostrovních systémů výrazně snižuje spotřebu energie u střídače díky tomu, že eliminuje ztrátu otevřeného obvodu transformátoru.

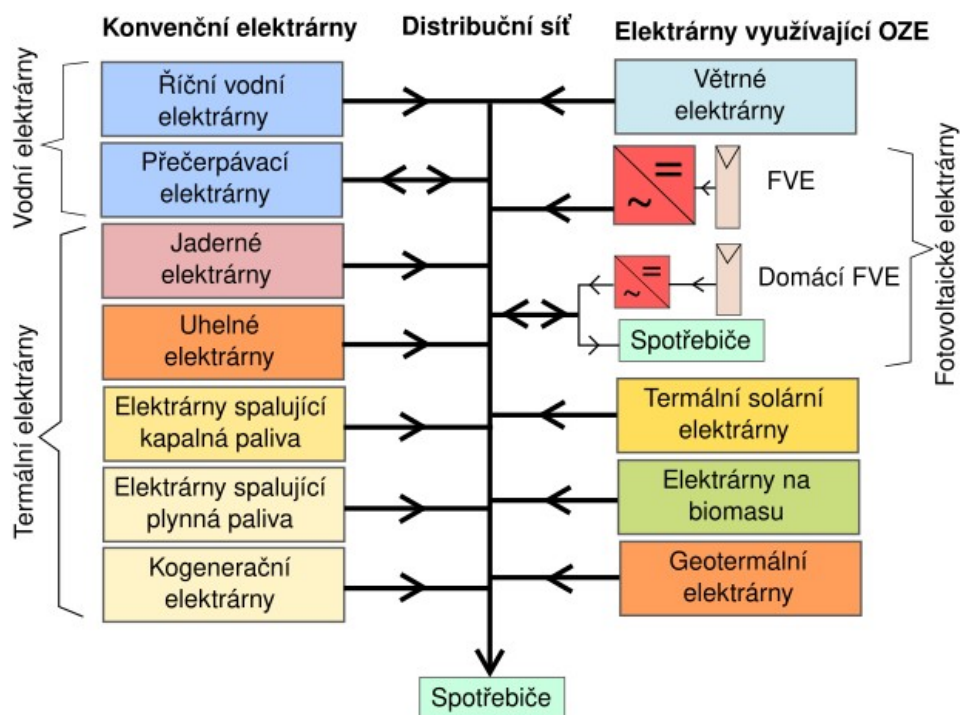
V malých FV instalacích je často kombinován regulátor nabíjení 2 s regulátorem vybíjení 4 do jednoho zařízení známého jako nabíjecí regulátor, systémový regulátor nebo regulátor baterie.

3.2.2 Systémy připojené do sítě (grid-connected systems)

Systémy připojené k distribuční síti jsou velmi běžné v oblastech, kde existuje dostatečně hustá distribuční síť a není tak nutné budovat stovky kilometrů dlouhé vedení. Díky přímému připojení do distribuční sítě pomocí střídačů dojde ke snížení investičních nákladů na pořízení úložiště energie.

Obr. 7 znázorňuje, jak pracují systémy připojené do elektrické distribuční sítě. Pro provoz distribuční sítě je nezbytné, aby se součet vyrobené energie v každém okamžiku rovnal součtu energie spotřebované v síti, protože distribuční síť sama v sobě nemůže akumulovat energii. Energie dodávaná prostřednictvím FVE do sítě je

využívána spotřebičem připojeným na jiném místě sítě, a tím pádem tato energie nemusí být generována žádnou jinou elektrárnou. Energie vyrobená prostřednictvím FVE tedy snižuje množství primární energie dodávané konvenční elektrárnou, která by mohla rychle přizpůsobit dodávaný výkon požadavkům sítě. Tento problém je nezbytné řešit zdroji, které jsou schopné pružně reagovat na výkyvy počasí. Jedná se například o přečerpávací elektrárny.



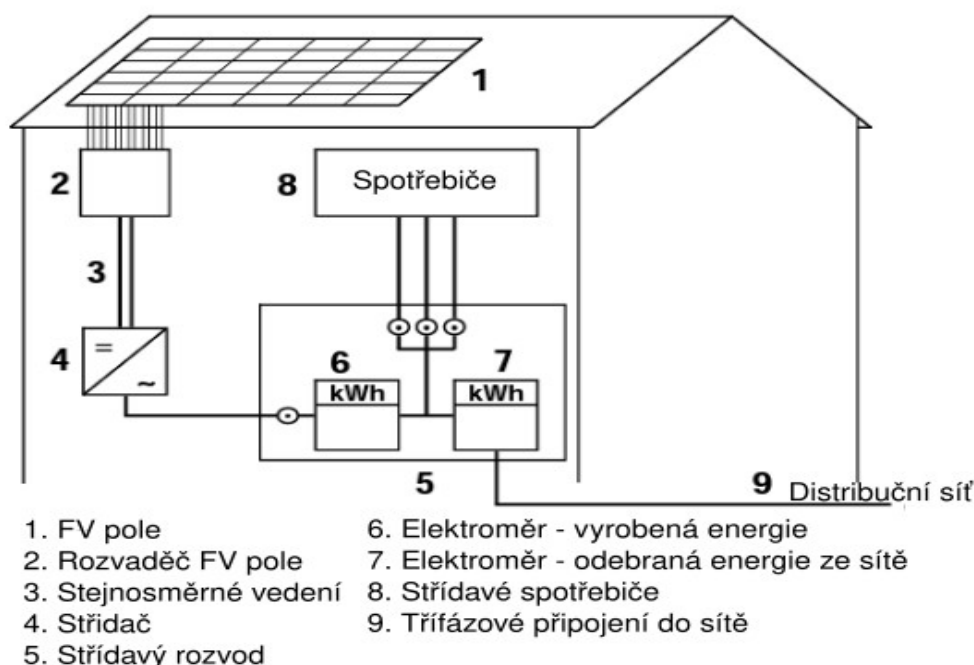
Obr. 7: Integrace FVE do distribuční sítě (toky energií jsou znázorněny prostřednictvím šipek)

Zdroj: (Häberlin, 2012)

Pro aplikaci FVE připojených do sítě lze přikládat jak technický, tak environmentální význam, zejména menším instalacím, které jsou integrovány do budov. Tyto menší instalace by měly být koncipovány pro energetické potřeby dané budovy, tak aby jejich případné výkonové výkyvy měly jen nepatrný vliv na distribuční síť. Nepříznivé vlivy FV systémů připojených do distribučních sítí se snaží řešit řada studií, které se věnují zejména vývoji lepšího řízení dodávaného výkonu (Alheji & Mosaad, 2020; Mao, Zhang, Huang, Chong, & Zhou, 2020; Roselyn et al., 2020).

Obr. 8 znázorňuje FV systém připojený do sítě a instalovaný na budově, pomocí klasického rozvodu a s použitím střídače. FV pole 1 na střeše budovy přeměňuje dopadající sluneční záření na stejnosměrný proud. Jednotlivé stringy FV pole jsou paralelně připojeny do rozvaděče 2. Generovaný stejnosměrný proud je

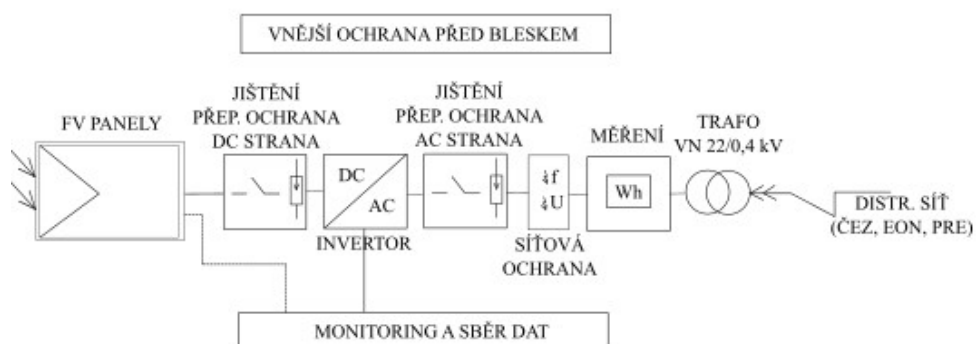
připojen ke střídači 4 pomocí stejnosměrného rozvodu 3, kde je stejnosměrný proud rozstřídan na 230 V / 50 Hz. Energie generovaná domácí FVE pak může být využita pro provoz střídavých spotřebičů 8 a zároveň pro dodávání elektrické energie do sítě. Pokud není FVE schopna dodávat požadovaný výkon, je možné tento výkon odebírat ze sítě. Energie dodávaná/odebíraná ze sítě je následně monitorována pomocí elektroměrů 6; 7.



Obr. 8: FV systém integrovaný na budově

Zdroj: (Häberlin, 2012)

Z pohledu této práce jsou klíčové aplikace, kdy jsou FV panely připojené přímo do distribuční sítě pomocí invertorů, viz Obr. 9 (Staněk, 2012). Lze totiž konstatovat, že tyto systémy mají zásadní vliv na stabilitu distribuční sítě, zejména s ohledem na řádově vyšší hodnoty instalovaného výkonu u tohoto typu instalací.



Obr. 9: Základní blokové schéma obecného fotovoltaického systému pracujícího na síti

Zdroj: (Staněk, 2012)

3.2.3 Perspektivy FV systémů

Výzkum v oblasti fotovoltaických systémů je zaměřen na technologický vývoj směřující do oblasti polovodičové techniky za účelem zvyšování účinnosti a životnosti fotovoltaických článků.

Další větví vývoje energetických systémů s FV panely směřuje do oblasti jejich lepší integrace v rámci existujících energetických struktur a jejich provozu (Illanes et al., 2014; Salameh, Ghenai, Merabet, & Alkasrawi, 2020). V této oblasti se jedná zejména o řešení problému s nedostatkem slunečního záření v nočních hodinách. Tento pohled je velmi podstatný i pro tuto práci. Je nezbytné, aby byl vhodně nastaven legislativní základ a byly podporovány domovní instalace FVE integrující akumulaci elektrické energie. Tato akumulace může být v podobě baterií nebo jiných technologií. Tak dojde k přenesení vyrobené elektrické energie přímo do místa její spotřeby a distribuční síť tak nebude zatížena přenosem výkonových fluktuací.

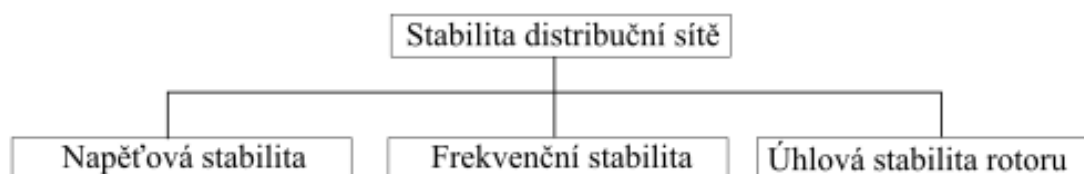
Trh s elektřinou z OZE je samozřejmě pod silným vlivem legislativních a politických opatření, nicméně při rozumném nastavení dotačních politik, které budou korespondovat s technicky rozumným využitím OZE k výrobě elektrické energie pro konečné spotřebitele, nikoliv pro co nejvyšší zisk, dojde rovněž k útlumu výstavby velkých instalací, které jsou umístěovány na zemědělsky hodnotné plochy.

3.3 Stabilita elektrických distribučních sítí

Cílem této kapitoly je objasnit pohled na problematiku stability distribučních sítí. Stabilitu lze zkoumat z globálního pohledu na celou propojenou síť, nebo z pohledu omezeného okrsku sítě, kde vymezení se týká odpojitelné oblasti schopného samostatného ostrovního provozu.

Pro vyhodnocení stability systému pro výrobu elektrické energie existuje několik základních hledisek. Jedná se o úhlovou stabilitu rotoru, frekvenční stabilitu a napěťovou stabilitu, viz Obr. 10 (Grigsby, 2017). Většina studií a zájmu je zaměřena pouze na první dvě jmenované, a sice na napěťovou a frekvenční stabilitu (Machowski, Jan; Lubosny, Zbigniew; Bialek, Janusz W; Bumby, 2020). V posledních letech jsou však velmi patrné trendy v oblasti měření fázorů pro vyhodnocení stability distribuční sítě (D'Avanzo, Delle Femine, Gallo, Landi, & Luiso, 2020; Sun, Qi, & Kang, 2016; Thilakarathne, Meegahapola, & Fernando, 2020). Tato problematika je úzce spojena s úhlovou stabilitou rotoru a tím pádem i s vlivem setrvačných hmot.

Stabilita distribuční soustavy obecně popisuje schopnost elektrického systému ve výchozím provozním stavu vrátit se zpět do rovnovážného stavu po tom, co byl vystaven fyzikálnímu vyrušení. Elektrický systém je samozřejmě vysoce nelineární a je provozován v opakovaně se měnícím prostředí - zatížení, výstupní výkon generátorů, topologie (přepínání tras distribuční sítě).



Obr. 10: Klasifikace stability distribuční sítě

Zdroj: (Grigsby, 2017)

3.3.1 Napěťová stabilita

Běžně sledovaným parametrem stability distribuční sítě je napěťová stabilita. Napěťová nestabilita může vzniknout tam, kde dochází ke ztrátě zatížení. V této oblasti napětí nabývá nečekaně nízkých hodnot a může dojít k porušení integrity systému. Pokles napětí může rovněž souviset s vychýlením fázového úhlu (ztráta synchronismu).

Hlavním faktorem, který přispívá k napěťové nestabilitě je obvykle pokles napětí, který nastane, když aktivní a jalový výkon protékají přes indukivní reaktance přítomné v přenosové síti - toto limituje schopnost přenosové sítě přenášet elektrickou energii (Luís & Bretas, 1999). Řídící silou napěťových nestabilit jsou zatížení. Tato zatížení jsou reakcí na narušení. Výkon spotřebovaný zátěží se má tendenci obnovit prostřednictvím akčního zásahu napěťových regulátorů a přepínacích transformátorů.

Celkově tedy můžeme považovat distribuční síť v určitém okrsku, jako připojenou k přípojnému místu přenosové soustavy. V tomto omezeném okrsku pak může dojít k fluktuacím napětí, což způsobuje dynamické interakce v přenosové soustavě. Napěťové fluktuace mohou vznikat zejména z důvodu (Machowski, Jan; Lubosny, Zbigniew; Bialek, Janusz W; Bumby, 2020):

- zásahu do řízení napětí vlivem přepnutí přepínacího transformátoru
- řídicího zásahu spojeného s kompenzací jalového výkonu
- nízkého napájecího napětí způsobujícího změny v požadavku na výkon v důsledku zastavení motorů a/nebo zhasnutí výbojkového osvětlení

- provozování ochranných zařízení pomocí nadproudových nebo podpět'ových relé, elektromechanicky udržovaných stykačů atd.
- opětovné rozsvícení výbojkového osvětlení a indukčních motorů se samočinným startem, když se obnoví napájecí napětí

3.3.2 Frekvenční stabilita

Frekvence sítě a její stabilita je sledována za účelem řídit a udržovat stabilní frekvenci v definovaném rozsahu. Pokud frekvence vystoupí ze sledovaného nominálního rozsahu, je to v důsledku zejména disbalance mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Ve velkých systémech, např. propojených distribučních sítích evropských operátorů, nedochází k problémům s kolísáním frekvence často. Na druhou stranu problém frekvenční stability se stává velmi důležitým při provozu energetických systémů v ostrovním režimu.

Na Obr. 11 můžeme vidět příklad aplikace online monitoringu frekvence napříč několika státy v Evropě. Aplikace znázorněná na Obr. 11 byla navržena Dr. Walterem Stangerem ze společnosti Swissgrid (švýcarský operátor přenosové soustavy, obdoba českého ČEPS a.s.). Aplikace včetně sledování frekvenčních charakteristik jsou veřejně dostupné na webové adrese². Hodnoty označené jednotkou [°] jsou úhlové rozdíly napětí.

Monitoring frekvenčních charakteristik tak, jak je znázorněn na Obr. 11 probíhá pomocí provozního měření provozovatelů distribuční soustavy v jednotlivých státech v Evropě. Každý stát disponuje vlastním provozovatelem distribuční soustavy, který provádí příslušná provozní a kvalitativní měření. Sledování frekvenčních charakteristik a fázorových charakteristik (bude popsáno v dalších kapitolách) je prováděno s využitím tzv. PMU (Phasor Measurement Units) jednotek. Tyto jednotky jsou mezi sebou navzájem propojené. Tato síť PMU jednotek je pak součástí komplexních systémů pro monitoring distribuční sítě. Jedná se o tzv. WAMS (Wide Area Monitoring Systems) systémy.

² <https://www.swissgrid.ch/en/home/operation/grid-data.html>

Frequency set point	50 Hz
Current Frequency	49.996 Hz
Current Frequency Deviation	-0.005 Hz
Current grid time deviation	-25.582 s



Obr. 11: Sledování frekvenčních charakteristik v rámci evropských operátorů přenosové soustavy

Zdroj: <https://www.swissgrid.ch/en/home/operation/grid-data.html>

3.3.3 Úhlová stabilita rotoru

Z pohledu této práce je úhlová stabilita rotoru, tou nejzajímavější. Základní přístup, jak řešit úhlovou stabilitu rotoru v energetickém systému, je sledovat všechna rušení ve sledovaném systému. Na jedné straně tedy uvažujeme napětíovou a frekvenční stabilitu, a na druhé straně se snažíme postihnout to, jakým způsobem jsou tyto dva sledované faktory narušeny úhlovou stabilitou rotoru. Z této úvahy pak vychází hlavní myšlenka této práce, a sice to, že se snažíme sledovat a vyhodnocovat chování systému na základě jeho mechanických parametrů. Nejprve je však nezbytné definovat základní teorii úhlové stability rotoru.

Úhlová stabilita rotoru je velmi úzce spjata s propojením synchronních strojů (generátorů) s poháněcími stroji (parní turbína, větrná turbína, spalovací motor atd.). Vznikající nestability jsou důsledkem úhlového kývání některých generátorů, což může vést k rozpadu synchronismu ostatních generátorů (Zhang, Zhu, Fu, & Li, 2020).

Problém úhlové stability rotoru spadá do výzkumu elektromechanických oscilací vyskytujících se v distribuční síti. Základním faktorem v tomto problému je, když se výstupní výkon synchronního stroje mění/osciluje s tím, jak se mění/osciluje úhel rotoru. Propojené stroje udržují v synchronismu tzv. obnovovací síly, které působí proti silám, jež se snaží zrychlit nebo zpomalit jeden nebo více strojů.

Porozumění základním principům stability nám poskytuje určitý přehled o porozumění samotné stabilitě. Toto základní porozumění bude popsáno v dalších kapitolách teoretického pohledu, které nám pomohou propojit základní fakta se stavovým chováním a jeho příspěvkem ke stabilitě energetické soustavy.

Vazba výstupního výkonu a úhlu nakroucení je vysoce nelineární. Pro každé soustrojí existuje určitý limit, kde je zvýšení úhlového rozdílu doprovázeno snížením přenosu energie. Toto zvýšení úhlového rozdílu dále vede k nestabilitám (Robak & Gryzpanowicz, 2015). Pro jakoukoli danou situaci závisí stabilita systému na tom, zda odchylky v úhlových polohách rotorů vedou k dostatečným obnovovacím momentům tak, aby došlo k vyrovnání potenciálně nebezpečných stavů.

3.4 Řešení stability elektrických distribučních sítí

Problém stability energetické soustavy je dnes široce diskutován zejména v souvislosti s OZE. Pro řešení stability sítě je možné využít řadu přístupů, případně jejich kombinaci. V současné době je stabilita sítě řešena především pomocí následujících přístupů: monitoring a modelování (predikce) chování distribuční sítě ve velkých oblastech (např. státy), vylepšování řídicích systémů a strategií, stejnosměrné sítě a sledování a analýza vlivu setrvačných hmot.

V řadě publikací věnujících se stabilitě sítí souvisejících s podílem OZE lze identifikovat problémy s přesností standardních řídicích systémů, které jsou optimalizovány na základě poznatků a provozních zkušeností s klasickými zdroji obsahujícími setrvačné hmoty (točivé stroje) (Poolla, Bolognani, & Dörfler, 2016; Ulbig, Rinke, Chatzivasileiadis, & Andersson, 2013). V případě širokého nasazení FV článků však dochází k absenci setrvačných hmot v systému. Tyto setrvačné hmoty mohou působit jako tlumící prvek pro oscilací způsobených výkonovými fluktuacemi.

K výkonovým fluktuacím v případě FV článků může docházet například při přechodu členité oblačnosti nad FV instalací nebo volbou nepříznivé regulační strategie řízení dodávaného výkonu.

FV články nejsou jediným zástupcem zdroje bez setrvačných hmot. Dalším zástupcem jsou například větrné elektrárny. Ty z důvodu synchronizace několika větrných turbín, v rámci jedné větrné farmy, nejdříve dodávaný elektrický proud usměrňují a následně pomocí střídačů mění na střídavý. Střídavý proud je následně dodáván do sítě. Tento přístup umožňuje snadnější regulaci. Řízení rychlosti otáčení rotoru větrné turbíny se ukázalo jako velmi komplikované, zejména s ohledem na dynamiku větru. Pokud je tedy využíván princip usměrnění a rozstředání, není nezbytné, aby všechny větrné turbíny měly synchronizované otáčky napříč celou větrnou farmou.

3.4.1 Modelování distribučních sítí

Sestavování a ověření různých modelů distribuční sítě, ať už komplexních nebo zaměřených na jeden určitý trend (Moraco, Tavares, Geraldi, & Ramos, 2016; Seppanen, Au, Turunen, & Haarla, 2017), je v dnešní době velmi široce diskutované. Většina modelů se soustředí zejména na komplexnost celého systému. Komplexnost celého systému je však cena za silné zjednodušení v podobě linearizace, případně opomenutí určitých vlivů, například vyšších harmonických funkcí. Většina těchto výzkumů tvoří model na základě určitých poznatků v lokální omezené síti a následně se tyto modely pomocí sady měření snaží zasadit do kontextu topologicky rozsáhlých distribučních sítí.

Výsledkem studií uvedených výše jsou exaktní popisy/rovnice popisující aktuální stav systému jako celku. Bohužel ani změnou kalibrace však následně nejsou tyto modely schopny poskytovat relevantní výsledky, například při připojení dalších zdrojů zanášejících do systému specifické chování (např. OZE) (Hungerford, Bruce, & MacGill, 2019).

Dalším aspektem těchto modelů je to, jakým způsobem jsme schopni je integrovat do existujících řídicích systémů. Zde budeme vždy omezeni požadavkem na vysokou přesnost modelu a nízké výpočetní nároky na vyhodnocení modelu, abychom byli schopni poskytnout příslušné predikce chování celého systému.

3.4.2 Analýza elektromechanických oscilací

Silná pozornost je v dnešní době věnována analýze elektromechanických oscilací. (Poolla et al., 2016; Ulbig, Borsche, & Andersson, 2014) Jinak řečeno jedná se o oscilace vyvolané působením setrvačných hmot, například rotorů generátorů. Výše uvedené studie jsou zaměřeny na vliv setrvačných hmot fluktuace (frekvence, napětí) energetického systému - dodávek elektrické energie.

Problém nestability distribuční soustavy v souvislosti se setrvačnými hmotami je velmi úzce spjatý se zvyšujícím se podílem OZE (Fernández-guillamón, Gómez-lázaro, Muljadi, & Molina-garcía, 2019; Nikolic & Negnevitsky, 2019). Jak jsme již zmiňovali výše, některé OZE neobsahují setrvačné hmoty a jsou tak pouze řízeny výkonovou elektronikou. Setrvačné hmoty se tak stávají v distribučním systému velmi závislé na čase a často jsou velmi redukovány napříč celou topologií distribuční sítě. Tato redukce souvisí zejména s preferencí dodávek/odkupu elektřiny vyrobené z OZE.

Ve studii (Poolla et al., 2016) je představena analýza distribuční sítě s využitím tzv. virtuální setrvačné hmoty umístěné do distribučního systému ke zvýšení stability (snížení výkonových fluktuací). Využití virtuální setrvačné hmoty pak umožňuje provést aplikace na větší okrsky a tím provést komplexnější optimalizaci.

Pro náš výzkum je klíčová studie (Ulbig et al., 2013), kde je znovu analyzován vliv setrvačné hmoty na frekvenci distribuční sítě. Velmi zajímavá je pak část, která se věnuje "Inertia Mimicking (IM)", což je strategie, která umožňuje zdrojům připojeným přes invertory rapidně měnit jejich výkonový výstup. To se děje pomocí vnějších nebo vnitřních zdrojů tak, aby se navodila dynamická odezva klasických otáčivých strojů (generátorů) na frekvenční změny. Výsledné rovnice jsou pak implementovány do predikčních modelů, aby bylo možné v reálném čase predikovat budoucí stavy distribuční soustavy.

3.4.3 Vysokonapět'ové stejnosměrné sítě - High Voltage Direct Current (HVDC)

Tato kapitola je zaměřena na popis HVDC, která by mohla poskytovat jisté řešení nestabilit vznikajících v distribuční soustavě, zejména díky absenci střídavých proudů a napětí. Systémy HVDC mají velký potenciál zejména v oblasti přenosu elektřiny na velké vzdálenosti (Alassi, Bañales, Ellabban, Adam, & MacIver, 2019).

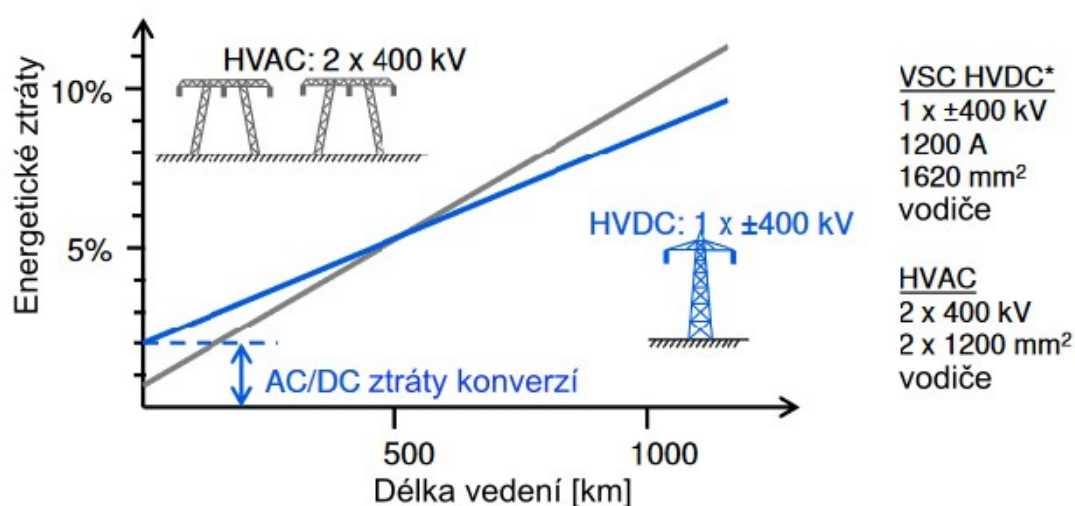
V posledních několika letech vzniklo několik instalací, zejména v Číně. Tyto sítě však musí mít zcela oddělenou infrastrukturu od klasického vedení.

Problémy pro střídavé sítě, které by bylo možné řešit pomocí HVDC, vznikají zejména v důsledku rostoucího podílu výroby energie z OZE, který zvyšuje úroveň fluktuací a nepředvídatelnosti v provozu elektrické sítě. Tento aspekt souvisí se zvýšenou potřebou rezervního výkonu pro vyrovnávání výkonových toků, což bude vyžadovat pružnější řízení.

HVDC může najít velmi dobré uplatnění v oblasti dislokovaných obnovitelných zdrojů, například na moři, odkud je následně nezbytné přivést elektřinu k místu spotřeby. Dnes je poměrně běžné, že se vyrobený elektrický proud, například z větrných elektráren, nejdříve usměrní, kvůli zajištění synchronizace a následně se před připojovacím bodem opět rozstřídá a vyvede do distribuční sítě (Li, Liu, Fan, & Tian, 2020). Tato konverze má však velké negativum v podobě ztrát na výkonové elektronice.

Na systémy HVDC lze pohlížet hned z několika důvodů. Typické důvody jsou stabilita a menší ztráty. Na druhou stranu můžeme také uvažovat o environmentálních aspektech, jako je zábor půdy v případě nadzemních vedení.

Pokud vezmeme v úvahu střídavý AC kabel (délka > 50 km), většina AC proudu je potřebná k nabití a vybití kapacity kabelu. V případě nadzemních vedení (délka > 200 km) je většina střídavého napětí použita k překonání délky (indukčnosti) vedení. Grafické porovnání AC a DC vedení je na Obr. 12 (zdroj: obchodní materiály společnosti ABB).



Obr. 12: Energetické ztráty v porovnání s délkou vedení u stejnosměrných (HVDC) a střídavých sítí (HVAC)

Zdroj: Obchodní materiály společnosti ABB

4 Teoretické pozadí řešení problematiky

Obvykle je distribuční síť modelována na základě elektrotechnických souvislostí. Tento přístup je běžně používaný a na něm založené modely jsou i běžně implementovány v řídicích systémech (Trentini, Kutzner, & Hofmann, 2016). V současné době se tato oblast stále více zaměřuje na vývoj a implementaci chytrých algoritmů. V takových modelech jsou některá dílčí vylepšení, která přispívají ke komplexnosti řešení. Jedná se například o modely pro prediktivní řízení. V několika posledních letech se však objevují stále sílící diskuse o vlivu setrvačných hmot mechanických součástí distribuční soustavy na její stabilitu (Theodor, Theodor, & Borsche, 2015). Jedná se například o rotory generátorů, spojky, turbínové rotory - větrné, parní.

Pokud chceme analyzovat distribuční soustavu jako celek, musíme uvažovat o chování jak mechanické strany systému, tak elektrické strany systému. Energetická výroba v ČR stále stojí zejména na tradičních zdrojích, které pohánějí točivé stroje (generátory). Příspěvek setrvačných hmot generátorů je klíčovou vlastností rotujících synchronních generátorů. Díky elektromechanickému propojení poskytují setrvačné hmoty generátorů kinetickou energii, která je přeměněna na elektrickou a dodávána do sítě. Tato vazba funguje i naopak, tudíž v případě odchylky frekvence v systému může být tato energie absorbována soustrojím zpět, což se projeví jako nekonzistence chodu generátoru.

Nejdůležitějším parametrem indikujícím stabilitu střídavého výrobního a distribučního systému je síťová frekvence. Frekvenční stabilita a související stabilita provozu dílčích prvků (generátorů) závisejí na bilanci aktivního výkonu, to znamená, že celkový dodávaný výkon minus spotřebovaný výkon včetně systémových ztrát musí být udržován co nejbližší nule. Oscilace síťové frekvence je pak velmi úzce spjata s oscilací tzv. synchrofázoru.

4.1 Definice synchrofázoru

Synchrofázor je termín užívaný k popisu fázoru, který byl určen v okamžitém čase označovaném jako časová značka synchrofázoru. Aby se dosáhlo simultánního měření fázorů v široké oblasti energetického systému, je nutné synchronizovat tyto časové značky, takže všechna měření fázorů patřících ke stejné časové značce jsou skutečně simultánní.

Nyní uvažujme čistě sinusový průběh podle dané rovnice:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

kde ω je úhlová rychlost signálu v radiánech za sekundu a φ je fázový úhel v radiánech. X_m je maximální amplituda signálu. Střední kvadratická hodnota (RMS) výstupního signálu je $(X_m/\sqrt{2})$. Zde jsou RMS hodnoty prakticky užitečné pro výpočet činného a jalového výkonu ve střídavých obvodech.

Rovnice (2) může být přepsána jako:

$$x(t) = \Re \left\{ X_m e^{j(\omega t + \varphi)} \right\} = \Re \left\{ [e^{j\omega t}] X_m e^{j\varphi} \right\} \quad (3)$$

což je standardní rozšíření o výraz $e^{j(\omega t)}$ s pochopením, že frekvence souvisí s úhlovou rychlostí ω . Sinusoida v rovnici (2) je reprezentována komplexním číslem X , což vede na samotnou reprezentaci fázoru:

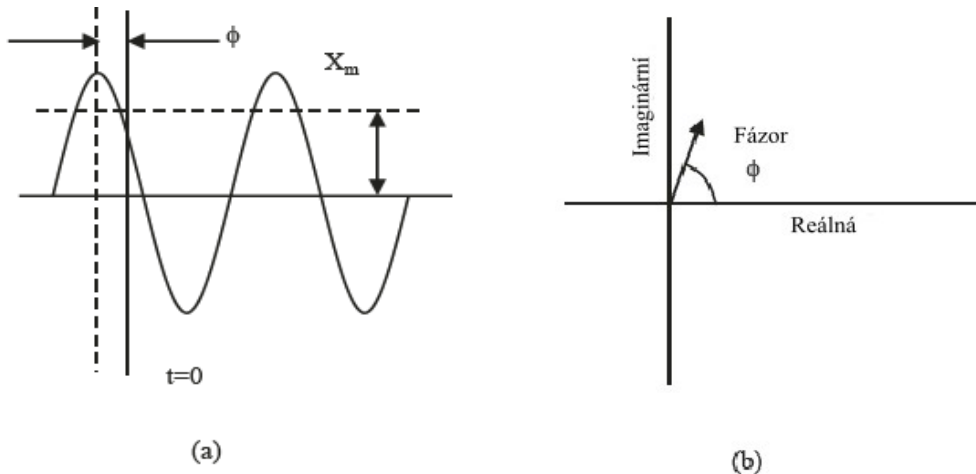
$$x(t) \leftrightarrow X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}} \right) e^{j\varphi} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}} \right) [\cos \varphi + j \sin \varphi] \quad (4)$$

Sinusoida a její reprezentace fázoru je znázorněna na Obr. 13 (Phadke & Thorp, 2008).

Uvedená reprezentace fázoru byla popsána jako čistá sinusoida. Ve skutečnosti je však trend zašuměn jinými signály o jiných frekvencích. Na základě této skutečnosti je nezbytné extrahovat jednoduchý frekvenční trend (obvykle hlavní frekvence, která nás v analýze zajímá) a poté ji reprezentujeme fázorem. Extrakce jedné frekvenční složky se často provádí výpočtem pomocí Fourierovy transformace. Ve vzorkovaných data setech se obvykle přechází na diskrétní Fourierovu transformaci (DFT) nebo rychlou Fourierovu transformaci - Fast Fourier Transformation (FFT).

Ve všech praktických případech je však možné zvážit pouze část měřeného úseku, během kterého je sledováno chování fázoru. Toto časové rozpětí je také známé jako "datové okno" a je velmi důležité při odhadu chování fázoru v měřených průbězích.

Pro sledování chování fázoru v reálném čase se používají tzv. PMU (Phasor Measurement Units) jednotky, které jsou schopné zaznamenávat chování fázorů v reálném čase. Tyto jednotky jsou pak umístěny v jednotlivých uzlech distribuční sítě. PMU jednotky jsou mezi sebou navzájem propojeny tak, že je možné sledovat pootočení fázorů mezi těmito uzly. PMU jsou však využívány zejména operátory přenosové soustavy a takto získaná data jsou využívána k regulaci přenosové soustavy. Tato předkládaná práce je však cílena zejména na omezené okrsky distribuční soustavy.



Obr. 13: Ad a) sinusoida a její reprezentace fázoru, ad b) fáz. úhel fázoru je libovolný, závisí na volbě osy $t = 0$. Délka fázoru se rovná střední kvadratické hodnotě sinusoidy.

Zdroj: (Phadke & Thorp, 2008)

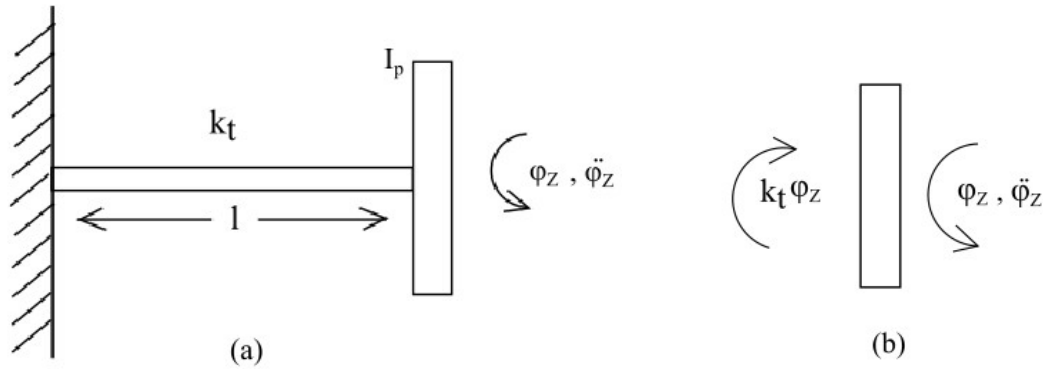
4.2 Mechanická analogie - torzní vibrace

Abychom lépe porozuměli pojmu "elektro-mechanické" oscilace je níže v této kapitole dále přiblížena mechanická analogie k natáčení fázoru. Tato analogie bude demonstrována nejdříve na mechanickém systému s jednou setrvačnou hmotou a následně na systému s více setrvačnými hmotami. Tyto setrvačné hmoty si můžeme představit jako rotory generátorů a hřídele jako elektrické vedení.

4.2.1 Jednohmotový torzní systém

Níže je popsán jednoduchý torzní systém s jednou setrvačnou hmotou. Model elektrické soustavy by byl následně tvořen "n" takovými setrvačnými hmotami, což bude popsáno v následující kapitole.

Na Obr. 14 (Lalanne, 2014) je znázorněn jednoduchý torzní systém. Hřídel je uvažována jako nehmotná a poskytuje pouze element torzní tuhosti. Disk je považován za pevný, tudíž nemá žádnou pružnost. Pokud je disku v torzním režimu uděleno specifické natočení (kolem axiální osy), tak disk začne kmitat volnými kmity.



Obr. 14: (a) jednohmotový vetknutý rotorový systém, (b) uvolněný disk

Zdroj: (Lalanne, 2014)

Pokud se rotor na Obr. 14 začne otáčet nominální rychlostí ω dojde k vývoji torzních vibrací $\varphi_z(t)$, díky tomu je aktuální úhlová rychlost $\omega + \dot{\varphi}_z(t)$. Je třeba poznamenat, že úhlová rychlost ω zůstává stejná, nicméně úhlové natočení se díky torznímu kmitání mění, zejména jeho směr. Pro tento případ se předpokládá, že torzní vlastní frekvence nezávisí na rychlosti kmitání rotoru. Proto v omezujícím případě, když je rychlost kmitání nulová, bude vlastní frekvence nekmitajícího rotoru stejná jako při jakékoli jiné rychlosti. Volné kmitání bude jednoduchý harmonický pohyb s jedinečnou frekvencí, která se nazývá vlastní torzní frekvencí rotorového systému.

Z teorie torzního kmitání pak dostáváme (Timoshenko, MacCullough, & Young, 1968):

$$k_t = \frac{T}{\varphi_z} = \frac{GJ}{l} \quad \text{kde } J = \frac{\pi}{32} d^4 \quad \text{pro kruhový hřídel} \quad (5)$$

kde k_t je torzní tuhost hřídele, T je torzní síla, G je modul pružnosti, I_p je polární moment setrvačnosti disku, J je kvadratický moment plochy průřezu, l je délka hřídele, d je průměr hřídele a φ_z je úhlové posunutí disku (kladný směr je uvažován proti směru hodinových ručiček).

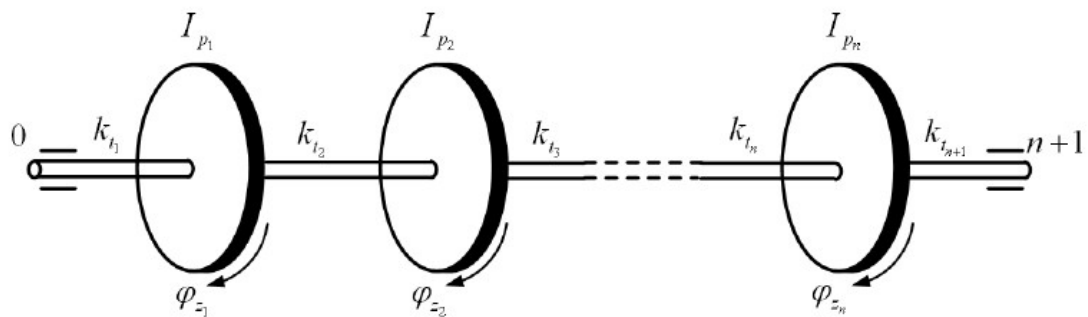
Z uvolněného disku na Obr. 14 b) dostáváme:

$$\Sigma \text{ externího kroutícího momentu} = I_p \ddot{\varphi}_z \Rightarrow -k_t \varphi_z = I_p \ddot{\varphi}_z \quad (6)$$

kde Σ představuje sčítací operátor. Rovnice (6) je pak rovnice pohybu disku při volných torzních vibracích.

4.2.2 Vícehmotový torzní systém

V našem případě, pokud budeme uvažovat analogii k distribuční soustavě, musíme rovněž uvažovat vícehmotový systém. Na Obr. 15 je znázorněn systém s více stupni volnosti. Řešení takového systému pak vede na transformační maticové řešení (Lalanne, 2014).



Obr. 15: Vícehmotový torzní systém

Zdroj: Zdroj: (Lalanne, 2014)

5 Metodika disertační práce

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, většina řešení chování elektrické distribuční sítě spočívá v modelování elektrických bloků. Tím je umožněno, aby byly jako výstup z těchto systémů přímo sledovány elektrické parametry. Tyto přístupy však nezohledňují vliv setrvačných hmot (Moon, Ryu, Lee, & Kook, 2001; Wang & Sun, 2016).

Na distribuční soustavu je nezbytné pohlížet jako na komplexní systém, který obsahuje jak konvenční zdroje energie (uhelné, jaderné, paroplynové...), tak zároveň obnovitelné zdroje energie. Tento systém je pak následně nezbytné modelovat s ohledem na specifickou kombinaci konvenčních a obnovitelných zdrojů energie. FV panely nedisponují žádnými setrvačnými hmotami, a tudíž nemohou poskytovat žádný stabilizační moment pro tlumení soustavy. Velké výkonové výkyvy způsobené obnovitelnými zdroji energie mohou vést k situacím, kdy standardní řídicí strategie nejsou schopny eliminovat potenciálně nebezpečné stavy. Standardní řídicí strategie jsou příliš pomalé s dynamikou výkonových fluktuací. Tyto nevhodné řídicí strategie mohou vést k rozsáhlým výpadkům.

Příklad takového chování je popsán například v (Ulbig et al., 2014), kde je popsána situace v německé distribuční soustavě. V roce 2013 nastala situace, kdy bylo několik hodin do sítě dodáváno více než 50 % celkové spotřeby energie z FVE a větrných turbín. To nám zcela jasně ukazuje, že celková setrvačná hmota H (rotující v distribuční síti) se stává vysoce časově závislou veličinou a může vykazovat značné fluktuace.

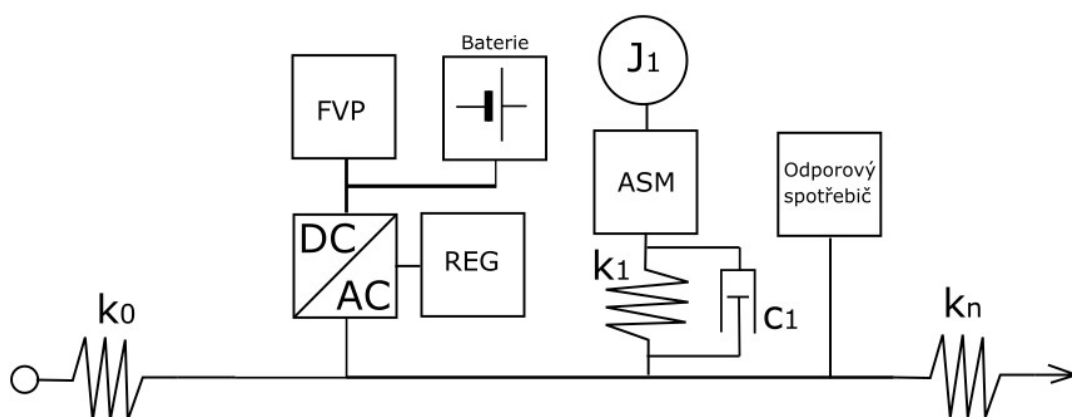
Jak již bylo popsáno výše, existují různé přístupy k tomu, jak pohlížet, měřit, modelovat a regulovat distribuční síť s ohledem na její stabilitu. Tato práce se zaměřuje zejména na omezené okrsky distribuční sítě. Pokud budeme schopni efektivně řídit stabilitu dílčích okrsků, měli bychom docílit stabilní distribuční soustavy jako celku.

5.1 Definice zkoumané oblasti - omezené okrsky distribuční soustavy

Omezeným okrskem se v rámci této práce rozumí okrsek, který disponuje jak vlastními zdroji elektrického proudu, tak spotřebiči a je v případě potřeby schopen pracovat v ostrovním režimu. Přitom nemusí být nutně splněn předpoklad, že okrsek

může pracovat samostatně v ostrovním režimu. Žádoucí je, že přelévání energie by se mělo dít v co největší míře uvnitř okrsku. Dále je žádoucí, aby okrsek navenek vykazoval co největší stabilitu, měl přechodnou charakteristiku vykazující co největší a ideálně i aperiodický útlum fázorů napětí a proudu.

Příklad modelového omezeného okrsku můžeme vidět na Obr. 16, kde jsou znázorněny dva základní zdroje elektrického proudu FVP (fotovoltaické panely) a ASM (asynchronní generátor). Označení "k" definuje mechanické tuhosti elektrické soustavy a "c" koeficient tlumení.



Obr. 16: Schéma omezeného okrsku distribuční sítě s vyznačením mechanických veličin

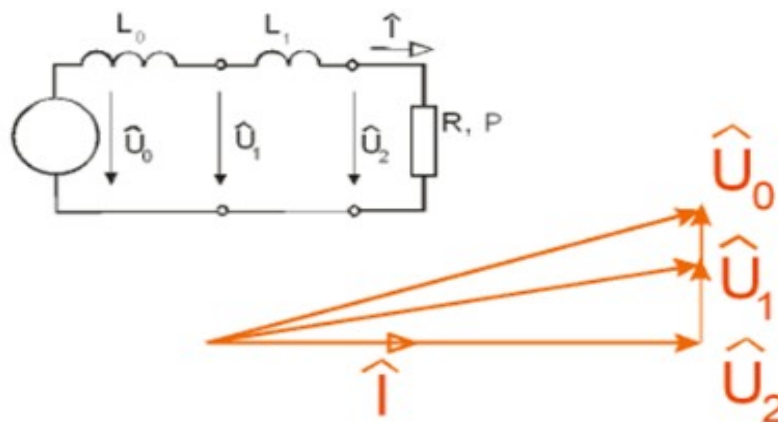
Zdroj: Vlastní zpracování autora

V rámci omezeného okrsku distribuční sítě jsou dílčí prvky tvořeny setrvačnými hmotami točivých elektrických strojů a pružnými členy, které vytváří elektromagnetická pole, jak točivých strojů, tak magnetickými poli přenosových transformátorů a magnetickými poli vedení. Setrvačné hmoty točivých elektrických strojů popisujeme momenty setrvačností J_i jejich rotorů. V elektrických soustavách se vedle setrvačností točivých strojů mohou objevovat také fiktivní setrvačnosti J_f , tvořené měniči zprostředkovávajícími řízený přenos energie s nějakým jiným zásobníkem energie, např. kondenzátorem nebo galvanickými články (akumulátory). Pružící magnetické pole elektrických strojů a vedení můžeme reprezentovat jejich indukčnostmi.

Jestliže prochází indukčností elektrický proud sinusového časového průběhu, vznikne na ní úbytek napětí, jehož sinusový průběh předbíhá sinusový průběh proudu. Nejlépe to vyjádříme fázorovým diagramem podle Obr. 17.

Reaktance velkých točivých strojů, velkých transformátorů a vedení mají převažující induktivní složku. Zanedbejme reálnou složku pro naši úvahu. Při těchto

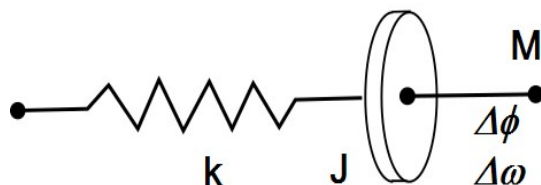
předpokladech z Obr. 17 vidíme, že zatěžování činným výkonem vede k natáčení a zpoždění výstupního fázoru napětí oproti fázoru vstupnímu. Pokud je úbytek napětí na indukčnostech malý, trojúhelník má malý úhel a změny absolutní velikosti napětí jsou zanedbatelná.



Obr. 17: Zjednodušený elektrický model soustavy, bez ohmických odporů - indukčnost při přenosu činného výkonu způsobuje fázový posuv

Zdroj: Vlastní zpracování autora

Na základě této úvahy můžeme podstatně zjednodušit řešení úlohy podle Obr. 17 tím, že činné zatížení bude v modelu způsobovat jen pootočení fázorů napětí, přičemž pokles velikosti napětí zanedbáme jakožto nepodstatný (jen pro náš zjednodušený model). Pak můžeme pracovat s mechanickým modelem, ve kterém přenosem výkonu dochází ke zkrucování pružícího hřídele s konstantou tuhosti k , která reprezentuje tuhost magnetických polí v soustavě. Doplníme-li mechanické a náhradní momenty setrvačnosti dostáváme elementární článek modelu podle Obr. 18.



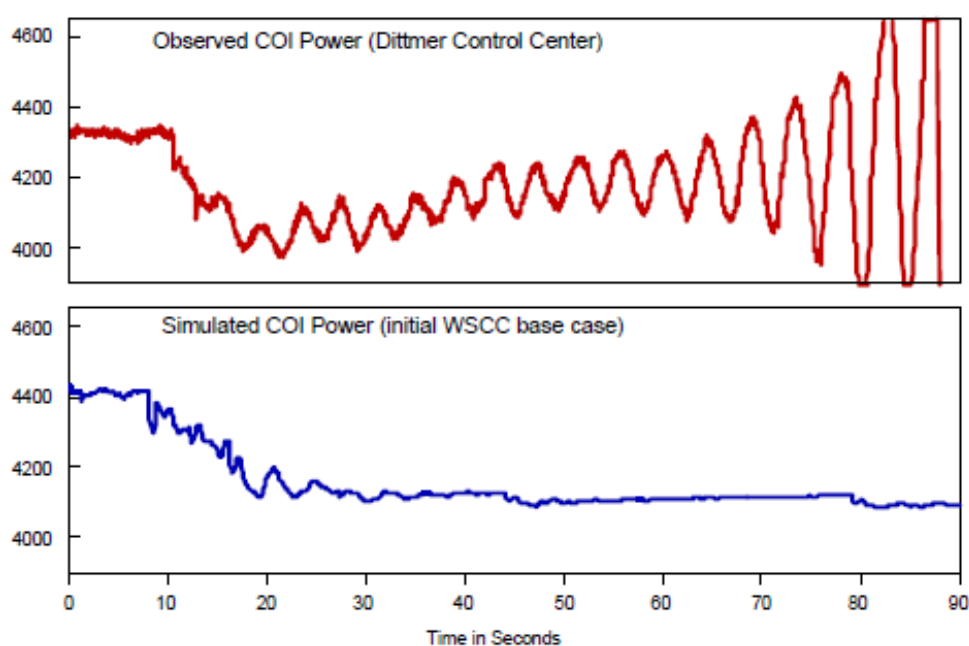
Obr. 18: Základní element mechanického modelu elektrické rozvodné soustavy

Zdroj: Vlastní zpracování autora

5.2 Spektrální analýza systému - specifikace řešené oblasti

Na Obr. 19 je uveden příklad měření výkonových charakteristik na síti. Jedná se o závislost COI (Center Of Inertia) výkonu na čase. COI - střed setrvačného

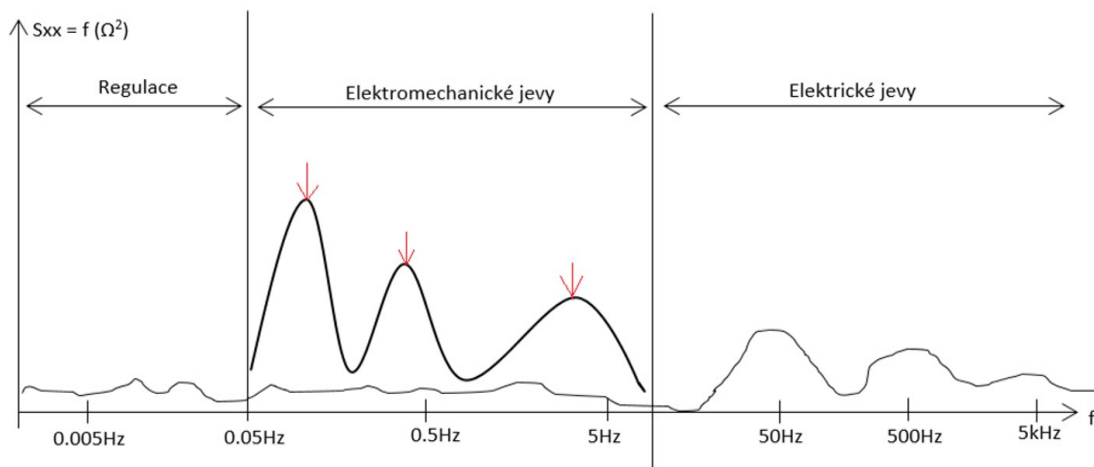
výkonu se v odborné literatuře používá pro definici výkonu systému při přechodných podmínkách. Pokud se všechny generátory výkonově ustálí, je ustálen i měřený výkon v daném měřicím bodě. Na Obr. 19 můžeme vidět nahoře charakteristiku měřenou pomocí PMU (Phasor Measurement Unit) a dole je znázorněn výstup predikčního modelu. Příklad nefunkčnosti predikčního modelu, jehož nepřesnost vedla k plošnému výpadku energie pochází z analýzy NERC (Nord American Electric Reliability Corporation). Na základě závěrů uvedených v závěrečné zprávě vypracované NERC (Patel, Aivolaitas, & Allen, 2010) a poznatků uvedených v odborné literatuře (Grigsby, 2017) byla sestavena spektrální charakteristika, která vymezuje oblast zájmu této práce viz Obr. 20.



Obr. 19: Nahoře simulace COI výkonu, dole měření COI výkonu (WSCC - Western System Coordinating Council)

Zdroj: (Patel, Aivolaitas, & Allen, 2010)

Spektrální charakteristika Obr. 20, kde je znázorněna závislost spektrální hustoty na frekvenci, je rozdělena do tří částí. Pro frekvence pod 0.05 Hz se jedná o výchylky související s řídicím systémem. Pro frekvence mezi 0.05 Hz až asi 5 Hz se jedná o výchylky způsobené elektromechanickými oscilacemi. U frekvencí nad 10 Hz se jedná o výchylky způsobené čistě elektrickými jevy. Tato práce je soustředěna výhradně do oblasti elektromechanických oscilací a přispívá k řešení problematiky související zejména s mechanickou částí systémů pro výrobu elektrické energie.



Obr. 20: Příkladná spektrální charakteristika oscilačních jevů v distribuční soustavě
Zdroj: Vlastní zpracování autora

5.3 Elektromechanické jevy - setrvačné hmoty v distribuční síti

Níže je popsána základní teorie, jak popsat chování systému a jeho odezvu na rotační energii (rotující hmota generátoru). Rotační energie uložená v rotujících hmotách synchronních generátorů může být popsána jako:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J (2\pi f_m)^2 \quad (7)$$

kde J je moment setrvačnosti a f_m je frekvence otáčení. Setrvačná konstanta H stroje je definována jako:

$$H = \frac{E_{kin}}{S_B} = \frac{J (2\pi f_m)^2}{2 S_B} \quad (8)$$

kde S_B označuje jmenovitý výkon generátoru a H označuje čas, po který je stroj schopný dodávat jmenovitý výkon pomocí uložené kinetické energie. Typické hodnoty H se pohybují v rozmezí 2-10 s. (Ulbig et al., 2014)

Energetický model a analýza synchronního generátoru odhalují odezvu setrvačnosti jako změnu v frekvence f_m otáčení nebo změnu úhlové rychlosti $\omega_m = 2\pi f_m$. Výkonová nerovnováha může být tudíž popsána jako:

$$\dot{E}_{kin} = J (2\pi)^2 f_m \dot{f}_m = \frac{2H S_B}{f_m} \dot{f}_m = (P_m - P_e) \quad (9)$$

kde P_m je mechanický výkon dodávaný generátorem a P_e je požadavek elektrické energie.

Toto je základní příklad vlivu rotačních hmot na kinetickou energii.

5.3.1 Kyvná rovnice (orig. Swing Equation)

U synchronního stroje je hlavním hnacím parametrem mechanický kroučící moment T_m na hřídeli stroje, přičemž stroj produkuje rovněž elektromagnetický kroučící moment T_e . V případě jakéhokoliv vzruchu se dostáváme do situace, kdy je mechanický moment větší než elektromagnetický kroučící moment. Zrychlující moment je tedy pak:

$$T_a = T_m - T_e \quad (10)$$

Rovnice výše neuvažuje kroučící moment vynikající ztrátami (třením, ztrátami v železe, na ložiscích...). T_a má účinek na zrychlující stroj, jež má moment setrvačnosti J [kg · m²] tvořený setrvačností generátoru a hlavního pohonu, a proto:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (11)$$

kde t je čas v sekundách a ω_m [rad/s] je úhlová rychlost rotoru stroje. Je běžnou praxí vyjádřit rovnici (11) pomocí setrvačné konstanty H stroje. Pokud je ω_{0m} jmenovitá úhlová rychlost v rad/s, tak moment setrvačnosti J může být vyjádřen jako:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} = V A_{base} \quad (12)$$

dále pak:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} V A_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (13)$$

Nyní, pokud úhlovou rychlost rotoru označíme ω_r (rad/s) a ω_0 bude její nominální hodnota, můžeme rovnici (13) přepsat jako:

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (14)$$

Nakonec tedy platí, že:

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{\omega_0 dt^2} \quad (15)$$

kde δ (rad) je úhlové pootočení rotoru vzhledem k synchronně se otáčejícímu referenčnímu rámu.

Kombinací rovnic (14) a (15) obdržíme tzv. kyvnou rovnici. Kyvná rovnice nese svůj název proto, že popisuje kývání rotorového úhlu δ během narušení synchronismu:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (16)$$

Aby byl systém během rušení přechodně stabilní, tak je nezbytné, aby úhel rotoru oscilloval (vztah byl popsán kyvnou rovnicí) kolem rovnovážné polohy. Pokud bychom úhel rotoru zvyšovali do nekonečna, tak bude generátor přechodně nestabilní, protože se bude zrychlovat a nedosáhne nového rovnovážného bodu. V soustrojích s více generátory dojde k narušení synchronismu spolupracujících soustrojí.

Mechanické rotační stroje, alternátory a motory, popsané kyvnou rovnicí (16) jsou dosud v energetické soustavě naprosto převažující, proto určují stabilitu soustavy, a je třeba při určování celkové dynamické stability z jejich popisu vycházet. Jiné zdroje a spotřebiče, jako FVE, mají dynamické chování určené použitým regulátorem dodávaného / spotřebovaného činného / jalového výkonu a mohou mít i jiné dynamické chování, které při správném nastavení může celkovou stabilitu zlepšovat. Například aktivní filtry s vlastním akumulátorem energie u nichž je rychlé řízení umožňující injektování okamžitého výkonu v měřítku zlomku milisekund, prakticky v rámci 20 ms síťové periody. Takové aplikace se zatím objevují jen v omezené míře. Je zajímavé, že většina současných aplikací používá pro řízení výkonů klasický lineární PID regulátor, který energetickému celku připojenému k rozvodné síti zbytečně dává dynamické chování podobné rotačním soustrojím.

6 Vlastní výsledky

Jak již bylo zmiňováno v úvodních kapitolách, pro posouzení aktuálního stavu, stejně tak pro predikci chování je nezbytné provádět průběžný monitoring energetických zdrojů. V případě diagnostiky potenciálně nebezpečných stavů provozovaných zdrojů není bohužel provozní měření dostačující.

Vedle výkonových charakteristik je rovněž nezbytné monitorovat technický stav zařízení jako takového. Například fyzický monitoring fotovoltaických panelů, technická prohlídka mechanických součástí generátorů apod.

6.1 Monitoring výkonových charakteristik

Pro monitoring výkonových charakteristik energetických zdrojů byla vyvinuta metoda pro rychlé měření a záznam aktivního výkonu, jalového výkonu a dalších charakteristik.

Pro tato měření byl navržen a sestaven analogový převodník (wattmetr), kterým může být vybaven jakýkoliv energetický zdroj pro dlouhodobé monitorování jeho chodu. Převodník je navržen pro tři fáze. Hlavním účelem navrženého převodníku je měřit dynamické chování jak konvenčních, tak obnovitelných zdrojů a jejich vliv na distribuční soustavu se zvláštním zaměřením na stabilitu. Výsledky měření výkonových charakteristik včetně popisu statistické analýzy dat byly publikovány v článku (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

Cílem vyvinutého převodníku bylo odstranit omezující prvky provozních měření energetických zdrojů. Jedná se zejména o nedostatky digitálního měření. Při použití digitální metody pro měření výkonových charakteristik jsme naráželi na problémy související se správnou volbou vzorkovací frekvence. Volba vzorkovací frekvence je velmi důležitým aspektem, pokud chceme do měření zahrnout rovněž sledování vyšších harmonických funkcí, které jsou při měření představovány deformacemi a zvlněním sinusových průběhů napětí a proudů.

Pokud budeme předpokládat, že frekvence distribuční soustavy je 50 Hz, pak je doporučení pro provozní měření volit frekvenci vzorkování jako dvaceti násobek síťové frekvence tudíž 1 kHz (Machowski, Jan; Lubosny, Zbigniew; Bialek, Janusz W; Bumby, 2020).

Frekvence 1 kHz je pro většinu případů příliš nízká, zejména pokud chceme sledovat vyšší harmonické funkce v případě polovodičových střídačů běžně

užívaných u fotovoltaických instalací. Při nesprávném nastavení vzorkovací frekvence můžeme rovněž narazit na interferenci vzorkovací frekvence a sledovaných trendů. Volbou vysokých vzorkovacích frekvencí například 10 kHz bychom sice odstranili výše uvedené nedostatky, nicméně bychom neúměrně zvyšovali požadavky na výpočetní hardware a úložné kapacity. Digitální technologie měření s dostatečnou přesností je tedy poměrně výpočetně náročná a tudíž je velmi obtížné pro zpracování dat využívat standardní malé PLC (Programmable Logic Controller - programovatelný logický automat). Možným řešením tohoto problému by tedy bylo přejít na měření pomocí DSP (Digital Signal Processor). Při použití této technologie se již však dostáváme do značného rozporu v porovnání s měřením základního výkonového parametru (činný výkon) a velmi komplexní metodou pro její zpracování. Neopomenutelným parametrem je také pořizovací cena takovéto instrumentace.

Další možností pro měření výkonu je analogová metoda. Analogová metoda je velmi agilní, nákladově efektivní a spolehlivá. Tato metoda je založena na znásobení analogového signálu napětí a proudu pomocí analogové násobičky. Po vynásobení analogových signálů musíme použít analogový filtr. Filtrovaný signál může být připojen k analogovému vstupu společného PLC. Frekvenční rozsah je až 50 kHz pro každý kanál, pokud maximální frekvence není omezena měřícími transformátory.

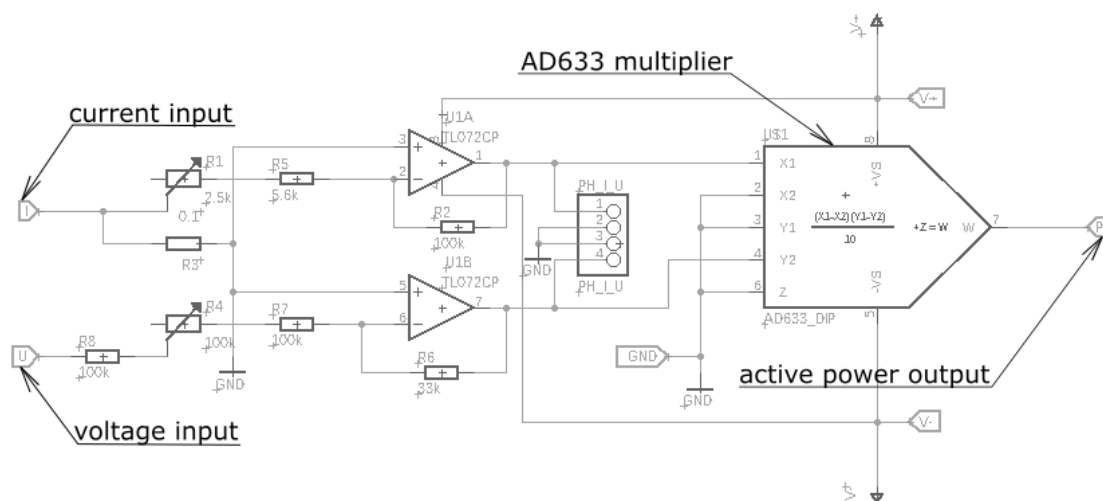
Vedle digitálních a analogových metod, které jsou často používány pro tento druh měření, jsou používány také tzv. PMU (Phasor Measurement Units). PMU umožňují měřit různé jevy v distribuční síti. PMU systémy jsou však investičně velmi náročné. PMU se využívají pro monitoring v uzlech velkých distribučních sítích, kde jsou kombinována data z měření v několika uzlech, pak se jedná o tzv. WAMS (Wide Area Monitoring Systems) systémy. Použití PMU pro monitorování jednoduchých agregátů nebo provozu FVE není nákladově efektivní.

V následující kapitole je popsán návrh vyvinutého převodníku a měřené trendy.

6.1.1 Návrh převodníku - funkční provedení

Měřicí deska/wattmetr má 6 vstupů a 3 výstupy. Vstupy jsou napěťové a proudové signály odpovídajících fází. Výstupem jsou pak činné výkony v jednotlivých fázích a výsledný celkový činný výkon ze tří fází.

Hlavními prvky převodníku jsou tři analogové multiplikátory AD633, na každou fázi jeden. Ty slouží pro násobení napětí a proudového signálu pro získání činného výkonu. Na Obr. 21 je znázorněno schéma navrženého převodníku.



Obr. 21: Schéma měřící větve navrženého převodníku pro jednu fázi
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

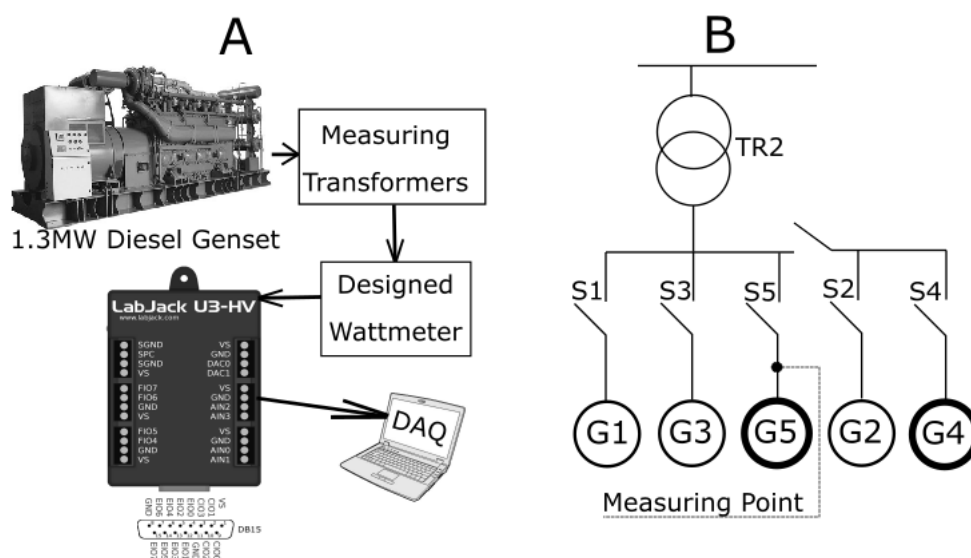
Funkce navrženého převodníku byla testována a ověřena na diesel generátoru se jmenovitým výkonem 1.3 MW. Jmenovitými parametry agregátu jsou napětí 6.3 kV, 1 000 ot/min, 50 Hz a $\cos \phi = 0,8$. Experimentální měření bylo prováděno v záložní napájecí stanici pražského metra na Radlické (trasa B). Podmínky testování byly zvoleny kvůli variabilitě v různých zkušebních stavech (výkon, paralelní provoz atd.).

Na Obr. 22 je znázorněna instrumentace měření. Pohled A znázorňuje schématické připojení navrženého převodníku k měřícím transformátorům a následně k měřící kartě pro záznam a vyhodnocení výsledků. Pohled B je pak schématické znázornění měřícího bodu.

Navržený převodník byl připojen na výstupy měřících transformátorů určených pro provozní měření a monitoring chodu diesel agregátů. Data z převodníku byla následně snímána měřící kartou LabJack U3-HV. Pro sběr měřených dat byl následně použit software LabJack nainstalovaný na laboratorním notebooku. Pro vyhodnocení dat a jejich statistickou analýzu byl následně využit software Matlab. Proudový transformátor má jmenovitý proud primárního vinutí 200 A a sekundárního vinutí 5 A. Maximální zdánlivý výkon pro primární a sekundární vinutí je 10 VA. Jmenovité napětí na primárním vinutí je 6 kV a na sekundárním vinutí je 0,1 kV. Napět'ový transformátor má maximální zatížení sekundárního vinutí 50 VA.

Napětové transformátory jsou v sadě skládající se ze tří transformátorů pro každou fázi a jsou připojeny v zapojení trojúhelník / hvězda.

Na Obr. 22 B je schéma zapojení dieselových agregátů a připojovací bod do sítě. Písmeny G1 až G5 jsou popsány jednotlivé dieselové agregáty. Každý agregát je vybavený stykačem, aby je bylo možné oddělit od ostatních a navíc jsou G2 a G4 odděleny ve své větvi dalším přídatným stykačem.



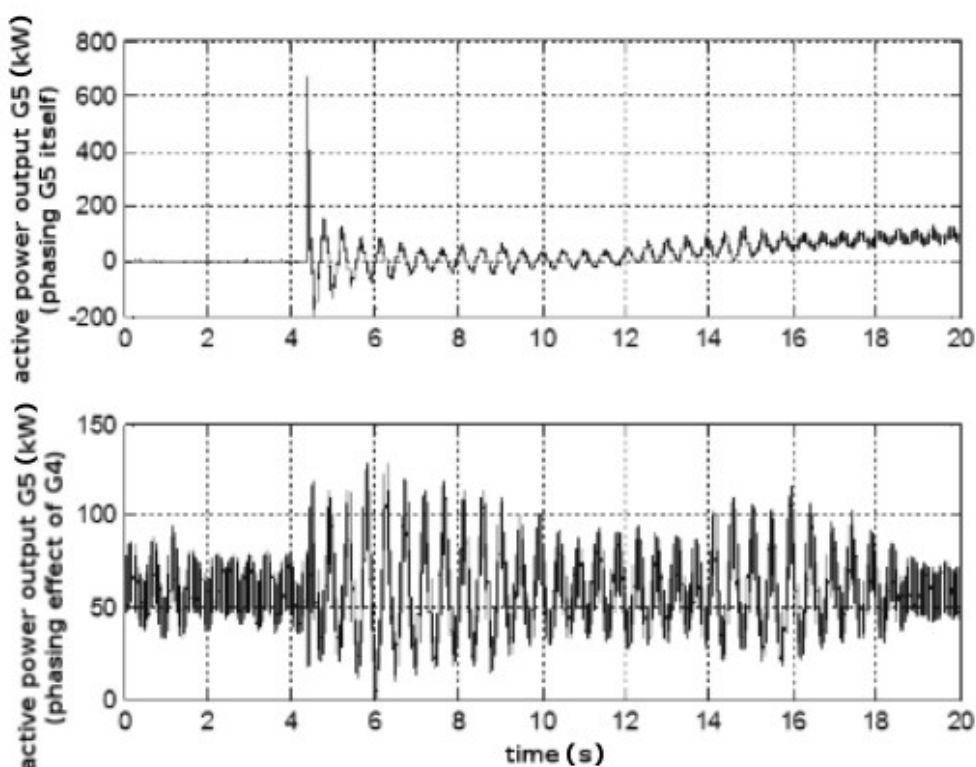
Obr. 22: Pohled A - uspořádání měření, pohled B - umístění měřícího bodu
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

6.1.2 Výsledky měření dynamických charakteristik

Prostřednictvím měření byl získán a vyhodnocen trend na Obr. 23. Znázorněný trend je výsledkem fázování G4 do paralelního provozu s G5. Fázování obou generátorů bylo prováděno při zatížení 100 kW. Abychom ověřili funkčnost navrženého převodníku (záznam dynamických jevů), prováděli jsme fázování G4 s mírným fázovým posunem, takže se generoval výkonový impuls dodávaný do distribuční sítě. Na Obr. 23 tedy můžeme vidět dynamickou odezvu distribuční sítě na fázování G5. Podobné trendy lze pozorovat v přerušované výrobě energie nebo při ztrátě synchronismu, což lze pozorovat v oblasti obnovitelných zdrojů energie (Madruga, Bernardon, Vieira, & Pfitscher, 2018).

Připojení dalšího agregátu G4 k elektrické síti pak způsobilo kmitání v distribuční síti, které je třeba regulovat různými regulačními mechanismy, např. regulací výkonu nebo frekvence (Milligan, 2018). To vedlo k viditelné reakci již nafázovaného G5.

Na Obr. 24 můžeme vidět velmi podobný trend jako na Obr. 23, nicméně s 1 s rozlišením na ose x. Na Obr. 24 můžeme vidět významné fluktuace v případě odezvy G5. Znárodněný stav může být potenciálně nebezpečný, ale jak je z trendu patrné je koeficient tlumení stále dostatečný, takže dochází k zatlumení vzniklých nestabilit.

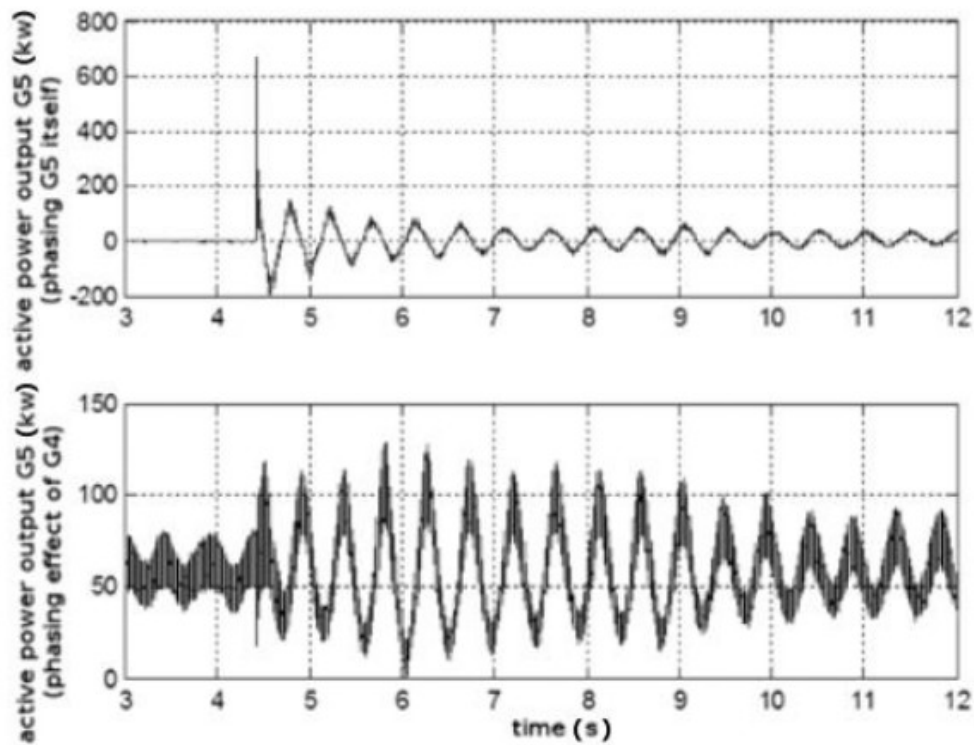


Obr. 23: Sada měření činného výkonu na G5, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti

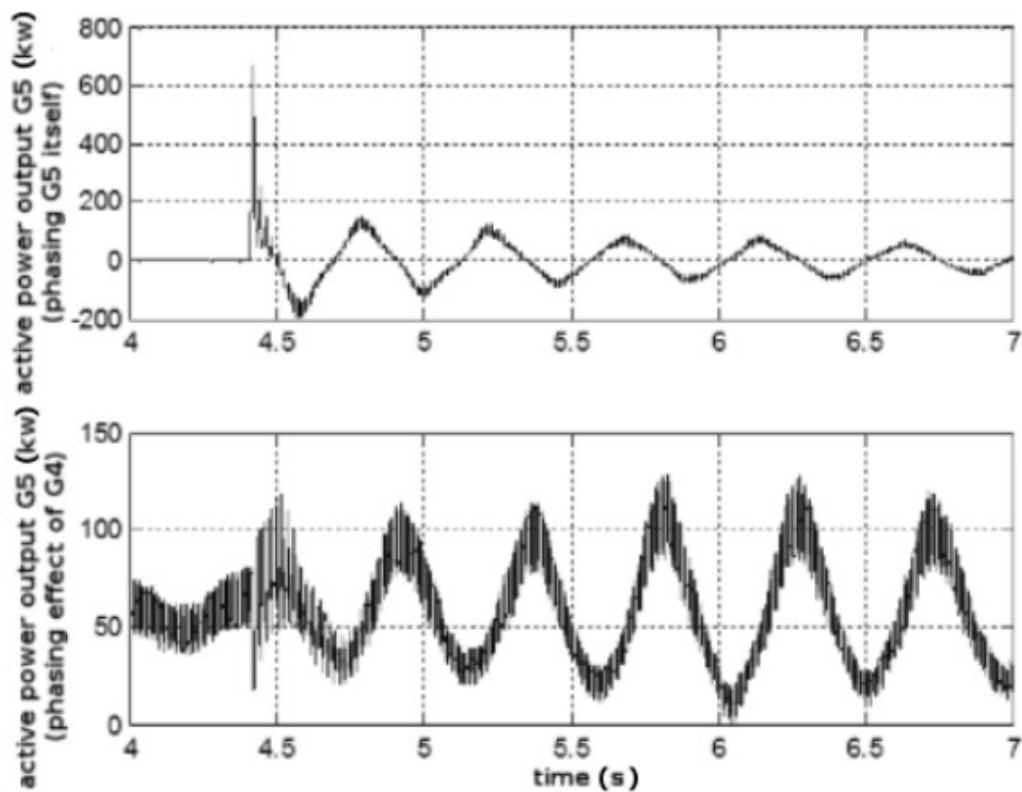
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

Na Obr. 25 můžeme vidět trend s 0.5 s rozlišením, kde je koeficient tlumení příliš malý a s průběhem času nedochází k efektivnímu zatlumení systému. Tento stav je potenciálně nebezpečný a mohl by vést ke ztrátě synchronismu paralelně pracujících generátorů G4 a G5.

Navržený převodník byl s úspěchem vyzkoušen a lze jej použít pro monitorování dynamických jevů vznikajících při provozu energetických zařízení. Výsledky měření byly publikovány na konferenci TAE 2019 (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)



Obr. 24: Sada měření činného výkonu na G5 s rozlišením 1 s, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

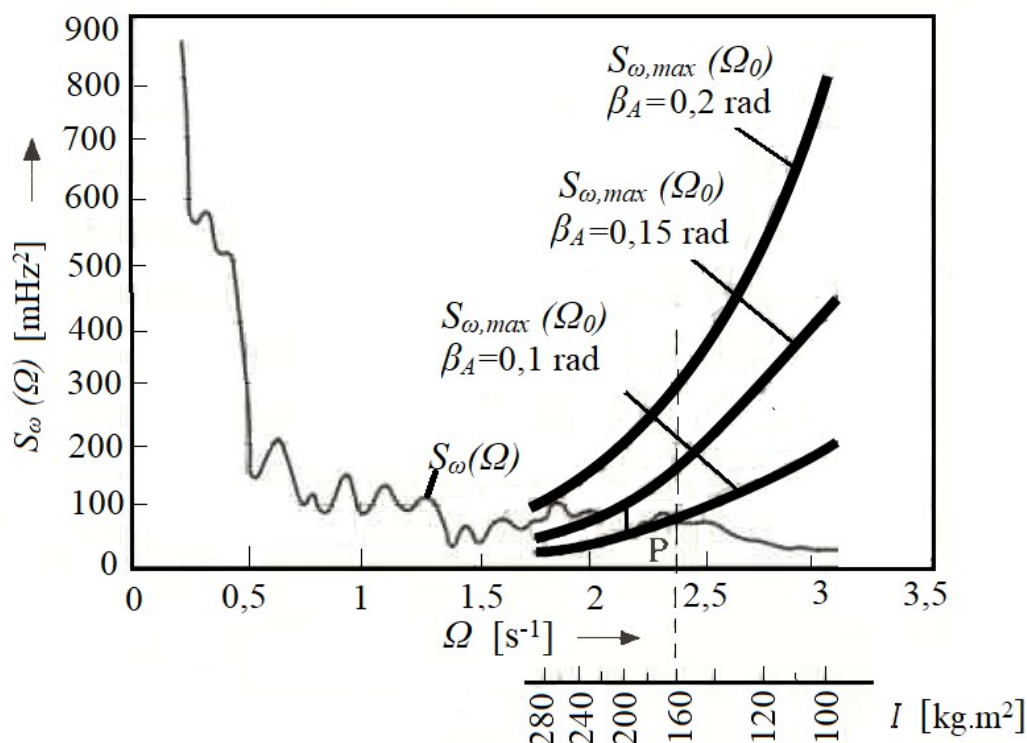


Obr. 25: Sada měření činného výkonu na G5 s rozlišením 0.5 s na ose x, nahoře synchronizace generátoru do sítě, dole odpověď již synchronizovaného stroje G4 běžícího na síti
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2019)

6.1.3 Souvislost setrvačných hmot a frekvenčních oscilací - výpočtová verifikace mechanického modelu

Frekvenční oscilace související se setrvačnými hmotami mohou být popsány pomocí statistické dynamiky s použitím výkonové spektrální hustoty $S_{\omega}(\Omega)$ úhlové frekvence sítě. Příklad této funkce charakterizující frekvenční spektrum distribuční sítě je znázorněn na Obr. 26. Spektrum odchylek síťové frekvence má dvě základní složky:

- pomalé složky pro $\Omega < 2 \text{ s}^{-1}$ jsou dány parametry otáčkové regulace a rovněž celkové frekvenční regulace
- rychlé složky pro $\Omega > 2 \text{ s}^{-1}$ jsou dány pružností energetického zdroje v případě náhlých změn. Tyto složky jsou ovlivněny celkovou velikostí a změnami fázového posuvu okamžitého napětí, které se mění na impedancích distribučního vedení nebo transformátorech v důsledku rychlých výkonových změn v síti, které jsou důsledkem kolísání odběru a zpožděním regulace sítě na náhle zvýšení/snížení odběru.



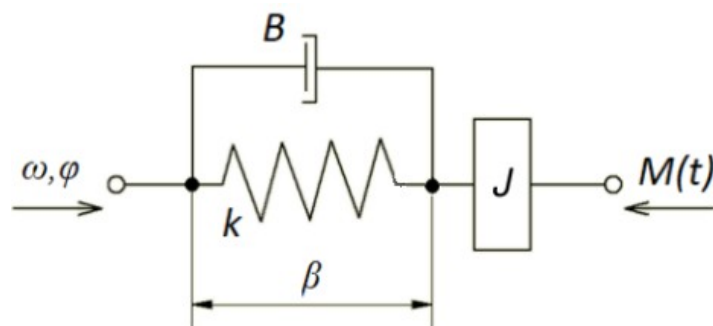
Obr. 26: Oscilační spektrum úhlové frekvence sítě $S_{\omega}(\Omega)$

Zdroj: Vlastní práce autora

Pokud je synchronní stroj, na kterém se otáčejí setrvačné hmoty, náfázován do sítě, tak otáčky hřídele musejí korespondovat s frekvencí, a tudíž jsou mechanické

otáčky velmi úzce spjaty s případnými fázovými změnami. Otáčky hřídele sledují fázi okamžité hodnoty síťového napětí spolu s drobnými odchylkami úhlu, čímž vzniká zátěžový úhel β synchronního stroje. Okamžitá hodnota výkonu spotřebovaná nebo dodaná prostřednictvím stroje do sítě závisí na velikosti a orientaci zátěžového úhlu β . Čím budou větší setrvačné hmoty na hřídeli stroje v porovnání s velikostí synchronního stroje, tím větší budou dynamické odchylky sledující rychlé změny síťové frekvence a tím budou vznikat rovněž oscilace zátěžového úhlu β . Oscilace zátěžového úhlu buzené fluktuacemi síťové frekvence mají téměř harmonický průběh, protože je elektromechanický systém - synchronní stroj a setrvačné hmoty velmi málo tlumen. Tyto oscilace jsou doprovázeny nežádoucím přebytkem energie mezi distribuční sítí a setrvačnými hmotami na hřídeli.

Pro popis elektromechanického systému viz Obr. 27 vyjdeme ze zjednodušeného modelu znázorněného na Obr. 18 a doplníme jej o tlumič, který je reprezentovaný konstantou tlumení B .



Obr. 27: Elektromechanický vibrační set synchronního stroje

Zdroj: Vlastní práce autora

Systém znázorněný na Obr. 27 je popsán diferenciální rovnicí:

$$J(\ddot{\beta}) + B(\dot{\beta}) + k\beta = \frac{J}{P_d}(\dot{\omega}) \quad (17)$$

kde β [rad] je zátěžový úhel synchronního stroje, ω [s^{-1}] je frekvence sítě, J [kgm^2] je celkový moment setrvačnosti připojený k hřídeli, B [Nms] je konstanta torzního tlumení, k [Nm] je torzní tuhost synchronního stroje a P_d počet pólových dvojic synchronního stroje.

Rovnici (17) můžeme pomocí Laplaceovy transformace upravit jako:

$$G(p) = \frac{pJ}{P_d(p^2J + pB + k)} \quad (18)$$

Spektrální výkonová hustota oscilací zátěžového úhlu je pak:

$$S_{\beta}(\Omega) = \lim_{p \rightarrow j\omega} [G(p)]^2 S_{\omega}(\Omega) \quad (19)$$

kde $S_{\beta}(\Omega)$ je spektrální výkonová hustota oscilací zátěžového úhlu a $S_{\omega}(\Omega)$ [s^{-2}] je spektrální výkonová hustota oscilací úhlové frekvence.

Následně tedy můžeme psát:

$$S_{\beta}(\Omega) = \frac{\Omega^2 J^2 S_{\omega}(\Omega)}{P_d [(k - \Omega^2 J)^2 + \Omega^2 B^2]} \quad (20)$$

kde vlastní frekvence systému je Ω_0 [s^{-1}]:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (21)$$

Relativní koeficient tlumení (22) je pro většinu synchronních strojů příliš malý,

$$a = \frac{B}{2\sqrt{kJ}} \quad (22)$$

standardně $a < 0.1$; v těchto případech je rezonance systému velmi selektivní a systém přenáší prakticky jen vlastní frekvenci. Dynamická odezva systému má pak téměř sinusový průběh zátěžové hustoty a kmitá s amplitudou β_A . Z rovnice (20) pak tedy za předpokladu $\Omega = \Omega_0$ vyplývá, že:

$$S_{\beta}(\Omega_0) = \beta_A^2 = \frac{J^2}{P_d^2 B^2} S_{\omega}(\Omega_0) \quad (23)$$

Na základě podrobného popisu můžeme pro každý systém určit maximální přípustné výkonovou spektrální hustotu síťové frekvence, která nesmí být vyšší než $S_{\omega, \max}(\Omega_0)$:

$$S_{\omega, \max}(\Omega_0) = \frac{P_d^2 B^2}{J^2} \beta_A^2 \quad (24)$$

kde $S_{\omega, \max}(\Omega_0)$ je horní limit výkonové spektrální hustoty úhlové frekvence [s^{-2}] distribuční sítě.

Dosazením J z rovnice (21) do rovnice (24) získáme následující vztah:

$$S_{\omega, \max}(\Omega_0) = \frac{P_d^2 B^2}{k^2} \Omega_0^4 \beta_A^2 \quad (25)$$

Nyní můžeme určit maximální velikost setrvačníku tak, aby amplituda oscilací zátěžového úhlu nepřekročila danou hodnotu β_A .

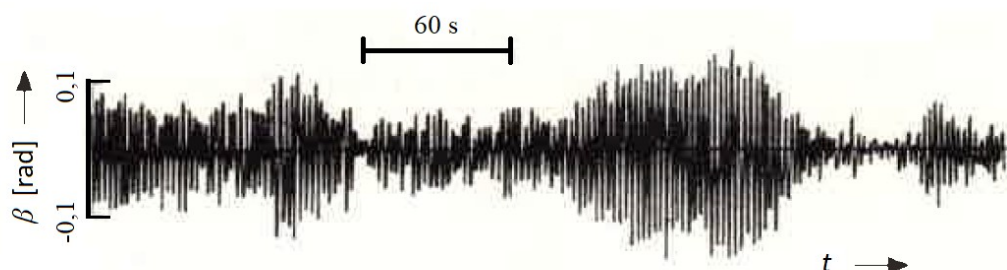
Trendy pro $S_{\omega, \max}(\Omega_0)$ podle rovnice (25) pro zvolené hodnoty β_A (například 0.1 rad, 0.15 rad, 0.2 rad) jsou znázorněné na Obr. 26. Tyto trendy ustanovují limity oscilací výkonových spektrálních hustot úhlové frekvence $S_{\omega, \max}(\Omega_0)$ sítě pro

povolené hodnoty β_A . Trendy horních limitů jsou přizpůsobeny měřítku J podle rovnice (21):

$$J = \frac{k}{\Omega_0^2} \quad (26)$$

Maximální hodnota momentu setrvačnosti umístěná na hřídel synchronního stroje je dána prvním průsečíkem (z prava) funkce $S_{\omega, \max}(\Omega_0)$ pro přípustnou maximální amplitudu β_A oscilací zátěžového úhlu s trendem $S_{\omega}(\Omega)$ měřeným na síti v definovaném čase.

Praktické ověření bylo provedeno na synchronním stroji (MEZ-A 225 MO 4; S = 50 kVA; n=1500 min⁻¹, k = 1140 Nm; B = 14 Nms) v laboratoři. Podle Obr. 26 můžeme vidět průsečík P, kde pro dovolenou amplitudu $\beta_A = 0.1$ rad (odpovídá aktivnímu výkonu 20 kW) dostáváme maximální hodnotu $J = 160$ kgm². Obr. 28 pak znázorňuje trend odpovídající vypočtené hodnotě J, což odpovídá průměrné amplitudě a měřeným fluktuacím a odpovídající odezvě na zátěžový úhel.



Obr. 28: Časový vývoj síťové frekvence a zátěžového úhlu
Zdroj: Vlastní práce autora

6.1.4 Dynamické chování okrsku s fotovoltaickými panely

Okrsek s fotovoltaickými panely je zde opět definován jako oblast obsahující FVE, která je ohraničená bodem vyvedením výkonu z tohoto okrsku do distribuční sítě.

Měření dynamické odezvy sítě, tak jak je popsáno výše, nebylo v okrcích s FVE prováděno z důvodu velmi nízké relevance takových měření. Prvním aspektem, proč nebylo prováděno měření dynamické odezvy v okrcích s podílem FVE, je, že takové okrsky ve většině instalací (rovněž instalace, na kterých probíhala experimentální měření popsaná v této práci) neobsahují záložní zdroje v podobě točivých strojů, tudíž nelze sledovat dynamické odezvy. Dalším důvodem je to, že

vývoj softwaru střídačů pro FVE velmi intenzivně směřuje do oblasti řešení dynamických jevů a jejich eliminace pomocí dodávání přesně definovaných pulsů k potlačení výše popsaných fluktuací. Software střídačů musí být však dostatečně rychlý, aby byl schopen reagovat na tyto fluktuace a navíc musí být systém FVE osazen značnou úložnou kapacitou (bateriemi). Těmito úložnými kapacitami však většina současných instalací FVE nedisponuje. Práce řeší provoz točivých strojů a FVE a propojuje jejich dynamické vlastnosti tak, aby jejich kombinací vznikl stabilní systém, který nebude vnášet fluktuace do distribuční sítě.

Dále je popsán monitoring výkonových fluktuací FVE, které jsou z pohledu FVE instalací velmi důležité a mají zásadní vliv na provoz energetických systémů s točivými stroji.

6.2 Vnější monitoring FV panelů

Nedílnou součástí provozu energetických zdrojů je vedle monitoringu jejich výkonových charakteristik rovněž jejich fyzický stav. V případě generátorů to může být například monitoring stavu ložisek, případně proměřování izolačního odporu pro případ porušení izolace apod. Na rozdíl od generátorů jsou FV panely umístěny vždy ve venkovním prostředí a vystaveny povětrnostním vlivům, včetně zvýšených teplot v letních měsících.

V rámci našeho výzkumu jsme se rovněž věnovali vnějšímu monitoringu FV panelů umístěných na budově ČZU (Libra et al., 2019). Je zjevné, že poškození (často doprovázené zvýšením teploty panelu) má za následek, snížení předpokládaného výstupního výkonu a může tedy vést k problémům s regulací, která je vždy dimenzována na určité výkonové rozmezí. Jmenovitý nominální výkon monitorované instalace byl 10 kW_p. FV elektrárna je instalována na střeše Technické fakulty. Instalace byla dokončena v roce 2015. GPS souřadnice monitorované instalace jsou 50°7'43" N a 14°22'27" E a nadmořská výška je 280 m. Naměřené výsledky jsou s ohledem na podobnost monitoringu porovnávány s výsledky FVE Ladná (4 MW_p).

Pro instalaci na střeše Technické fakulty byly použity panely z polykrystalického křemíku od německé firmy Renesola. Použité FV panely mají následující parametry: typ JC 260M-24/Bb, maximální výkon 260 W, napětí naprázdno 37.6 V, proud na krátko 8,95 A, napětí při maximálním výkonu 30.5 V a proud při maximálním výkonu 8.53 A. FV panely jsou instalovány na pevné konstrukci s fixním sklonem 35° a směřují téměř na jih. Odchylka je přibližně 10° na

východ a je dána orientací budovy. Celkem 40 FV panelů je rozděleno do dvou nezávislých sekcí (každá sekce s 20 FV panely a jmenovitým výkonem 5 kW_p). V každé sekci je 20 panelů připojeno do série a následně připojeno do tří fázového střídače od firmy SMA Solar Technology typu AG STP 5000TL-20, který má maximální stejnosměrné napětí 1000 V, maximální stejnosměrný proud 10 A, střídavé napětí 400 V a maximální střídavý proud 7.3 A.

Monitoring teploty FV panelů pomocí létajícího dronu byl prováděn ve spolupráci se společností Upvision během slunného dne 20.6. 2017. V tomto termínu byla FVE v provozu necelé dva roky. Provozní doba dronu byla 20 minut (doba mezi dvěma nabíjecími cykly). Na dronu byla zavěšena infračervená kamera Flir A65.

Obr. 29 znázorňuje FVE a nad ní se vznášející dron monitorující povrchovou teplotu FVE. Parametry infračervené kamery byly: rozlišení 640 x 512 pixelů, teplotní citlivost 0.05 °C, rozsah teplot 40 - 160 °C a spektrální rozsah 7.5-13 μm. Naměřená data byla zpracována pomocí softwaru Flir (Flir Systems Inc., Nashua, NH 03063, USA).

Hodnoty rychlosti větru a teploty vzduchu byly zaznamenávány meteorologickou stanicí umístěnou v kampusu České zemědělské univerzity v Praze.

Ke sběru dat byly použity monitorovací systém Solarmon a výsledky byly následně porovnány s daty z mezinárodně používané GIS (geografické informační systémy) aplikace.

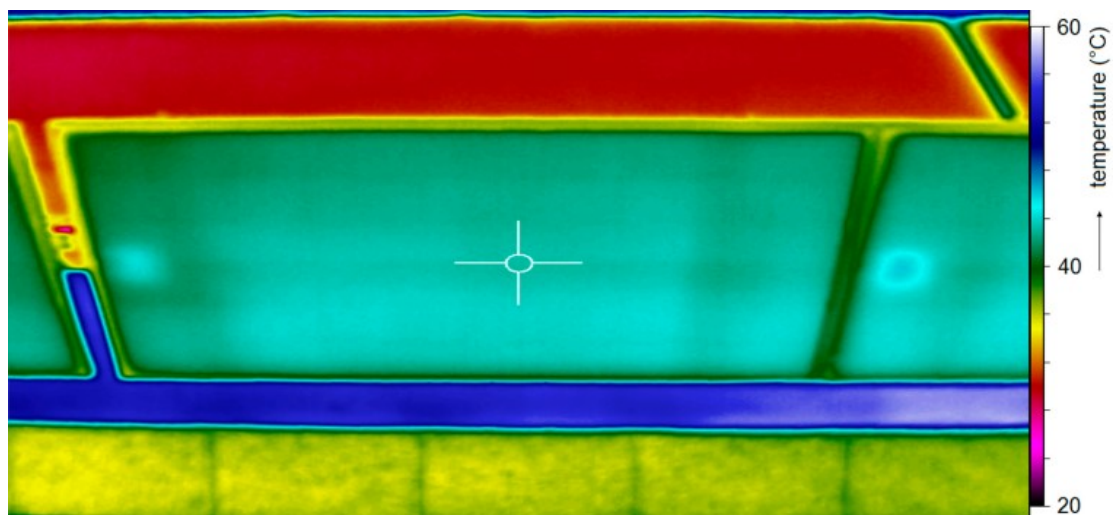


Obr. 29: Fotovoltaická elektrárna na střeše technické fakulty s monitorujícím dronem
Zdroj: (Libra et al., 2019)

6.2.1 Výsledky měření

S infračervenou kamerou umístěnou na dronu je relativně snadné získat přehled nad rozlehlou oblastí a sledovat teplotní rozdíly v relativně krátkých časech.

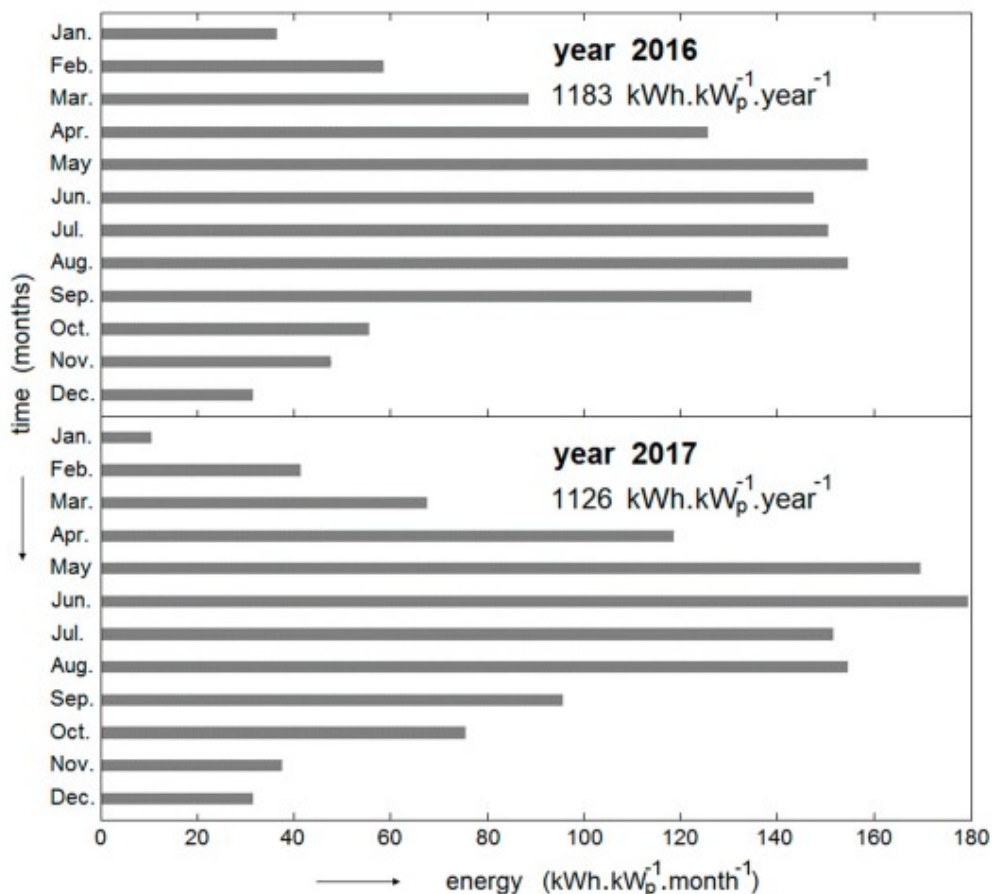
S použitím této metody jsme rovněž schopni v rámci velkých instalací sledovat větší poškozené FV panelů - například popraskání, znečištění apod. Na Obr. 30 je znázorněn typický pohled na FV panel pořízený infračervenou kamerou. Během monitoringu byla většina pořízených snímků velmi podobná. Z těchto snímků je tedy zřejmé, že distribuce teplot v rámci panelů byla homogenní s hodnotami pohybujícími se okolo 45 °C (měřeno v 10 hodin dopoledne). Pomocí tohoto měření nebyly odhaleny místa, jejichž teplota by významně převyšovala převládající teplotu FV panelu. Lehce zvýšená teplota v levé části obrázku nesouvisí s poškozením panelu, ale s umístěním krabičky s kontakty na zadní straně panelu. V tomto místě není panel dostatečně chlazen a dochází tudíž ke zvýšení teploty.



Obr. 30: Typický snímek FV panelu pořízený infračervenou kamerou
Zdroj: (Libra et al., 2019)

Provedená měření tedy indikují, že PV panely nemají žádná významná poškození. Pokud porovnáme Obr. 30 s Obr. 29, tak je zřejmé, že krytina střechy je na osluněných místech mnohem teplejší (kolem 55 °C) než světlé dlaždice, které částečně odrážejí dopadající sluneční záření. Na místech, které jsou zastíněné FV panely je teplota krytiny nižší, a sice kolem 30 °C.

Předpoklad bezproblémového provozu koresponduje s naší analýzou provozních dat pomocí monitorovacího systému Solarmon. Obr. 31 znázorňuje produkci elektrické energie v roce 2016 tudíž v prvním roce provozu FVE a v roce 2017. Porovnání naměřených hodnot s hodnotami FV GIS aplikace prokazuje, že produkce elektrické energie je ve skutečnosti o 20 % vyšší než očekávaná hodnota viz publikované hodnoty měsíčních souhrnů vyrobené elektřiny (Libra et al., 2019). Skutečnost, že došlo k vyšší výrobě elektrické energie než je očekávaná hodnota je jasným indikátorem bezproblémového provozu a technického stavu FVE. Jakékoliv dílčí defekty by okamžitě vedly ke snížení množství vyrobené elektřiny a náš monitorovací systém by okamžitě upozornil na potenciální nebezpečí.



Obr. 31: Vyrobená elektrická energie v letech 2016 a 2017

Zdroj: (Libra et al., 2019)

Obr. 32 znázorňuje závislost okamžitého výkonu vzhledem k času během tří vybraných dnů v létě 2016. Vybrán byl slunečný a oblačný den a dále den, kdy bylo zcela zataženo. Denní hodnoty elektrické energie jsou také reprezentovány, jako obsah oblasti pod příslušnou křivkou, kde platí:

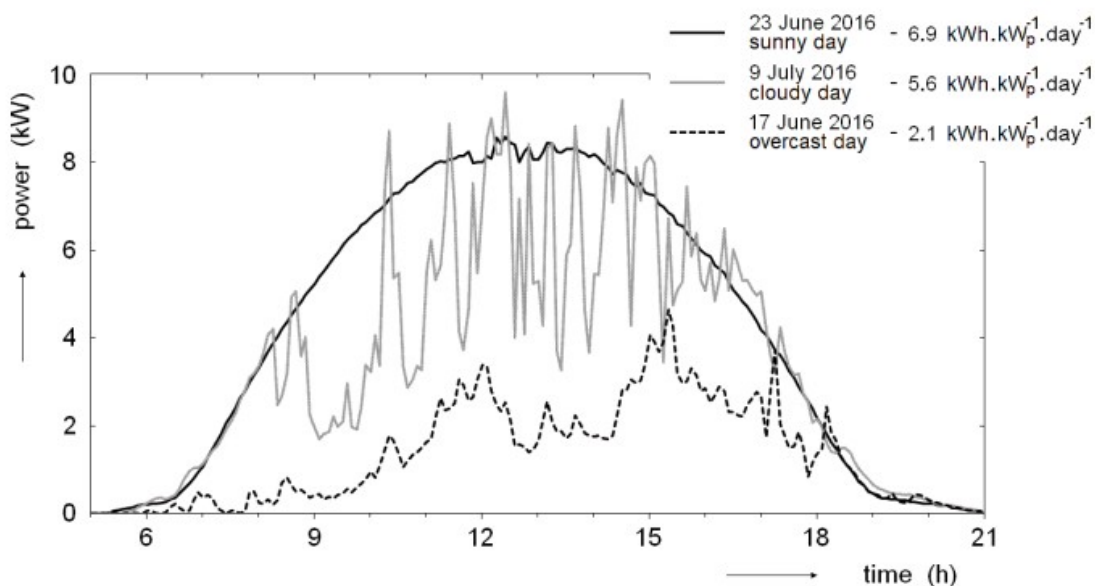
$$E = \int_{\Delta t} P dt \quad (27)$$

kde E je vyrobená elektrická energie, P je okamžitý výkon a t je čas. Když porovnáme slunečný a oblačný den, tak je z Obr. 32 zřejmé, že lokální maxima křivky okamžitého výkonu jsou vyšší během oblačného dne. Ta to skutečnost souvisí zejména s nižší teplotou FV panelů. S rostoucí teplotou se Fermiho energetická hladina pohybuje z okraje do středu zakázaného pásma v pásmové struktuře energetických hladin polovodiče. Tento efekt vzniká na základě principů fyziky pevných látek.

Snížená hranice potenciálu snižuje fotovoltaické napětí a tím i související výstupní výkon. Během oblačného dne je teplota FV panelů nižší, protože je většina dopadající energie tvořena z přímého slunečního záření.

Během zataženého dne samozřejmě přímé sluneční záření na FV panely nedopadá. Výsledná teplota je vždy závislá na poměru dopadající energie a energie záření, vedení tepla a proudění vzduchu. Pokud je skokovitě sluneční záření blokováno mraky během oblačného dne, pak je teplota na počátku oslunění vždy nižší. Podle fyzikální teorie se okamžitý výkon zvyšuje o 0.5 %, pokud se teplota FV panelů sníží o 1 °C.

Na Obr. 32 je patrné, že během relativně oblačného dne 9. července 2016 byl maximální výstupní výkon po roztrhání oblačnosti o 15 % vyšší než při slunečném dni (23. června 2016). FV panely byly intenzivně chlazený díky vyšší rychlosti větru 9. července 2016 viz Obr. 33 a teplota vzduchu byla odpoledne kolem 24 °C. V druhém případě byla dne 23. června 2016 odpoledne teplota vzduchu kolem 31 °C při jasné obloze. Rozdíly teplot FV panelů mezi těmito dny dosahují okolo 30 °C. FV panely měly teplotu kolem 25 °C, když byly zastíněny 9. července. Dne 23. června



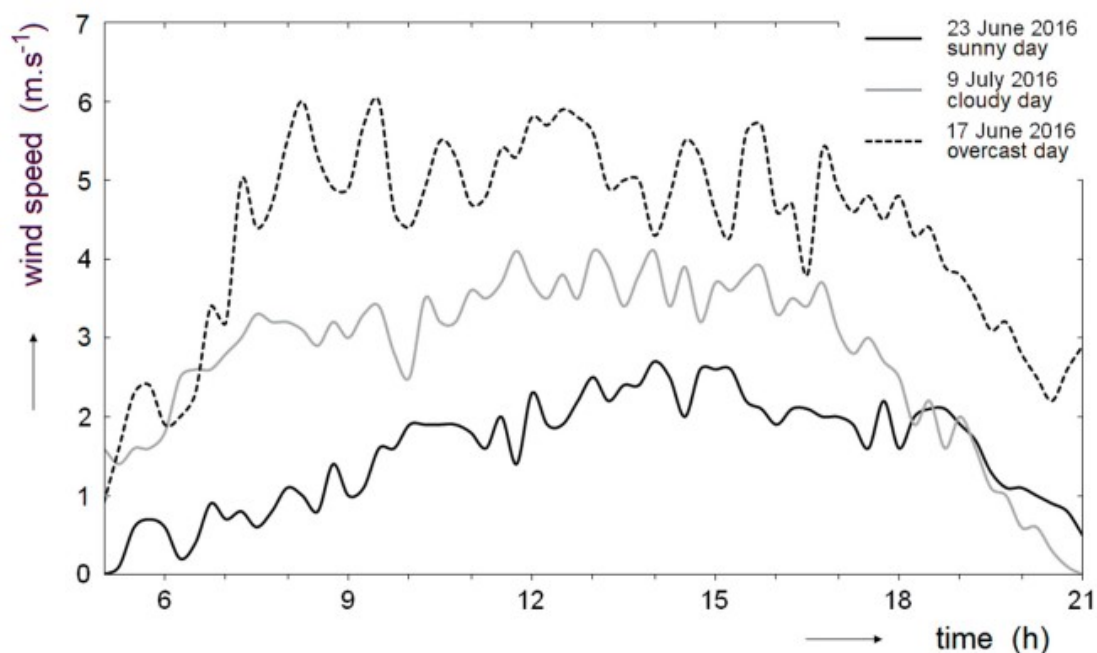
Obr. 32: Závislost okamžitého výkonu na čase během tří vybraných dnů

Zdroj: (Libra et al., 2019)

nebyly panely zastíněny, tudíž byly vystaveny přímému slunečnímu záření a teplota dosahovala 53 °C. Teploty FV panelů byly měřeny pouze pomocí infračervené kamery, ale teploty plně odpovídají fyzikálním charakteristikám, které jsou popisovány fyzikou pevných látek.

Umístění malých FVE na střechách budov je velmi vhodné, zejména s ohledem na nemožnost jiného využití takových ploch. Využití zemědělských ploch pro zastavění FV panely není vhodné. Při umístění FVE na střechách budov však často narážíme na obtížnou dostupnost takovýchto instalací. S použitím dronů pro

monitoring a fyzickou inspekci instalací dochází ke značnému zjednodušení provozu malých FVE. Je samozřejmě důležité mít na paměti, že se jedná pouze o inspekci a detekci velmi závažných poruch, jakými jsou například popraskané články apod. Porušené FV články a kontakty jsou nejhorší závadou.



Obr. 33: Závislost rychlosti větru na čase během tří vybraných dnů

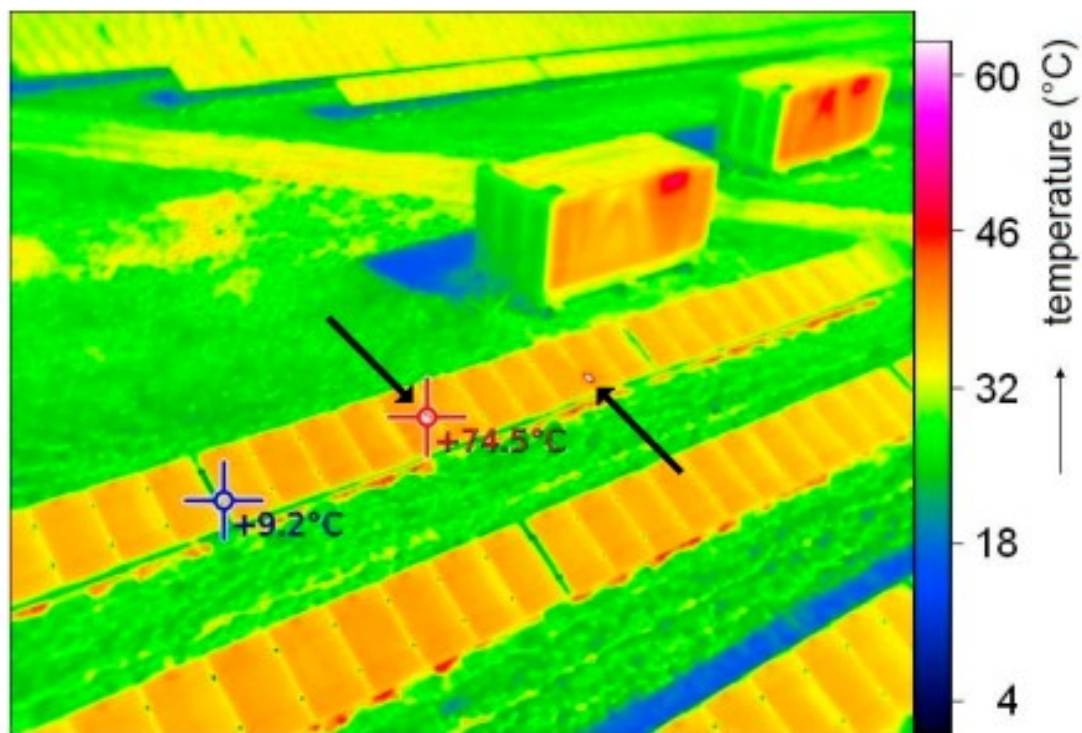
Zdroj: (Libra et al., 2019)

Na Obr. 34 je znázorněn podobný snímek pořízený infračervenou kamerou, na kterém je znázorněna větší FVE v Ladné jako příklad. Z Obr. 34 je patrné, že se zde nacházejí dva body se zvýšenou teplotou. V pozadí můžeme vidět boxy s ventilací, kde jsou umístěny střídače.

Vyhodnocením snímků, jako je Obr. 34, získáme následující závěry: (a) pokud teplota bodů se zvýšenou teplotou vyšší o více jak 20 °C než okolní články panelu, tak by měl být panel vyměněn; (b) pokud jsou na panelu více jak 3 body s nižší teplotou (teplota na horní straně panelu nižší než o 20 °C), tak by měl být panel rovněž vyměněn; (c) pokud je na panelu celkový řetězec(e) se zvýšenou teplotou, musí být panel opraven, což spočívá ve výměně bypassové diody.

Na základě provozních zkušeností usuzujeme, že není nezbytné provádět více testů elektroluminiscenční technologií (flash testy), pokud neexistuje podezření na rozsáhlé poruchy FV panelů. Takové podezření může vzniknout na základě infračerveného monitoringu, jak bylo podrobně popsáno výše, případně na základě značného poklesu vyrobené elektřiny. Pro monitoring výkonových charakteristik FV

panelů je používán systém Solarmon vyvinutý ve spolupráci s Katedrou fyziky Technické fakulty ČZU je instalován na 65 FVE a vykazuje vysokou spolehlivost.



Obr. 34: Infračervený snímek FVE se znázorněním bodů se zvýšenou teplotou
Zdroj: (Libra et al., 2019)

6.2.2 Zhodnocení výkonových fluktuací

V předchozí kapitole byl představen jeden z publikovaných výstupů, který souvisí s vnějším monitoringem FV panelů. Pro bezproblémový provoz FVE je naprosto nezbytné, abychom každý systém vyrábějící elektřinu velmi pečlivě sledovali. Díky vyvinutému systému Solarmon, je možné odhalovat poruchy systému na základě porovnávání výkonových charakteristik versus maximální denní predikce vyrobené elektřiny. Z pohledu stability elektrorozvodné sítě je nezbytné, provádět pravidelnou diagnostiku FVE za účelem odstranit výše uvedené poruchy. Vlivem poruch může docházet ke skokovým výpadkům dodávaného výkonu a tím i k nežádoucím fluktuacím výkonu v distribuční síti.

Z Obr. 32 je rovněž patrné, že během jednoho dne může docházet ke značným výkonovým oscilacím způsobeným přírodními vlivy. Tato skutečnost je patrná zejména u oblačného dne 9. července 2016, kdy docházelo k velmi významným výkonovým výkyvům. V maximech se jednalo i o více než 50% výkonové fluktuace.

Tyto výkonové fluktuace nám vnášejí nežádoucí oscilace do elektrické distribuční sítě.

Částečná kompenzace těchto výkonových fluktuací probíhá prostřednictvím výkonové elektroniky invertorů, nicméně za cenu vysokých energetických ztrát. Tyto výkonové fluktuace dodávané do sítě mohou být odstraněny pomocí systému akumulace, kdy bude nadbytečný výkon pomocí regulace odkládán do baterií a následně opět z baterií odebírán a dodáván do sítě. Tím by se dosáhlo vyhlazení křivky výkonu dodávaného do sítě. Řešení s akumulací pomocí baterie je vhodné zejména pro menší instalace řádově do 100 kW_p. Pro větší FVE instalace bychom již potřebovali poměrně značně velkou kapacitu bateriového úložiště, proto bude výhodnější použití diesellového agregátu napojeného na společnou regulaci, který dokáže pružně reagovat na výkonové fluktuace FVE.

6.3 Dlouhodobý monitoring FV panelů

V rámci výzkumu na katedře fyziky byl vyvinut monitorovací systém Solarmon, který je momentálně nasazen na více než 80 FV elektrárnách v Evropě (Česká republika, Slovensko, Rumunsko, Maďarsko) a na jedné instalaci v Chile. Tento systém umožňuje automatický sběr dat, která jsou následně vyhodnocována. Všechna vyhodnocovaná data jsou porovnávána s daty získanými z P-GIS³ aplikace (Photovoltaic Geographical Information System). Tato aplikace³ je využívána pro predikci množství vyrobené energie podle geografického umístění a je možné ji též využít pro projektování FVE.

Pokud vyrobená elektřina řádově neodpovídá predikci, je velmi pravděpodobné, že technický stav FVE není v pořádku a některé panely mohou být poškozené. Vyvinutý systém Solarmon 2.0 dokáže predikovat množství vyrobené energie, případně také umístění a typ poškození.

Níže je popsáno porovnání FV panelů s trackery instalované v oblasti s vysokou intenzitou dopadající energie v Chile s dvěma FV systémy standardní konstrukce na pevných stojanech instalovaných ve střední Evropě. Tyto výsledky byly rovněž publikovány v (M. Daneček et al., 2020).

FVE in Cuz Cuz v Chile je instalována v subtropické polopouštní oblasti s vysokou intenzitou dopadající energie pohybující se okolo 2400 kWh/(m² rok). Umístění FVE je 31.665° S, 71.222° W s nadmořskou výškou 275 m. Pro instalaci

³ https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

byly použity čínské polykrystalické panely BYD PV s jmenovitým výstupním výkonem $305 W_p$, typu P6C-36. Jmenovitý výkon cele FVE je $3000 kW_p$. Osy trackeru jsou orientovány horizontálně v severo-jížním směru.

Dva porovnávané FV systémy různé konstrukce jsou instalovány v Praze v lokalitě s průměrnou hodnotou intenzity dopadající energie pro střední Evropu. Jeden FV systém je umístěn v Praze Suchdole na střeše Technické fakulty, viz Obr. 35. FVE je umístěna na $50.129^\circ N$, $14.374^\circ E$ a ve výšce 280 metrů nad mořem. FV panely jsou vyrobeny německou firmou Renesola GmbH. Panely jsou z polykrystalického křemíku se jmenovitým výkonem $260 W_p$, typu JC 260M-24/Bb. FVE je umístěna na standardních pevných rámech orientovaných na jih pod úhlem 35° . Jmenovitý výstupní výkon celé FVE je $10kW_p$.



Obr. 35: FVE v Praze na střeše Technické fakulty ČZU s pevnými stojany, panely jsou orientovány směrem na jih pod úhlem 35°

Zdroj: (M. Daneček et al., 2020)

Druhý porovnávaný systém je umístěn v Praze Vršovicích, viz Obr. 36, a je vzdálen cca 10 km od první instalace, takže jeho umístění disponuje prakticky totožnými hodnotami intenzity dopadajícího záření. Jedná se o pružné FV fólie typu VAEPLAN V Solar 32 se jmenovitým výkonem $432 W_p$. Panely jsou umístěny téměř horizontálně na střeše fotbalového stadionu bez podpůrné konstrukce. Na střeše je umístěno celkem 1040 fólií, které jsou připojeny do osmi nezávislých sekcí a následně jsou připojeny do 8 rozvaděčů. 26 okruhů je připojeno do každého rozvaděče, kde každý okruh obsahuje 5 FV fólií. Celkový jmenovitý výkon FVE je tedy přibližně $449 kW_p$.



Obr. 36: FVE v Praze umístěné na střeše fotbalového stadionu, FV fólie jsou umístěné téměř horizontálně bez podpěrných stojanů

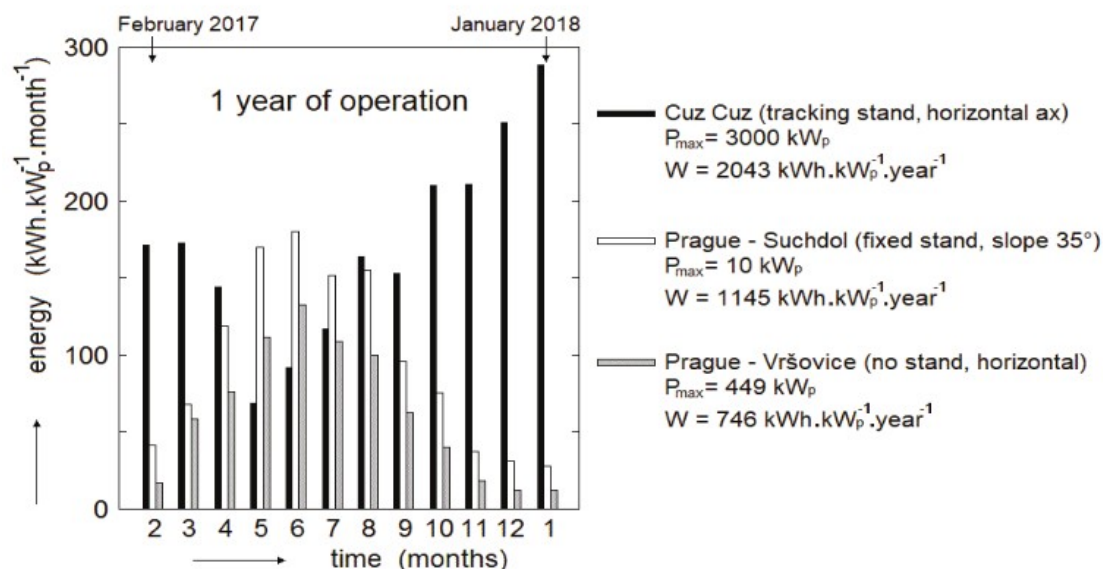
Zdroj: (M. Daneček et al., 2020)

Obě dvě FVE jsou připojeny do sítě pomocí střídačů. Oba systémy jsou připojeny k monitorovacímu systému Solarmon 2.0. Vyhodnocení dat je následně prováděno v laboratoři Technické fakulty ČZU. Pro lepší porovnání jsou hodnoty vyrobené elektřiny přepočítány na 1 kW_p instalovaného nominálního výkonu.

Na následujících obrázcích je znázorněno množství vyrobené elektřiny během jednoho roku v popisovaných FVE. Na jižní polokouli v oblasti Cuz Cuz jsou roční období obrácena, což znamená, že když je v Evropě léto, tak v Chile je zima. Z tohoto důvodu jsou v oblasti Cuz Cuz nejvyšší hodnoty vyrobené energie v lednu a v prosinci a nejmenší v květnu a červnu. Z Obr. 37 je patrné, že celková roční hodnota vyrobené energie ($2.043 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_p^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) v oblasti Cuz Cuz je téměř dvojnásobná v porovnání s FVE v Praze Suchdole, které jsou na pevných stojanech skloněných směrem na jih v optimálním úhlu 35° . Porovnání s FVE instalací na střeše fotbalového stadionu v Praze Vršovicích je produkce v oblasti Cuz Cuz téměř trojnásobná.

Vysoká hodnota vyrobené elektřiny v oblasti Cuz Cuz souvisí s vysokou hodnotou intenzity dopadajícího záření a samozřejmě má vliv také použití trackerů. Při umístění panelů v polopoušti může často docházet ke znečištění FV panelů prachem, nicméně i přes tyto nepříznivé přírodní podmínky je množství vyrobené

elektriny stále vysoké. Z porovnání je rovněž patrné, že v subtropických oblastech jsou menší procentuální rozdíly mezi letními a zimními měsíci než ve střední Evropě.



Obr. 37: Množství vyrobené elektřiny v uvedených FV systémech během jednoho roku
Zdroj: (M. Daneček et al., 2020)

V případě FVE instalovaných v Praze odpovídá hodnota vyrobené elektřiny predikci pomocí dat P-GIS, viz výše. V případě FVE v Praze Suchdole je roční hodnota vyrobené energie lehce vyšší než očekávaná hodnota ($1.145 \text{ kWh} \cdot \text{kWp}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ proti $1,015 \text{ kWh} \cdot \text{kWp}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Tento aspekt může být vysvětlen tím, že použité panely mají vysokou účinnost. V případě FVE v Praze Vršovicích je hodnota lehce nižší než očekávaná hodnota ($746 \text{ kWh} \cdot \text{kWp}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ oproti $850 \text{ kWh} \cdot \text{kWp}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Toto snížení bylo způsobeno zejména prašným prostředím v blízkosti železniční tratě a zároveň umístěním panelů, které jsou umístěny po obvodu oválné střechy stadionu, a navíc jsou skloněny.

Střechy a fasády budov v urbanistických oblastech jsou velmi vhodné pro umístění FV panelů. Zastavění zemědělské půdy FV panely nemůže být považováno za environmentálně vhodnou aplikaci FVE. Na druhou stranu v případě instalace FVE v Chile v oblasti polopouště Cuz Cuz se jedná o poměrně vhodné využití z důvodu nízké využitelnosti půdy a nízkého zalidnění.

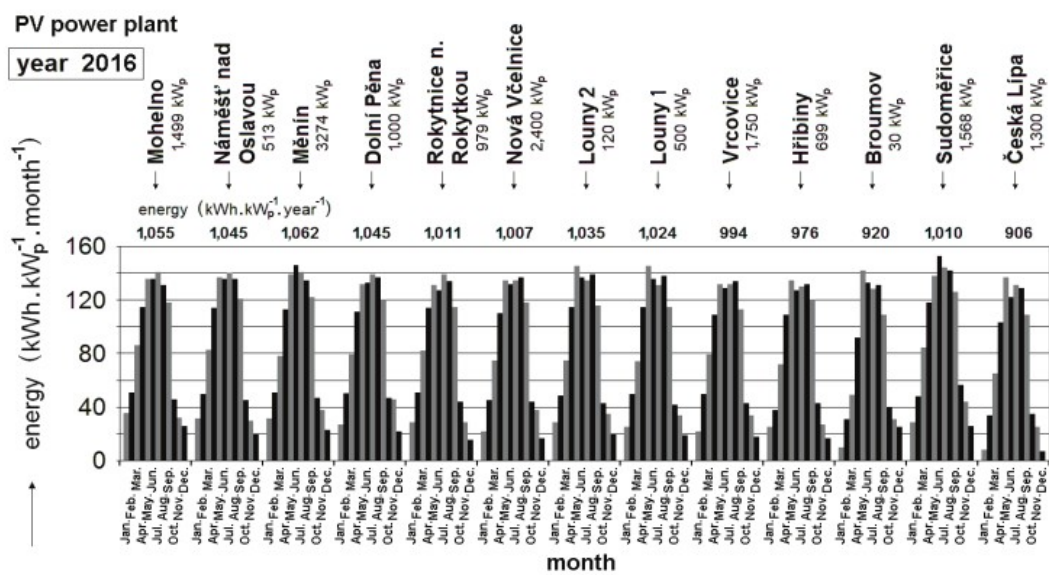
Pro lepší porovnání FVE instalovaných ve střední Evropě je na Obr. 38 znázorněno množství vyrobené elektřiny z třinácti FVE v České republice. Všechny tyto elektrárny jsou připojeny k monitorovacímu systému Solarmon 2.0 a data jsou vyhodnocována v laboratoři Katedry fyziky. Graf byl vytvořen prostřednictvím vyhodnocení velkých data setů. Z Obr. 38 je patrné, že roční hodnota vyrobené

elektřiny se v České republice pohybuje mezi očekávanými hodnotami (1000 - 1100 kWh · kW_p⁻¹ rok⁻¹), pouze v severní polovině území jsou tyto hodnoty lehce nižší. Vyhodnocení dat probíhá již několik let a lze konstatovat, že celkové množství vyrobené elektřiny se mezi jednotlivými roky liší pouze ve smyslu drobných fluktuací, které jsou dány meteorologickými podmínkami v daném roce.

Na základě dlouhodobého monitoringu je zřejmé, že data o predikci získaná pomocí online aplikace⁴ korespondují s měřenými hodnotami ve všech sledovaných destinacích. Z pohledu oscilací elektrického výkonu je pak patrné, že pro projektování a provoz FVE je nezbytné brát ohled na její geografické umístění a také na infrastrukturu, do které bude FVE připojena. Jak již bylo zmíněno výše za současných legislativních podmínek není vhodné využívat zemědělskou plochu pro výstavbu FVE. Toto platí i s ohledem na stabilitu distribuční sítě. Vhodné pro umístění FVE jsou zejména střechy průmyslových, zemědělských, sportovních objektů. V případě těchto objektů lze rovněž počítat s tím, že značná část denní potřeby elektrické energie může být pokryta produkcí elektřiny z FVE. Pokud je tedy FVE vhodně navržena s ohledem na infrastrukturu, ve které je provozována, může v rámci této infrastruktury docházet k pohlcení výkonových toků dodávaných FVE. Díky tomu nejsou tyto výkonové oscilace dodávány do sítě, ale jsou "likvidovány" přímo v místě jejich vzniku.

Další výhodou integrace FVE do infrastruktury stavebních objektů uvedených výše je i to, že tyto objekty často disponují například nouzovými záložními generátory, případně bateriovými úložišti, které jsou schopné krátkodobě vykrývat výpadky elektrické energie. Bateriové úložiště je osazeno nabíjecí regulací a může být při vhodném zapojení nabíjeno z FVE a jeho denních výkonových přebytků. Tato bateriová úložiště jsou používána například pro serverovny, kdy je jejich výkon dimenzován na to, aby při výpadku byly schopné pokrýt potřebu elektrické energie do doby, než naběhnou dieselové agregáty.

4 https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html



Obr. 38: Množství vyrobené elektřiny v třinácti FVE umístěných v České republice během jednoho roku

Zdroj: (M. Daneček et al., 2020)

7 Shrnutí experimentálních prací

Experimentální práce probíhaly na Katedře fyziky Technické fakulty ČZU. Jednalo se zejména o měření výkonových charakteristik FV panelů a analýzu nasbíraných dat získaných pomocí monitorovacího systému Solarmon. Data z provozu FVE byla sbírána v několika lokalitách v rámci České republiky a také ve spolupráci se zahraničními partnery v Chile. Tato zahraniční spolupráce byla přínosem zejména pro analýzu provozu FVE instalované v oblasti s optimální hodnotou intenzity dopadajícího záření. Díky tomu bylo možné porovnávat výkonové parametry FVE instalovaných v ČR a v Chile.

Na základě těchto výzkumů vynikly dvě publikace (M. Daneček et al., 2020; Libra et al., 2019).

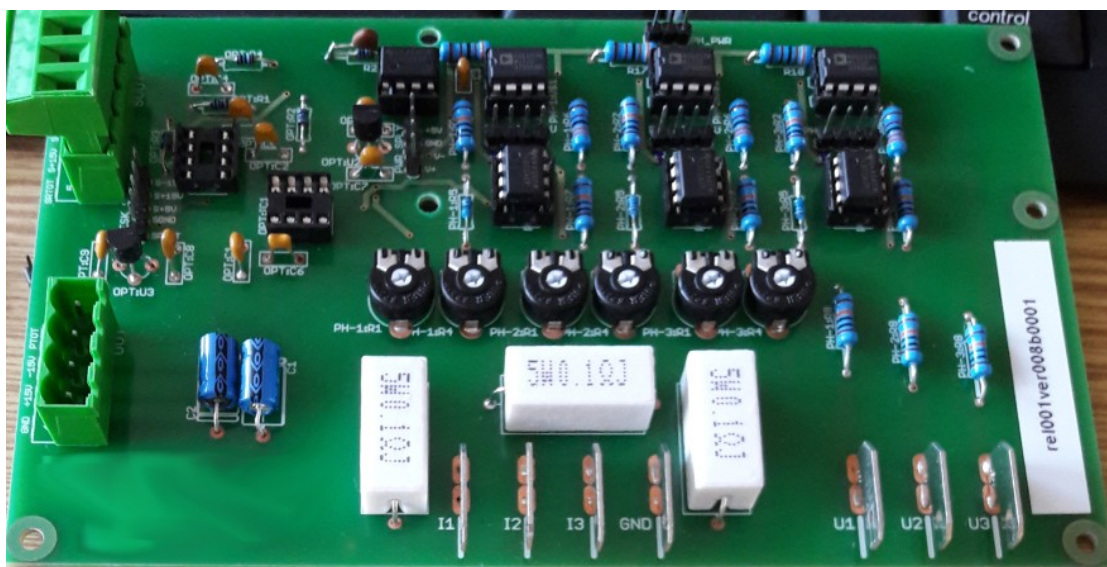
Druhá část experimentálních prací probíhala ve spolupráci s Dopravním podnikem hlavního města Prahy (DPP). V DPP probíhala měření v záložní napájecí stanici na stanici metra Radlická. Tato záložní napájecí stanice je osazena pěti soustrojími. Měření byla prováděna na dvanácti válcovém diesel generátoru s nominálními otáčkami 1000 ot/min a maximálním výkonem 1300 kW, viz Obr. 39, pomocí navrženého analogového převodníku zobrazeného na Obr. 40. Na tomto diesel generátoru probíhala výkonová měření se zvláštním zájmem na dynamické chování distribuční sítě. Na základě výzkumu tohoto dynamického chování bylo možné měřit dynamickou odezvu omezeného okrsku distribuční soustavy připojeného do sítě. Tato odezva vzniká na základě injektování výkonového impulsu do sítě. Tento impuls vznikne tím, že je synchronní stroj nabuzen na snížený výkon řádově 100 kW a následně je náfázován do sítě. Dynamická odezva, která vznikne, je zároveň informací o stavu distribuční sítě v daném místě a čase. Tato odezva nám rovněž určuje schopnost distribuční sítě v daném místě a čase absorbovat případné výkonové fluktuace. Je však nutné poznamenat, že veškeré tyto parametry jsou závislé na aktuálním uspořádání distribuční sítě a není tudíž možné tvrdit, že pokud v našem případě došlo vždy k zatlumení výkonových impulsů bude tomu tak za jakýchkoliv okolností. V rámci spolupráce s DPP byla publikována práce (Milan Daneček & Uhlíř, 2019, 2020) týkající se dynamické odezvy elektrické distribuční sítě.

Finální vyhodnocení měřených dat a statistické vyhodnocení, které je popsáno v (Milan Daneček & Uhlíř, 2019), bylo prováděno v rámci zahraniční stáže na

univerzitě v Indonésii. Jednalo se o univerzitu Institute Technology Bandung na západní Jávě.



Obr. 39: Záložní diesel generátor umístěný ve stanici pražského metra Radlická
Zdroj: Vlastní práce autora



Obr. 40: Osazená deska navrženého měřícího analogového převodníku
Zdroj: (Milan Daneček & Uhlíř, 2020)

8 Závěr

V úvodu této práce je shrnuta literární rešerše k problematice fotovoltaických článků a stability elektrické distribuční sítě.

Ve druhé části této práce jsou následně shrnuty výsledky experimentálních měření a monitoringu, jak na "klasických" zdrojích elektrické energie, tak na obnovitelných zdrojích elektrické energie v podobě fotovoltaických panelů.

V rámci prvního definovaného cíle disertační práce, kterým byl výzkum elektromechanického chování omezeného okrsku distribuční soustavy, byl navržen a osazen analogový měřicí převodník výkonu. Pomocí tohoto převodníku byl následně prováděn monitoring dieselových agregátů umístěných v záložní napájecí stanici pražského metra ve stanici Radlická. Na základě provedených měření byla provedena analýza nebezpečného chování při výkonových fluktuacích a zároveň byla experimentálně ověřena metodika pro navržení maximální přípustné oscilace zátěžového úhlu a související oscilace síťové frekvence. Tento postup může být využit pro návrh mechanických parametrů příslušného zdroje na bázi synchronního stroje, který je určen pro krytí výkonových fluktuací vznikajících při výrobě elektrické energie pomocí FVE. Výsledky těchto měření byly publikovány v rámci prací (Milan Daneček & Uhlíř, 2019, 2020).

Druhý cíl předkládané práce byl definován jako výzkum vlivu obnovitelných zdrojů elektrické energie na dynamiku omezených okrsků distribuční soustavy. V rámci tohoto výzkumu byl prováděn dlouhodobý monitoring FVE s ohledem na jejich výkonové parametry. Tyto výkonové parametry byly sledovány pomocí systému Solarmon a porovnávány s aplikací P-GIS. Tento monitoring je důležitý zejména z důvodu posouzení výkonových vlivů FVE na distribuční síť. Výzkum jednoznačně prokázal, že nejproblematictějšími dny z pohledu výkonových fluktuací jsou ty, které se vyznačují členitou oblačností. Dodávaný výkon v těchto dnech v maximech osciloval i s 50% amplitudou během 10 minut. Tyto výkonové fluktuace jsou velmi výrazným zdrojem nestabilit, kterému je třeba předcházet. Monitoring FVE probíhal rovněž na základě operativní kontroly pomocí dronu, který se na základě měření teplotního pole snažil odhalit poškozené panely. Výsledky těchto prací byly publikovány v (M. Daneček et al., 2020; Libra et al., 2019).

Třetím a posledním cílem předkládané disertační práce je definice závěrů ohledně vlivu obnovitelných zdrojů elektrické energie na distribuční síť. V rámci

tohoto cíle s ohledem na výsledky dosažené v prvním a druhém cíli, lze konstatovat následující.

Z pohledu oscilací elektrického výkonu je vysoce žádoucí projektovat FVE na základě detailní analýzy dynamické odezvy distribuční sítě v omezeném okrsku, kde má být FVE připojena. Na základě této dynamické odezvy následně navrhnout maximální hodnotu setrvačného momentu, kterým by měla být v podobě točivého stroje doplněna instalace FVE. Dále je nezbytné zhodnotit instalaci FVE s ohledem na stávající infrastrukturu. V případě instalace v průmyslových, zemědělských objektech je vysoce žádoucí integrovat FVE do stávajícího systému záložního napájení (serverovny, kritická infrastruktura), které je schopné v kooperaci absorbovat výkonové fluktuace FVE.

Na základě zhodnocení výše uvedených cílů lze konstatovat, že při dodržení doporučení definovaných ve třetím cíli, dojde k omezení výkonových fluktuací dodávaných do sítě a budeme schopni dosáhnout stabilních omezených okrsků v distribuční soustavě. Pomocí výpočtové a experimentální části bylo ověřeno, že toho lze docílit vhodnou implementací FVE do stávajících infrastruktur, podle předem definovaného postupu. Pokud bude tento postup dodržen, jsme na základě stabilizace omezených okrsků schopni dosáhnout stabilní distribuční sítě jako celku. Tímto je zároveň potvrzena stěžejní hypotéza definovaná v úvodu této práce.

Práce přináší nové poznatky v oblasti společného řešení mechanických a elektrických jevů demonstrováných na okrsku v elektrorozvodné soustavě. Zásadním prvkem novosti je propojení dynamického chování točivých strojů a FVE. Díky tomuto propojení a výše uvedenému popisu je možné v energetických systémech integrovat točivé stroje a FVE aniž by docházelo k zanášení dynamických jevů z omezených okrsků do distribuční sítě.

9 Literatura

- Alassi, A., Bañales, S., Ellabban, O., Adam, G., & MacIver, C. (2019). HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112(March), 530–554. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.062>
- Alhejji, A., & Mosaad, M. I. (2020). Performance enhancement of grid-connected PV systems using adaptive reference PI controller. *Ain Shams Engineering Journal*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.006>
- D'Avanzo, G., Delle Femine, A., Gallo, D., Landi, C., & Luiso, M. (2020). Impact of inductive current transformers on synchrophasor measurement in presence of modulations. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 155, 107535. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107535>
- Daneček, M., Havrлік, M., Beránek, V., Šafránková, J., Libra, M., Poulek, V., ... Belza, R. (2020). Design and data comparison of the photovoltaic power plants in the southern and Northern Hemispheres. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 1), 755–761. <https://doi.org/10.15159/AR.20.096>
- Daneček, Milan, & Uhlíř, I. (2019). Fast and reliable power measurement for energy sources to enhance distribution grid stability. *TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019*, (September), 117–122.
- Daneček, Milan, & Uhlíř, I. (2020). Monitoring of energy sources regarding to distribution grid stability. In *19th International Workshop for Young Scientists BioPhys Spring 2020*. Prague, May 19-21, 2020: ISBN 978-83-89969-64-4.
- Energetický regulační úřad. (2018). *Roční zpráva o provozu ES ČR 2018*.
- Farajdadian, S., & Hosseini, S. M. H. (2019). Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(47), 25457–25472. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.037>
- Fernández-guillamón, A., Gómez-lázaro, E., Muljadi, E., & Molina-garcía, Á. (2019). Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(August), 109369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
- Grigsby, L. L. (2017). *Power system stability and control. Power System Stability and Control, Third Edition* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.4324/b12113>
- Häberlin, H. (2012). *Photovoltaics System Design and Practice*.

- Hungerford, Z., Bruce, A., & MacGill, I. (2019). The value of flexible load in power systems with high renewable energy penetration. *Energy*, *188*, 115960. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115960>
- Illanes, R., De Francisco, A., Núñez, F., De Blas, M., García, A., & Torres, J. L. (2014). Dynamic simulation and modelling of stand-alone PV systems by using state equations and numerical integration methods. *Applied Energy*, *135*, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.088>
- Lalanne, C. (2014). *Mechanical Vibration and Shock Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Li, Y., Liu, H., Fan, X., & Tian, X. (2020). Engineering practices for the integration of large-scale renewable energy VSC-HVDC systems. *Global Energy Interconnection*, *3*(2), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.05.007>
- Libra, M., Daneček, M., Lešetický, J., Poulek, V., Sedláček, J., & Beránek, V. (2019). Monitoring of defects of a photovoltaic power plant using a drone. *Energies*, *12*(5). <https://doi.org/10.3390/en12050795>
- Luís, L. F., & Bretas, N. G. (1999). Synchronism versus stability in power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, *21*(4), 261–267. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(98)00045-3)
- Machowski, Jan; Lubosny, Zbigniew; Bialek, Janusz W; Bumby, J. R. (2020). *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Mao, M., Zhang, L., Huang, H., Chong, B., & Zhou, L. (2020). Maximum power exploitation for grid-connected PV system under fast-varying solar irradiation levels with modified salp swarm algorithm. *Journal of Cleaner Production*, *268*, 122158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122158>
- Moon, Y.-H., Ryu, H.-S., Lee, J.-G., & Kook, H.-J. (2001). Equivalent mechanical model of power systems for energy-based system analysis. *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference On*, *1*(December), 466–472 vol.1. <https://doi.org/10.1109/.2001.980144>
- Moraco, A. G. M., Tavares, M. F., Geraldi, E. L., & Ramos, R. A. (2016). An approach to evaluate the occurrence of flicker induced by electromechanical oscillations. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2016-Novem*. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741839>
- Muthamizh Selvam, M., Gnanadass, R., & Padhy, N. P. (2016). Initiatives and technical challenges in smart distribution grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *58*, 911–917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.257>
- Nikolic, D., & Negnevitsky, M. (2019). Adding Inertia to Isolated Power Systems for 100% Renewable Operation. *Energy Procedia*, *159*, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.040>

- Patel, M., Aivolaitas, S., & Allen, E. (2010). Real-Time Application of Synchronphasors for Improving Reliability. *NERC Report, Oct*, 1–78.
- Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2008). *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76537-2>
- Poolla, B. K., Bolognani, S., & Dörfler, F. (2016). Placing Rotational Inertia in Power Grids. *Proceedings of the American Control Conference, 2016-July*, 2314–2320. <https://doi.org/10.1109/ACC.2016.7525263>
- Rezk, H., Abdelkareem, M. A., & Ghenai, C. (2019). Performance evaluation and optimal design of stand-alone solar PV-battery system for irrigation in isolated regions: A case study in Al Minya (Egypt). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36(October), 100556. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100556>
- Robak, S., & Gryszpanowicz, K. (2015). Rotor angle small signal stability assessment in transmission network expansion planning. *Electric Power Systems Research*, 128, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.07.003>
- Roselyn, J. P., Chandran, C. P., Nithya, C., Devaraj, D., Venkatesan, R., Gopal, V., & Madhura, S. (2020). Design and implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar PV system. *Control Engineering Practice*, 101(April), 104494. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104494>
- Salameh, T., Ghenai, C., Merabet, A., & Alkasrawi, M. (2020). Techno-economical optimization of an integrated stand-alone hybrid solar PV tracking and diesel generator power system in Khorfakkan, United Arab Emirates. *Energy*, 190, 116475. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116475>
- Seppanen, J., Au, S. K., Turunen, J., & Haarla, L. (2017). Bayesian Approach in the Modal Analysis of Electromechanical Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(1), 316–325. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2561020>
- Staněk, K. (2012). *Fotovoltaika pro budovy* (1. vyd). Praha: Grada pro Katedru konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze.
- Sun, K., Qi, J., & Kang, W. (2016). Power system observability and dynamic state estimation for stability monitoring using synchrophasor measurements. *Control Engineering Practice*, 53, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.01.013>
- Theodor, S., Theodor, S., & Borsche, S. (2015). ScienceDirect Analyzing Rotational Inertia , Grid Topology Analyzing Rotational Inertia , Grid Topology Analyzing Rotational Inertia , Grid Topology Analyzing Rotational Inertia , Grid Topology

- and their Role for System Stability and their Role for System, *30*, 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.436>
- Thilakarathne, C., Meegahapola, L., & Fernando, N. (2020). Real-time voltage stability assessment using phasor measurement units: Influence of synchrophasor estimation algorithms. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *119*(September 2019), 105933. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105933>
- Timoshenko, S. P., MacCullough, G., & Young, D. . (1968). *Elements of Strength of Materials*. Affiliated East-West Press Private Limited.
- Tom Markvart, L. C. (2011). Practical Handbook of Photovoltaics 2nd Edition - Fundamentals and Application. *Elsevier*, *1*(2), 1268.
- Trentini, R., Kutzner, R., & Hofmann, L. (2016). Power grid modeling based on the electromechanical energy approach aiming power systems stability studies. *24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016*, 943–948. <https://doi.org/10.1109/MED.2016.7535986>
- Ulbig, A., Borsche, T. S., & Andersson, G. (2014). *Impact of Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02615>
- Ulbig, A., Rinke, T., Chatzivasileiadis, S., & Andersson, G. (2013). Predictive control for real-time frequency regulation and rotational inertia provision in power systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2946–2953. <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760331>
- Wang, B., & Sun, K. (2016). Formulation and Characterization of Power System Electromechanical Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, *31*(6), 5082–5093. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2535384>
- Zhang, X., Zhu, Z., Fu, Y., & Li, L. (2020). Optimized virtual inertia of wind turbine for rotor angle stability in interconnected power systems. *Electric Power Systems Research*, *180*(May 2019), 106157. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106157>