

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

TESTOVÁNÍ ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ

Katedra fyziky

Disertační práce

Školitel: **prof. Ing. Martin Libra, CSc.**

Konzultant: **prof. Ing. Ivan Uhlíř, DrSc.**

Doktorand: **Ing. Tomáš Petřík**

2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se do-
slovně shodují.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: TOMÁŠ PETRÍK

PODPIS:

DATUM:

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat svému školiteli prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. za metodické vedení mé práce. S nemenším vděkem bych také rád poděkoval konzultantu své práce Prof. Ing. Ivanu Uhlířovi, DrSc. za věcné rady a připomínky. Neposlední dík patří také rodině, přátelům a všem těm, kteří mne podpořili v krizových okamžicích.

Abstrakt

Tato disertační práce s názvem „Testování energetických systémů“ shrnuje potřebnou teorii o parametrech stability distribuční elektrické sítě, na možnou destabilizaci s ohledem na připojování obnovitelných zdrojů energie (zejména fotovoltaických elektráren) a elektro-mechanickou vazbu mezi distribuční sítí a synchronním strojem. V praktické části jsou pak řešeny dvě věci. Nejprve je řešena problematika testování interakce synchronního stroje a nových prvků sítě. Poté se práce zabývá testem účinnosti fotovoltaického článku v extrémních teplotách.

Klíčová slova: Rozvodná síť, Testování stability, Synchronní stroj, Fotovoltaický článek

Abstract

This dissertation, entitled „Testing Power Systems“, summarizes the necessary theory on the stability parameters of the power distribution grid, the possible destabilization concerning the connection of renewable energy sources (especially photovoltaic power plants) and the electromechanical coupling between the distribution grid and the synchronous machine. The practical part then addresses two issues. First, the issue of testing the interaction between the synchronous machine and new grid elements is addressed. Then, the thesis deals with testing the efficiency of the PV cell in extreme temperatures.

Key words: Grid, Stability testing, Synchronous machine, Photovoltaic cell

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle disertační práce	3
3	Současný stav poznání	5
3.1	Stabilita elektrické distribuční sítě	5
3.1.1	Úhlová stabilita rotoru	6
3.1.2	Napěťová stabilita	8
3.1.3	Frekvenční stabilita	10
3.1.4	Jiný pohled na členění stability	10
3.2	Popis distribuční sítě	13
3.2.1	Elektrotechnické modely	13
3.2.2	Elektro-mechanické modely	14
3.2.3	Fázor a synchronfázor	14
3.3	Současná problematika stability elektrické distribuční sítě	16
3.4	Nestability fotovoltaických elektráren	17
3.4.1	Fotovoltaický článek a panel	17
3.4.2	Připojení fotovoltaické elektrárny do sítě	20
3.4.3	Nestabilita výkonu fotovoltaických elektráren	21
4	Teoretický výklad pro vlastní práci	23
4.1	Analogie torzních vibrací	23
4.1.1	Historická motivace k analogii torzních vibrací	27
4.2	Chování setrvačných hmot točivých strojů v distribuční síti	29
4.3	Kyvňá rovnice	30
4.4	Uvažovaný rozsah okrsku sítě	31
4.5	Fotovoltaické panely a teplota	32

5	Vlastní výsledky	33
5.1	Výpočet a test maximální setrvačné hmoty pro daný maximální zátěžný úhel	33
5.1.1	Frekvenční oscilace - souvislost se setrvačnými hmotami	33
5.1.2	Popis použitého modelu	35
5.1.3	Odvození maximální velikosti setrvačných hmot pro danou amplitudu elektro-mechanických kmitů buzených sítí	37
5.1.4	Praktické ověření	39
5.1.5	Metodika určení maximální přípustné setrvačné hmoty	41
5.1.6	Shrnutí	42
5.2	Test chybného nafázování generátoru do sítě	43
5.2.1	Průběh výkonu při chybném nafázování	43
5.2.2	Srovnání s blackoutem	45
5.2.3	Shrnutí	45
5.3	Testování účinnosti fotovoltaických panelů za extrémních teplot . . .	46
5.3.1	Popis experimentu	46
5.3.2	Výsledky	49
5.3.3	Zhodnocení výsledků vzhledem ke známé teorii polovodičů . .	50
5.3.4	Aplikovatelnost v reálných pozemských podmínkách	54
5.3.5	Shrnutí	56
6	Závěr	58
7	Použitá literatura	60

Seznam obrázků

1	Diagram vazeb stability sítě - vlastní práce autora	11
2	Okamžitá frekvence a úhly fázorů sítě - zdroj www.swissgrid.ch	12
3	Schéma fotovoltaického článku [18]	18
4	Struktura fotovoltaického panelu [18]	19
5	Připojení fotovoltaické elektrárny do sítě [11]	20
6	Výkon solární elektrárny v průběhu různých dní - výzkum pracoviště [21]	22
7	Model mechanického systému a analogický obvod - vlastní práce autora	23
8	Model jednohmotového torzního systému (vlevo) a jeho uvolnění (vpravo) - vlastní práce autora	24
9	Zjednodušený elektrický model soustavy - vlastní práce autora	26
10	Přádelna bavlny v Lancashire UK, museum zachovávající stav z r. 1905 - zdroj museum Lancashire	27
11	Mechanický model vyňaté části transmise	28
12	Schéma okrsku sítě - vlastní práce autora	31
13	Příklady výkonové spektrální hustoty $S_{\omega}(\Omega)$ při fluktuacích frekvence - vlastní práce autora [38]	34
14	Model elektro-mechanického systému synchronního stroje - vlastní práce autora [38]	35
15	Vliv fluktuací frekvence sítě a setrvačného momentu I na amplitudu zákrmitů zátěžného úhlu - vlastní práce autora [38]	38
16	Náhodné změny síťové frekvence (nahore) a změny zatěžovacího úhlu synchronního stroje (dole) - vlastní práce autora [38]	40
17	Průběh činného výkonu předávaného do okrsku sítě po úmyslně nepřesném nafázování dieselagregátu 1,45 MVA. Vertikálně: 100kW/dílek, horizontálně 200ms/dílek - vlastní práce autora	43

18	Osazená deska prototypu analogového wattmetru - práce pracoviště [11]	44
19	Nárůst oscilací činného výkonu (je úměrný úhlu fázoru napětí) při blackoutu dne 8.8.2006 v Kalifornii, USA - převzato z [42]	45
20	Schéma měření při testování účinnosti fotovoltaického článku - vlastní práce autora [21]	48
21	$V - A$ charakteristiky fotovoltaického článku při různých teplotách - vlastní práce autora [21]	50
22	$P - V$ charakteristiky fotovoltaického článku při různých teplotách .	51
23	Schéma energetických hladin PN přechodu odpovídající známe teorii polovodičů - vlastní práce autora [21]	52
24	Změny šířky zakázaného pásu a Fermiho energetické hladiny v závislosti na teplotě podle fyzikální teorie polovodičů - vlastní práce autora [21]	53
25	Závislost napětí naprázdno, zkratového proudu a maximálního bodu výkonu fotovoltaického článku na teplotě (a) a extrapolace (b) - vlastní práce autora [21]	54
26	Maximální výkonové body na $V - A$ charakteristikách při teplotách $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - vlastní práce autora [21]	55

Seznam tabulek

Žádná tabulka není uvedena.

Seznam zkratk

Zkratky jsou vysvětleny v textu práce.

Seznam symbolů

U	napětí
Q	jalový výkon
\hat{Y}	fázor
ϕ	úhel posunutí/natočení vůči času $t = 0$
ω	úhlová rychlost
Y_{ef}	střední kvadratická hodnota signálu RMS pro sinusové průběhy
Y_r	reálná část komplexního čísla v Gaussově rovině
Y_i	imaginární část komplexního čísla v Gaussově rovině
A	ampér
W_p	watt peak
ψ	úhel torzní vibrace
k_t	torzní tuhost
I	moment setrvačnosti
L	indukčnost
ψ	úhel natočení
\hat{I}	fázor proudu
\hat{U}	fázor napětí
t	čas
E_k	kinetická energie
I_t	celkový moment setrvačnosti na točivém stroji
P_s	jmenovitý mechanický výkon generátoru
ω_s	úhlová rychlost otáčení stroje
P_m	mechanický výkon dodávaný do generátoru
P_e	požadovaný elektrický výkon
M_m	mechanický moment
M_e	elektromagnetický kroutící moment synchronního stroje
M_z	moment urychlující setrvačnou hmotu generátoru
a	koeficient poměrného tlumení generátoru

k_s	analogie elektromagnetické tuhosti rotoru generátoru
ΔF	zeměna frekvence
J	moment setrvačnosti v transmisi
k_p	torzní tuhost v transmisi
H	setrvačná konstanta stroje
Ω	frekvence spektrální hustoty
β	zátěžný úhel synchronního stroje
k_p	torzní tuhost v transmisi
j	imaginární jednotka
B	konstanta torzního tlumení
k	torzní tuhost synchronního stroje
P_d	počet pól párů synchronního stroje
$G(p)$	přenosová funkce synchronního stroje
p	Laplaceův operátor
$S_\beta(\Omega)$	výkonová spektrální hustota zakmitávání zátěžného úhlu
$S_\omega(\Omega)$	výkonová spektrální hustota zákmitů odchylek úhlové frekvence sítě
β_A	amplituda kmitání zátěžného úhlu synchronního stroje
Ω_0	vlastní frekvence systému
n	otáčky
$u(t)$	okamžité napětí
$i(t)$	okamžitý proud
V	volt
I_p	proud $V - A$ charakteristiky panelu
U_{oc}	napětí naprázdno
I_{sc}	zkratový proud
I_r	intenzita záření na fotovoltaický článek
P	výkon
K	kelvin
V_D	difuzní napětí
V_P	fotovoltaické napětí

E_F	Fermiho energie
E_g	šířka pásové mezery
T	termodynamická teplota
$\alpha; \gamma$	koeficienty pro monokrystalický křemík
W	watt
eV	elektron volt
°C	stupeň Celsia
ω_y	úhlová rychlost signálu
e	Eulerovo číslo

1 Úvod

Obecně můžeme hovořit o energetickém systému, jako o každém systému, který nějakým způsobem pracuje s energií. Začít lze například od zpracování energie a nakládání s energií v buňkách, pokračovat přes mnoho řízených systémů pracujících s jednotlivými druhy energie - rozvody tepla, rozvody stlačeného vzduchu, elektrické sítě, až po sofistikované systémy, které současně distribuují a přeměňují jednotlivé druhy energie. To mohou být motory, kogenerační/trigenerační jednotky nebo také komplexní energetické hospodářství v budovách.

V posledních letech dochází v elektrické soustavě k mnoha změnám. Tyto změny jsou především v charakteru zdrojů energie. To vede k výraznému ovlivnění stability rozvodné sítě. Zásadními novými prvky v síti jsou měniče, které mají výrazně jiné vlastnosti než klasické rotační stroje. Hlavní důvody k těmto změnám jsou dva.

Prvním je tak zvaná Zelená dohoda - chcete-li „Green Deal“. Naplňování (nejen) této dohody vede k tomu, že dochází k poklesu výkonu dynamicky stabilních zdrojů (redukce uhelných elektráren) a ke značnému nárůstu energie dodané z obnovitelných zdrojů, které jsou však nestabilní v dodávkách. Jen pro představu, pokles výroby elektrické energie z uhlí mezi roky 2010 a 2018 byl zhruba 5,7 TWh. Na druhou stranu produkce z obnovitelných zdrojů ve stejném období o zhruba 4 TWh vzrostla. Tyto hodnoty velmi přibližně odpovídají 5% roční produkce v ČR. (Tyto údaje jsou k dohledání například v dokumentu „Vyhodnocení naplňování Státní energetické koncepce ČR“ publikovaného 1.4.2021. Tento dokument je k dispozici na webových stránkách Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky.) Což jsou údaje z doby před ustanovením Zelené dohody, která tlak na danou problematiku ještě zvyšuje.

Druhým důvodem je útlum jaderné energetiky. Tento je parný především v Německu, kde rozhodnutím vlády došlo k odklonu od jádra. Za zmínku stojí také Rakousko, které je silně proti jaderné energii. Neposledním problémem oblasti poklesu

výroby elektrické energie z jádra, jsou i problémy ve Francii, kde je z technických důvodů odstaveno mnoho reaktorů a není jisté, zda budou opět zprovozněny.

Nejen tyto aspekty vedou k nezvyklému a nečekanému snižování stability rozvodné sítě. Lze však popsat i jiné sítě u kterých je třeba specificky řešit stabilitu. Jsou to například malé ostrovní sítě, o kterých se posledních letech hovoří, zmiňme například [1] [2]. V těchto sítích velmi často chybí větší stabilní zdroje. Velmi často se vyskytujícím zdrojem v těchto sítích jsou právě fotovoltaické panely s jejich měniči, jejichž stabilita je z hlediska dodávky velmi sporná.

Podobným případem malé sítě mohou být také drobné okrsky, které vzniknou případným rozpadem velké komplexní sítě - black-outem. Zabývat se vlastnostmi těchto sítí je důležité z důvodu případného rozběhu sítě od těchto malých okrsků.

V mnoha typech sítí lze nalézt právě synchronní stroje, ať už v podobě motoru či generátoru, které mohou být na nečekané nestability, vzniklé z výše popsaných důvodů, velmi citlivé. Tato práce se primárně zabývá synchronním strojem a jeho testováním z hlediska stability a spolehlivosti chování v elektrické rozvodné síti.

2 Cíle disertační práce

- Studium současného stavu určování stability, spolehlivosti a chování energetických celků a jejich částí.
- Studium spolehlivosti, chování a chodu mechatronických celků a jejich částí.
- Konstrukce metodiky testování a nastavování spolehlivého chodu energetického celku.

Cílem práce je zachytit a analyzovat některé jevy ovlivňující stabilitu a spolehlivost funkce elektrovodných okrsků s kombinovanými vlastními zdroji elektrické energie. Tím se rozumí okrsky o typových zdánlivých výkonech jedné až několika rozvodů 22kV/400V o celkovém typovém zdánlivém výkonu cca 1-30 MVA, spolupracujících s nadřazenou národní rozvodnou sítí, avšak schopných přejít po blackoutu do autonomního ostrovního provozu a po obnovení nadřazení sítě se k ní přifázovat. Jedná se o jevy:

a) Způsobené lokálními rotačními elektromechanickými soustavami – např. velkými synchronními stroji kogeneračních zdrojů na zemní plyn nebo bioplyn pracujících dlouhodobě ve zmíněných sítích, také velkých asynchronních motorů, rotačních kompenzátorů atd. Primárně nechtě je sledován vliv mechanických momentů setrvačnosti rotujících hmot.

b) Způsobené velkými solárními zdroji s fotovoltaickými panely připojených přes DC/AC měniče ve zmíněných sítích. Zde je sledována spolehlivost v souvislosti s životností použitých křemíkových panelů a její závislost na okolních klimatických podmínkách. Náhlý, a hlavně opakovaný, výpadek proudu z FV panelu (oblačnost, porucha kontaktu v panelu, . . .) může být budící funkcí pro nestabilitu okrsku.

Základním přínosem práce je komplexní řešení mechanické a elektrické části vycházející z jednotné, nerozdělitelné elektromechanické rovnice s vyjádřenou vlastní frekvencí kyvů sítě a jejím tlumením.

Hypotézou je, že velikost mechanických setrvačných hmot, které se na první pohled zdají být výhodným krátkodobým zdrojem energie po výpadku, je i „shora“ omezena možnostmi regulátorů otáček a přizpůsobení okrsku při jeho chodu na národní i globální distribuční síti.

3 Současný stav poznání

Elektrická distribuční síť je jednou z částí celkového rozvodu elektrické energie. Navazuje na přenosovou soustavu (k této jsou připojeny největší elektrárny/zdroje s výkonem nad 150 MW) a rozvádí elektrickou energii přímo ke koncovým zákazníkům. Bývají na ni často napojeny i zdroje, ne jen zátěž. Tyto zdroje jsou většinou menší než zdroje připojené přímo na přenosovou síť.

3.1 Stabilita elektrické distribuční sítě

Cílem této podkapitoly je objasnit pohled na stabilitu elektrické distribuční sítě a některé její aspekty.

Z formálního pohledu je stabilita stav rovnováhy mezi protichůdnými silami. Nestabilita vzniká, když porucha vede k trvalé nerovnováze mezi jednotlivými silami. Stabilita elektrické distribuční sítě označuje schopnost elektrické distribuční sítě při daných počátečních provozních podmínkách obnovit provozní rovnováhu po působení fyzikální poruchy. Vycházíme z toho, že většina systémových proměnných je omezena tak, aby byla zachována integrita sítě. Tato je zachována za předpokladu, že celá elektrická distribuční síť zůstane neporušená. To znamená, že nesmí dojít k vypnutí generátorů nebo odpojení zátěží. Výjimku tvoří ty prvky, které byly poruchově izolovány nebo záměrně odpojeny pro zachování funkčnosti celého zbytku sítě.

Je potřeba uvědomit si fakt, že elektrická distribuční síť je velmi **nelineární** systém. Parametry se v čase mění. Připojovaná a odpojovaná zátěž, stejně jako připojované a odpojované generátory, mění hodnoty dodávaného a odebíraného výkonu. To mění rovnováhu energie, a tím dochází ke změně frekvence sítě ekvivalentní rychlosti otáčení točivých strojů. Pokud je takovýto systém vystaven poruše, závisí jeho stabilita na povaze poruchy, okamžitém stavu v okamžiku poruchy a vlastnostech systému [3].

Poruchy mohou být různého charakteru a velikosti. Elektrická soustava má jak automatické ochranné systémy, tak i lidskou obsluhu. Přesto se ale nelze připravit na všechny možné scénáře a je potřeba síť stavět co nejrobustněji. Historicky byla stabilita elektrické soustavy stavěna především na udržení synchronismu, nicméně k nestabilitě může dojít i bez ztráty synchronismu. Pravděpodobně proto se stabilita elektrické distribuční sítě v literatuře hodnotí podle základních kategorií stability [3]:

- Úhlová stabilita rotoru
- Napěťová stabilita
- Frekvenční stabilita

Toto rozdělení však není pro analýzu úplně optimální. A to zvláště proto, že stabilita *zátěžného úhlu* a stabilita *frekvenční* jsou téměř **totéž**. Nejdříve však rozebereme tento běžný přístup a poté popíšeme přístup jiný.

3.1.1 Úhlová stabilita rotoru

Stabilita úhlu natočení rotoru (zátěžného úhlu synchronního stroje) se zabývá schopností vzájemně propojených synchronních strojů zůstat v synchronním stavu, jak za normálních provozních podmínek, tak i po působení poruchy. Jde tedy o to udržet, respektive obnovit, rovnováhu mezi elektromagnetickým momentem a mechanickým momentem každého synchronního stroje v soustavě.

Nestabilita, která může nastat, má podobu rostoucího kmitání rotorového úhlu některých generátorů, což vede ke ztrátě synchronizace s jinými generátory. Problém stability rotorového úhlu zahrnuje studium elektromechanických oscilací, které jsou typické pro energetické systémy.

Základním faktorem tohoto problému je způsob, jakým se mění výkon synchronních strojů při změně úhlu jejich rotoru. Mechanismus, kterým propojené synchronní

stroje udržují vzájemný synchronismus, spočívá v působení obnovovacích sil. Tyto působí vždy, když existují síly, které mají tendenci zrychlovat nebo zpomalovat jeden nebo více strojů vzhledem k ostatním strojům.

V ustáleném stavu existuje rovnováha mezi vstupním mechanickým momentem a výstupním elektrickým momentem každého stroje a otáčky zůstávají konstantní. Je-li soustava rozrušena, tato rovnováha se naruší, což má za následek zrychlení nebo zpomalení rotorů strojů podle zákonů klasické dynamiky. Pokud jeden generátor běží dočasně rychleji než druhý, úhlová poloha jeho rotoru vůči rotoru pomalejšího stroje se posune. Vzniklý úhlový rozdíl přenáší část zátěže z pomalého stroje na rychlý stroj. Tímto vzniká tendence snižovat rozdíl otáček, a tím i rozdíl úhlů.

Vztah mezi výkonem a úhlem je nelineární podle sinusové funkce. Tento fakt situaci ještě zhoršuje. Zvyšuje nestabilitu a tím i riziko ztráty synchronizace [4]. Toto platí jak pro jednotlivé stroje, tak pro skupiny synchronních strojů.

Změnu elektrického momentu synchronního stroje po poruše lze rozdělit na dvě složky:

- Synchronizační moment - ve fázi s poruchou
- Tlumící moment - ve fázi s odchylkou otáček

Stabilita systému je závislá na přítomnosti obou těchto složek. Nedostatek synchronizačního momentu vede k aperiodickým nestabilitám a nedostatek tlumícího momentu (který je pro tyto systémy typický) vede k nestabilitám periodickým.

Tato práce pracuje právě s problematikou nedostatečného tlumení a snaží se řešit důsledky nedostatečného tlumení novými postupy.

Úhlová stabilita se pro usnadnění řešení dá rozdělit do dvou kategorií [3]:

- Stabilita za malých poruch (v angličtině „small signal stability“ nebo „steady state stability“)
- Stabilita velkých poruch (v angličtině „Large disturbance rotor angle stability“ nebo také „Transient stability“)

Základní myšlenka tohoto rozdělení je napovězena již v názvu, především v názvu anglickém. V prvním případě se zabýváme v zásadě ustáleným stavem, do kterého vstupují drobné poruchy, které se vyskytují téměř neustále. Tedy drobné změny v zátěži sítě. Síť se pak stále vrací do původního ustáleného stavu. Nejpodstatnějším faktem je to, že poruchy jsou tak malé, že model systému pro analýzu lze linearizovat. Ve druhém případě již musíme uvažovat s nelinearitou. Poruchy jsou velké a systém se typicky po poruše takového rozsahu dostává do nového ustáleného stavu. Je potřeba vzít v potaz, že v elektrické distribuční síti může působit mnoho druhů poruch. Bylo by tedy neekonomické sítě budovat tak aby dokonale odolaly všem možným poruchám.

3.1.2 Napěťová stabilita

Napětí je jedním z nejčastějších parametrů, který je sledován. Napěťovou stabilitu popisujeme podle schopnosti elektrické distribuční sítě udržet napětí na všech vedeních, a to jak za normálních podmínek, tak ve stavu poruchy[5].

Mezi faktory, které běžně přispívají k nestabilitě napětí, mohou patřit nepřiměřený jalový výkon, charakteristiky zátěže, parametry přenosových vedení a transformátorů, zkratová porucha, neočekávané spínání a odepínání výkonu, charakteristiky zařízení pro kompenzaci jalového výkonu, činnost a koordinace zařízení pro regulaci napětí a podobně [6]. Typičtější nestabilitou je pokles napětí, ale může docházet i k přepětí.

Jako v předchozím případě je vhodné si rozdělit tuto problematiku do dvou kategorií [3]:

- Stabilita napětí při malých poruchách
- Stabilita napětí při velkých poruchách

První zmiňovaná kategorie se zabývá schopností systému řídit napětí po malých poruchách. To například jsou postupné změny zatížení systému. Tato forma stability je určena charakteristikami zátěží, spojitých i diskrétních regulačních a řídicích

prvků v daném časovém okamžiku.

Tento koncept je užitečný pro určení, jak bude v každém okamžiku reagovat napětí soustavy na malé změny v soustavě. Základní procesy přispívající k nestabilitě napětí při malých poruchách mají v podstatě ustálený charakter. Proto zde lze účinně využít statistickou analýzu. Kritériem stability napětí při malé poruše je, že za daných provozních podmínek pro každé vedení v soustavě se velikost napětí na vedení zvyšuje se zvyšováním jalového výkonu na tomtéž vedení. Soustava je napěťově nestabilní, jestliže alespoň pro jedno z vedení v soustavě platí, že velikost napětí na vedení U klesá při zvyšování jalového výkonu Q na tomtéž vedení.

Jinými slovy, systém je napěťově stabilní, pokud je citlivost $U - Q$ kladná pro každé z vedení, a nestabilní, pokud je citlivost $U - Q$ záporná alespoň pro jedno z vedení.

Druhá kategorie se zabývá schopností systému řídit napětí po velkých poruchách. To jsou například velké poruchy v rozvodném systému, ztráta výroby nebo mimořádné události v připojených částech sítě.

Tato schopnost je dána charakteristikami soustavy, charakteristikami připojeného zatížení a také vzájemným působením spojitých i diskrétních řídicích prvků a zapojených ochran. Určení stability při velkých poruchách vyžaduje zkoumání nelineárních dynamických vlastností soustavy.

Za typické problémy napěťové nestability související s kolísáním dodávek energie můžeme označit některé „zelené“, respektive obnovitelné zdroje. Tato problematika je v posledních letech velmi diskutována a řeší se například v [7] a [8].

Napěťové nestability mohou, ale nemusí, souviset s nestabilitami úhlu rotoru synchronního stroje. Tyto však ale jdou často ruku v ruce. Jedna může zvyšovat druhou a vice versa. Může tedy být nesnadné mezi nimi rozlišovat. Pochopení rozdílu je ale podstatné pro správnou konstrukci a případná vhodná opatření.

3.1.3 Frekvenční stabilita

Frekvenční stabilita řeší schopnost distribuční soustavy udržet stálou frekvenci v požadovaném nominálním rozsahu po závažném narušení soustavy. Takovýmto narušením je významná elektro-mechanická nerovnováha. Tedy nerovnováha mezi okamžitým požadavkem na spotřebu elektrické energie a schopností okamžitě dodat mechanický výkon ke generátoru (Uvažujeme síť pouze s konvenčními zdroji a spotřebiči. Popsat takovouto situaci lze vztahem 10). Závisí tedy na schopnosti obnovit rovnováhu mezi výrobou a zatížením soustavy s tím, že má dojít k co nejnížší ztrátě (odpojení) zatížení.

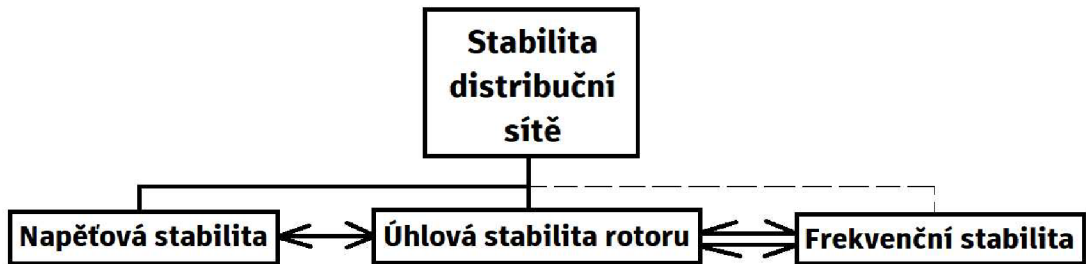
Výše popsaná výrazná nerovnováha má obvykle za následek velké výkyvy ve frekvenci, poruchy v toku výkonů, výkyvy v napětí a spuštění procesů a ochran, které nejsou nikde běžně modelovány. Tyto procesy mohou být velmi pomalé - dané například dynamikou kotlů.

Tato problematika je podstatná ve velkých i menších sítích. Dále je podstatná především pro jednotlivé ostrovy/okrsky sítě. Dle [3] stabilizace v tomto případě spočívá v tom, zda každý ostrov dosáhne přijatelného stavu provozní rovnováhy s minimální ztrátou zatížení. Určuje se spíše celkovou odezvou ostrova, o níž svědčí jeho střední frekvence, než relativním pohybem strojů. Obecně jsou problémy se stabilitou frekvence spojeny s nedostatečnou odezvou zařízení, špatnou koordinací řídicích a ochranných zařízení nebo nedostatečnou výrobní rezervou.

V posledních letech se ukazuje, že nastavené ochrany fungují a pokud některý úsek sítě začne mít potíže, je vhodnější jej oddělit od celku sítě. Oddělený úsek sítě je poté potřeba uvést do rovnováhy a připojit zpět k síti. Toto řešení se zdá přijatelnějším, než ohrozit například celou evropskou síť.

3.1.4 Jiný pohled na členění stability

Než se začneme zabývat úhlovou, frekvenční a napětíovou stabilitou, okomentujme pojem velikost poruchy. To, jaká porucha je ještě malá a jaká je velká, může být



Obrázek 1: Diagram vazeb stability sítě - vlastní práce autora

poněkud sporné téma. Nicméně v této práci chápeme poruchu malou jako poruchu, jejíž velikost ještě umožní použití linearizace funkce sinus bez ztráty přesnosti. Nebo také velikosti, která za použití linearizace nezpůsobí nepřesnosti výpočtu větší než zhruba 5%.

Za poruchy velké pak považujeme všechny poruchy ostatní.

Co se týče trojího dělení stability sítě v úvodu kapitoly je potřeba uvědomit si to že:

Úhlová stabilita a stabilita zátěžného úhlu jsou totéž.

Typické rozdělení na tyto části vychází nejspíše z toho, že systém není vnímán jako komplexní mechatronický/elektro-mechanický celek, ale jako dvě oddělené části. To jsou část mechanická a část elektrická. Technici zabývající se mechanikou mnohem raději pracují s úhly, kdežto elektrotechnici raději pracují s frekvencemi.

Dalším aspektem je možná také to, že frekvence se poměrně dobře měří a dá se tedy snadno sledovat. Důkazem je například aplikace švýcarské společnosti Swissgrid ¹

¹Dostupné na <https://www.swissgrid.ch/en/home/operation/grid-data/current-data.html>

(obdobu českého ČEPS), kde lze online sledovat frekvenci v některých bodech evropské sítě. Aplikace také umožňuje sledování natočení fázorů z jednotlivých velkých okrsků celoevropské sítě. Obrázek 2 zachycuje příklad okamžitého stavu sítě. Je na něm vidět, že měnící se frekvence není všude stejná a natočení měnících se fázorů se také liší.

Mezi frekvencí a zátěžným úhlem je vlastně pouze jednoduchá derivační, respektive integrační, vazba. Lze tedy říci, že úhel a frekvence se liší pouze o integrační konstantu, která je z hlediska stability v zásadě nezajímavá.

Důkazem této vazby je matematický popis v dalších kapitolách této práce.



Obrázek 2: Okamžitá frekvence a úhly fázorů sítě - zdroj www.swissgrid.ch

Co se týče napěťové stability, ta je se stabilitou zátěžného úhlu/frekvence také poměrně úzce spjatá a vzájemně se velmi ovlivňují.

Tento pohled na stabilitu znázorňuje diagram na obrázku 1. Jednoduchá obousměrná

šipka zde ukazuje vzájemnou propojenost a dvojitá obousměrná šipka naznačuje shodnost.

3.2 Popis distribuční sítě

Distribuční síť se popisuje za základě modelů. Tento popis je nezbytný pro řešení problematiky stability sítě a testování.

Tvorbě modelů sítě a jejich kalibracím, ať už jsou to modely komplexní nebo specificky zaměřené, je věnována v posledních letech velká pozornost. Jmenujme například [9] nebo [10]. Je pravdou, že takovéto modely zahrnují mnoho aspektů. Nicméně je to za cenu velkého zjednodušení linearizací.

Značnou část výzkumů tvoří model z informací získaných jen z omezených celků sítě a po kalibraci jej implementuje do rozsáhlejších celků.

Takovéto výzkumy mají jako výstup kompletní matematický aparát, popisující současný stav celé sítě. Problém ovšem nastává se současnými změnami. Tyto modely nejde ani obnovou kalibrace dostat do stavu, ve kterém by dávaly relevantní výsledky po připojení některých obnovitelných zdrojů (například fotovoltaika) energie a s nimi související moderní měniče [11] [12].

Nezanedbatelným problémem je také implementace takového modelu do současných systémů. Je žádoucí si uvědomit omezení reálného času. V současné době už se pracuje s preventivními zásahy, respektive s prediktivním řízením [8]. Bude tedy docházet ke střetu dvou protichůdných požadavků. Co nejvyšší přesnost výsledků modelu a oproti tomu co nejnižší výpočetní nároky. Což jediné umožňuje aplikaci v reálném čase a použití prediktivního řízení.

3.2.1 Elektrotechnické modely

Typicky se sítě modelují na základě poznatků a faktů elektrotechniky. Tyto postupy se prakticky používají a jsou na nich založeny modely, které jsou běžně implementovány v řízení sítě [13]. V současnosti se v tomto směru vývoj zabývá zdo-

konalování těchto modelů. Tato zdokonalení převážně zvyšují komplexnost těchto modelů. Tyto modely jsou určeny například pro využití v prediktivním řízení.

3.2.2 Elektro-mechanické modely

V několika posledních letech se ale často hovoří o vlivu setrvačných hmot mechanických částí celého systému [14].

Tento pohled napomáhá analyzovat síť jako elektro-mechanický/mechatronický celek. Nejen tedy elektrickou část, ale i část mechanickou a jejich řízení. Výroba energie v České republice doposud stojí především na klasických (rotačních) generátorech. Ke každému takovému generátoru jsou nezbytně připojeny setrvačné hmoty (spojky, rotory turbín, rotory samotných generátorů, ect.). Právě setrvačné hmoty jsou signifikantním faktorem pro chování generátorů. Mezi sítí a kinetickou energií setrvačné hmoty generátoru existuje elektro-mechanická vazba.

Díky této vazbě lze kinetickou energii přeměnit na elektrickou. Toto ale může fungovat i opačně. Dojde-li tedy k odchylce frekvence systému, energie může být ze sítě přesunuta zpět do setrvačné hmoty. Takovéto přesuny energie, respektive přetoky výkonu, se projeví jako nerovnoměrnost chodu generátoru.

Nejzásadnějším indikátorem stability střídavé sítě je síťová frekvence. Stabilita frekvence (a tedy i stabilní chod rotačních strojů v síti - generátorů i motoru) odpovídá bilanci činného výkonu. Tedy výkon, který je zmenšený o ztráty v systému a je dodáván, musí být co nejbližší výkonu, který je spotřebováván. Ideální by byla zcela dokonalá rovnováha. Oscilaci frekvence distribuční sítě pak můžeme popisovat pomocí oscilace tak zvaného „synchronfázoru“. Tyto oscilace jsou velmi úzce spjaty.

3.2.3 Fázor a synchronfázor

Úvodem definujme nejprve fázor. Fázor je vektor, jehož reprezentace je dána amplitudou a fází natočení. Použití fázorů je způsob popisu harmonických signálů v energetice běžně používaný.

Uvažujme tedy harmonický signál $y(t)$ ve tvaru:

$$y(t) = Y_{ef}\sqrt{2}[\cos(\omega_y t + \phi)] \quad (1)$$

Tento popis pak můžeme transformovat do fázorového tvaru:

$$\hat{Y} = Y_{ef}e^{i\phi} = Y_{ef}(\cos(\phi) + i\sin(\phi)) \quad (2)$$

kde velikost fázoru je vyjádřena v efektivní hodnotě, respektive v čistě komplexním tvaru:

$$\hat{Y} = Y_r + iY_i \quad (3)$$

Kde vy výše uvedených vztatích jednotlivé symboly jsou:

\hat{Y}	fázor
ϕ	úhel posunutí/natočení vůči času $t = 0$
ω_y	úhlová rychlost signálu
Y_{ef}	střední kvadratická hodnota signálu RMS pro sinusové průběhy
Y_r	reálná část komplexního čísla v Gaussově rovině
Y_i	imaginární část komplexního čísla v Gaussově rovině

Největší výhodou fázoru je, že neobsahuje parametr času a tak charakterizuje periodickou funkci jako celek, s pochopením, že frekvence souvisí s úhlovou frekvencí ω_y .

Synchronní fázor nebo zkráceně synchronfázor je pak fázorem s časovou značnou synchronizované sítě při jmenovité frekvenci.

Doplňme, že hodnoty střední kvadratické hodnoty jsou užitečné pro výpočty činných a jalových výkonů v elektrických obvodech. Použití fázorů zjednodušuje výpočty. Navíc reprezentace pomocí úhlů usnadňuje představu propojení elektrické a mechanické části systému a tím usnadňuje souborný popis mechatronického systému

jakým energetické systémy zajisté jsou.

Také je potřeba vzít v potaz, že rovnice (1) i (2) pracují s reprezentací prosté sinusoidy. Skutečnost je však značně složitější z důvodu přítomnosti šumu a dalších signálů. Při měření je tedy potřeba extrahovat podstatné frekvence pomocí například (diskrétní) Fourierovy transformace. To je však problematika měření, která se této práci týká jen okrajově. Pro následné porozumění elektromechanickým oscilacím stačí základní popis a uvědomění si potřeby synchronismu celé sítě.

3.3 Současná problematika stability elektrické distribuční sítě

Jedním z nejvíce diskutovaných témat v oblasti stability energetické soustavy je vliv obnovitelných zdrojů. Problematika stability je momentálně řešena několika způsoby:

- Zdokonalení současných systémů a strategií řízení
- Rozbor vlivu setrvačných hmot
- Monitorování a predikce pomocí modelů
- Využití stejnosměrných sítí

Řada výzkumů se zabývá změnami ve stabilitě rozvodné sítě s ohledem na obnovitelné zdroje. S přibývajícimi měniči, které jsou pro mnoho obnovitelných zdrojů energie nezbytné, se vlastnosti sítě mění [15]. Současné modely jsou nastaveny dle zkušeností s klasickými rotačními soustrojími a přestávají tak fungovat. To je dáno tím, že například fotovoltaické elektrárny jakékoliv setrvačné hmoty postrádají [16]. Absence setrvačných hmot má ale i jiná úskalí, než jen změnu chování sítě a s tím související špatnou funkčnost modelů. Právě setrvačné hmoty mohou působit jako tlumící prvek oscilací, které vznikají náhlými změnami výkonu. Takováto změna může nastat například právě u fotovoltaických panelů při průchodu oblačnosti.

Abychom ale nebyli zaujati jen fotovoltaickými panely (ačkoliv se zdá, že budou jedním z nejčastějších obnovitelných zdrojů), jsou zde i jiné zdroje, kde setrvačné hmoty absentují.

Další takovýto zdroj jsou větrné elektrárny. Problematiku řízení a stability těchto větrných turbín řešíme už více než 10 let [17]. Problém je analogický jako u fotovoltaiky. Větrné turbíny negenerují přímo střídavé napětí, ale napětí stejnosměrné. Představa udržení několika turbín v synchronismu je zcestná. Ukázalo se tedy jako vhodnější použít střídačů a z větrných turbín odebírat napětí stejnosměrné. Řízení otáček turbíny by bylo mnohem komplikovanější a ekonomicky méně výhodné, než napětí z nich usměrnit a do sítě připojit pomocí střídačů.

3.4 Nestability fotovoltaických elektráren

Problematika fotovoltaických panelů je v posledních letech stále diskutovanější a pracoviště autora se jimi velmi intenzivně zabývá také.

Technologie se stala mnohem dostupnější, a tím i užívanější. Toto je dáno jednak zlevněním panelů a také státní podporou, také celoevropskou podporou obnovitelných zdrojů energie. Fotovoltaické články jsou právě typickým příkladem obnovitelného zdroje energie.

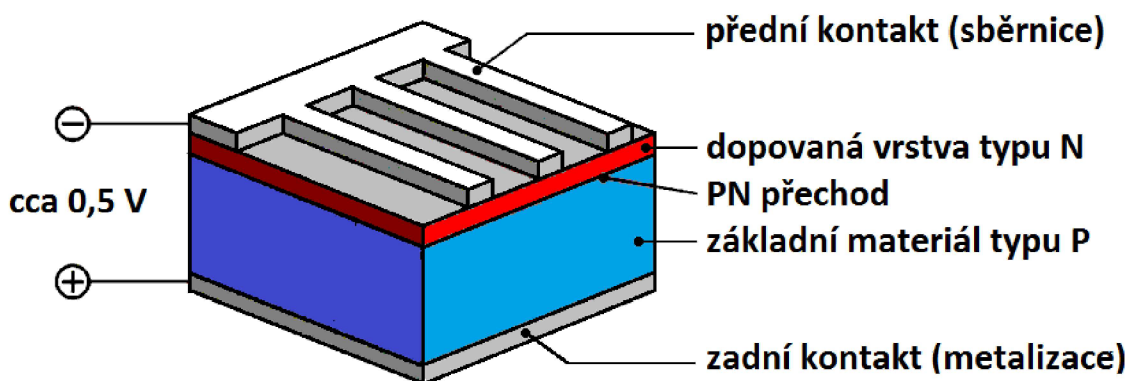
V této subkapitole budou stručně popsány principy a aplikace fotovoltaiky a jejich vliv na stabilitu sítě.

3.4.1 Fotovoltaický článek a panel

Fotovoltaický článek je polovodičový prvek, který přeměňuje sluneční energii na elektrickou energii s využitím fotovoltaického jevu. První takovýto článek byl patentován a dále vyvíjen na přelomu poloviny dvacátého století v USA. Nicméně první experimenty probíhaly už na konci století devatenáctého.

Tento článek má P-N přechod a skládá se z několika vrstev, z nichž jedna je vrstva z krystalického křemíku typu P a druhá, přibližně 500 nm silná, vrstva polovodiče

typu N. Mezi těmito vrstvami je P-N přechod, který je odděluje. Řez strukturou článku je na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma fotovoltaického článku [18]

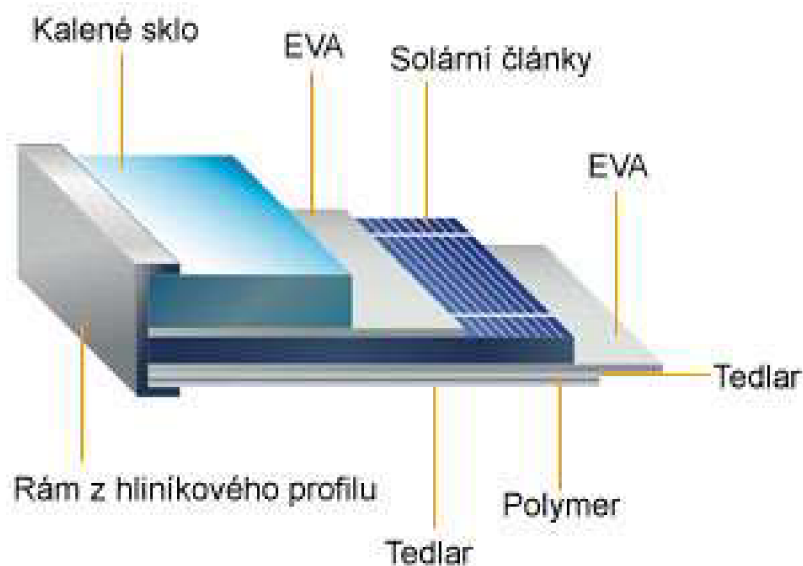
Když je článek vystaven slunečnímu záření, vznikne na P-N přechodu elektrické napětí. Na horní a spodní straně článku jsou kontakty v podobě mřížek. Články produkují stejnosměrné napětí a proud, které při maximální intenzitě slunečního záření dosahují hodnoty až 0,5 V a 3 A. Což jsou hodnoty poměrně malé.

Nejčastěji užívaným typem fotovoltaických článků jsou ty na bázi křemíku - vyráběné z oxidu křemičitého. Křemík je využit z mnoha důvodů. Má vhodné elektrické vlastnosti, je levný a je to druhý nejčastěji se vyskytující prvek v zemské kůře. Křemík se nejprve taví do formy ingotů s čistotou přibližně 98 % a tento materiál je následně dále čištěn. Poté je křemík využíván v podobě tenkých plátků, na které jsou nanášeny další vrstvy, jak je zmíněno výše. Účinnost fotovoltaických článků se dnes pohybuje mezi 20ti a 30ti procenty.

Jak je výše zmíněno, parametry napětí a proudu z jednoho fotovoltaického článku jsou poměrně malé. Proto se tyto serio-paralelně spojují. Takovéto spojení se pak nazývá solární panel nebo solární modul.

V základu se většinou panely skládají z rámu, tvrzeného skla a zadní ochranné desky. Tyto chrání celek panelu před mechanickým poškozením a vnějšími vlivy. Dále pak v panelu najdeme výplňový materiál, který je určen k ochraně samotných

fotovoltaických článků. Řez takovýmto panelem je na obrázku 4.



Obrázek 4: Struktura fotovoltaického panelu [18]

Takovýto panel už může mít dostatečné parametry pro napájení nějakého zařízení. Výkon panelu se udává v jednotce Watt peak (značeno Wp). Tato jednotka je maximální hodnotou výkonu panelu za ideálních podmínek.

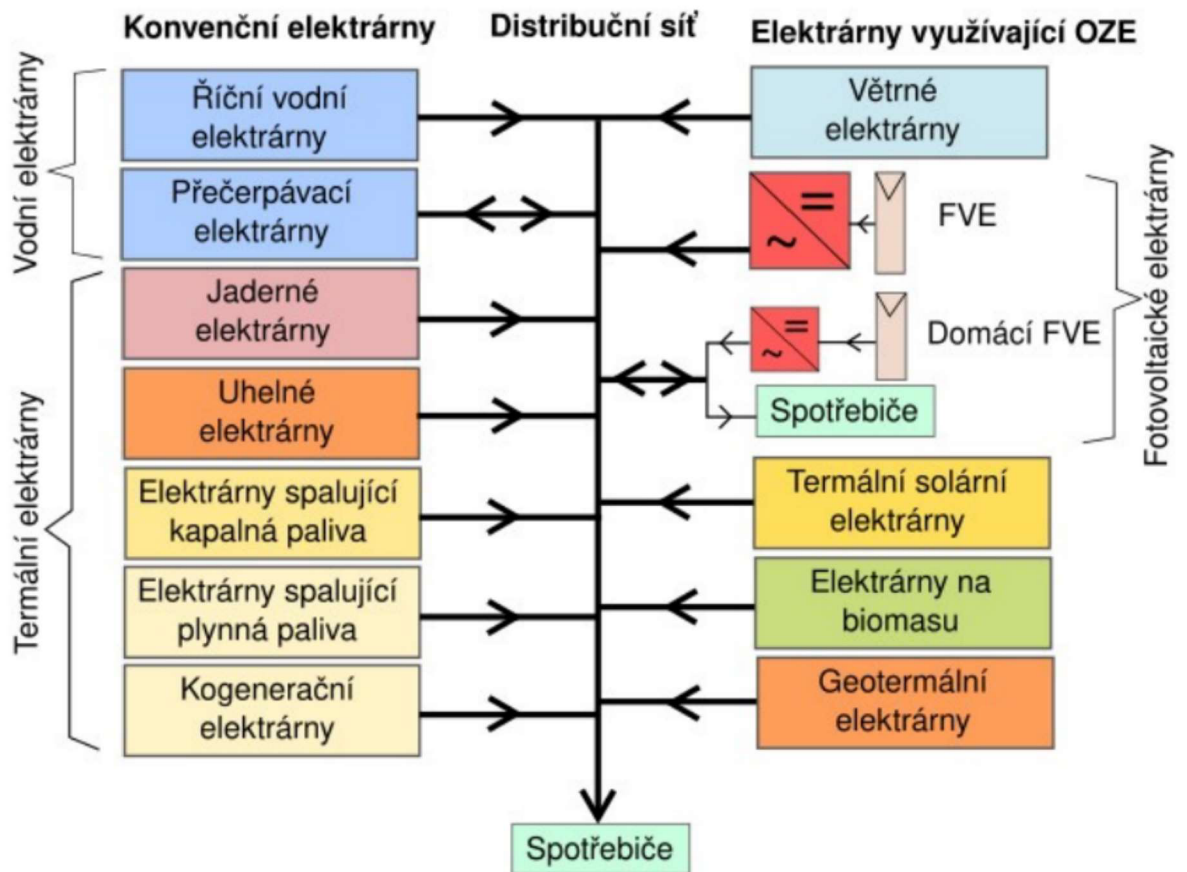
Ideální podmínky nastávají za předpokladu, že panel je neznečištěný a světlo dopadá nestíněně a přímo na panel. Schopnost produkovat energii tedy závisí jak na velikosti panelu, tak i na jeho poloze, stavu a podmínkách, ve kterých se nachází.

Výše popsané panely se ještě většinou propojují do polí. Takovéto pole už lze považovat za fotovoltaickou elektrárnu, která se dále připojuje do sítě.

3.4.2 Připojení fotovoltaické elektrárny do sítě

Fotovoltaická elektrárna samozřejmě může pracovat i v ostrovním režimu v kombinaci s úložištěm energie. To ale pro tuto práci není zajímavé.

V oblastech, kde je dostatečně hustá distribuční síť, se fotovoltaické elektrárny do sítě připojují zcela běžně. Výhodou je, že můžeme v daném místě vyrábět a spotřebovávat energii. Nemusíme tak řešit problémy s tím, jestli je lokálně vyrobené energie přebytek či nedostatek. Energii přebytečnou lze dodat do elektrické distribuční sítě a naopak energii, která chybí, lze ze sítě odebrat.



Obrázek 5: Připojení fotovoltaické elektrárny do sítě [11]

Na obrázku 5 jsou zobrazeny jednotlivé druhy elektráren a jejich integrace do distribuční sítě. Jednotlivé šipky ukazují směr toku energie. Je jasné, že pro správnou funkci distribuční sítě musí být veškerá vyrobená energie stejná s energií spotřebovanou,

jelikož distribuční síť jako taková není schopna energii skladovat.

Přítomnost fotovoltaické elektrárny (na obrázku 3 FVE) samozřejmě snižuje požadavky na výrobu konvenčních elektráren. Nicméně konvenční elektrárny jsou schopny poměrně pružně reagovat a rychle přizpůsobovat výkon. Jenomže fotovoltaická elektrárna tohoto schopna není. Výkon fotovoltaické elektrárny je značně vázán (nejen) na počasí. Toto je potřeba řešit přítomností zdrojů, které jsou schopné rychle reagovat na změny počasí. Takovými zdroji jsou například paroplynové (jen ve smyslu zvýšení dodávky energie) elektrárny či elektrárny přečerpávací, které jsou schopny energii i odebírat. V každém případě tyto velmi nahodilé výkyvy výkonu sítě neprospívají.

3.4.3 Nestabilita výkonu fotovoltaických elektráren

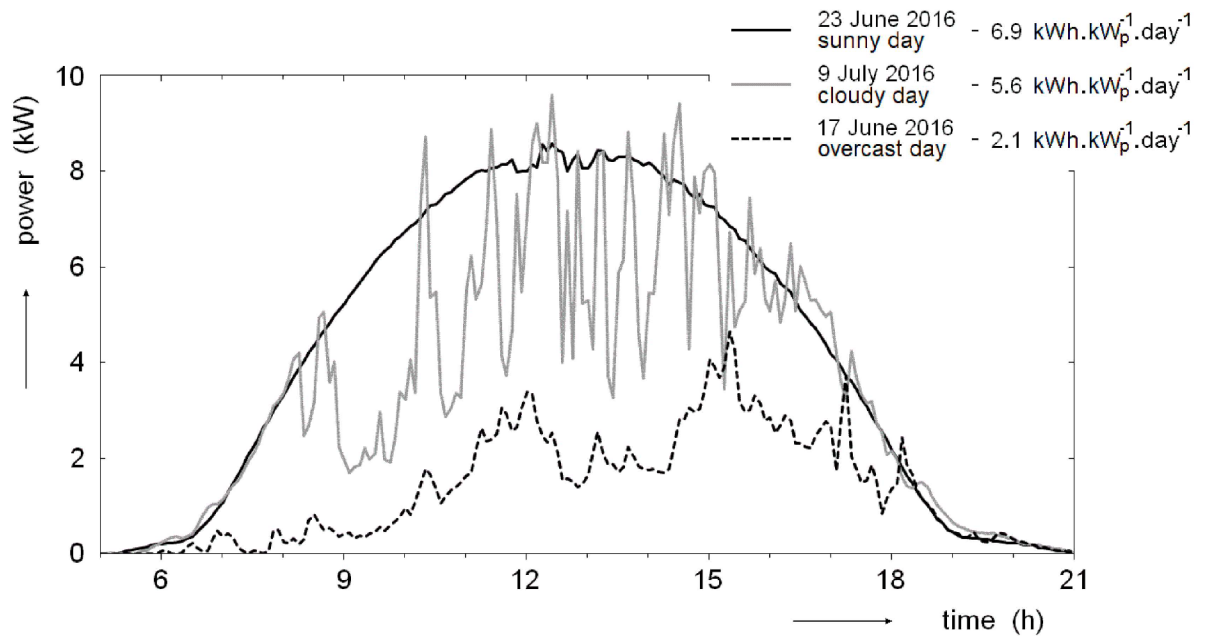
Smysl připojení fotovoltaických elektráren menšího rozsahu, jak technický tak environmentální, má především u budov. V tomto případě je potřeba menší instalace konstruovat tak, aby pokrývaly především potřeby budovy a jejich vliv na síť byl co nejmenší. Avšak často je opak pravdou. Nehledě na to, že existuje mnoho (i velmi velkých) fotovoltaických elektráren, které jsou na síť připojeny přímo.

Připojení fotovoltaiky do distribuční sítě má na síť mnoho negativních vlivů. Tyto vlivy řeší mnoho studií, například [14] [19] [20]. Tyto práce ovšem problematiku řeší snahou vylepšit současné metody pro řízení dodávaného výkonu. Neřeší příliš změnu přístupu nebo prevenci problémů.

Velikost změn výkonu, v průběhu různých dní, demonstruje obrázek 6. Jedná se sice o záznam ze spíše menší instalace (10 kWp), ale větší instalace se budou chovat analogicky. Pro distribuční síť bude horší jen to, že výkon může být o několik řádů vyšší.

U takovýchto větších systémů, které jsou připojeny na síť přímo (s využitím měniče), lze konstatovat, že jejich připojení na distribuční síť musí mít zásadní (negativní) vliv na její stabilitu.

V dlouhodobějším měřítku lze pohlížet na výkon fotovoltaických elektráren i z



Obrázek 6: Výkon solární elektrárny v průběhu různých dní - výzkum pracoviště [21]

hlediska schopnosti vůbec dodat dané množství energie za určitý delší čas. Je potřeba si uvědomit, že panely stárnou a snižuje se jejich účinnost. Navíc dochází časem k jejich opotřebení a poškození [22] [23]. Další nepříjemností je, že tato degradace je možná rychlejší než se původně očekávalo [22]. Otázkou tedy v dlouhodobém horizontu je, zda opravdu budeme mít tolik fotovoltaických elektráren jako jsme očekávali a stabilita sítě nebude ohrožena tímto nedostatkem.

Podobným nežádoucím fenoménem může být i chování fotovoltaiky v extrémních teplotách, které možná neočekáváme, ale klima se mění. Chování fotovoltaických článků v extrémních podmínkách popisuje i jedna z experimentálních částí této práce. Podobných, prozatím neprozkoumaných, jevů bychom jistě našli více.

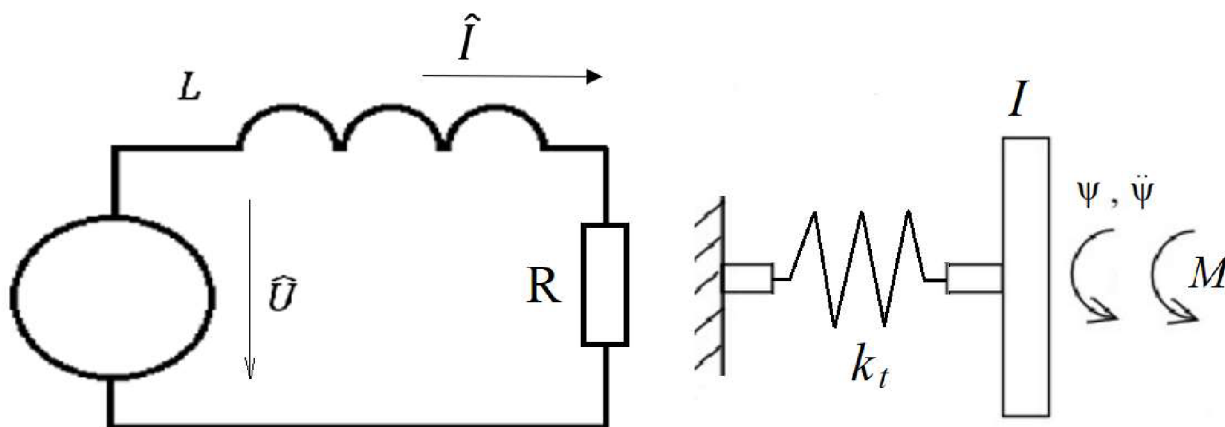
4 Teoretický výklad pro vlastní práci

V této kapitole je snahou stručně popsat vazbu mezi frekvencí sítě a zátěžným úhlem synchronního stroje, k čemuž se hodí analogie torzních vibrací. Dále pak je zde popsána historická motivace k této analogii.

V neposlední řadě pak tato kapitola popisuje základní teorii chování setrvačných hmot v distribuční síti a uvažovaný okřesek distribuční sítě v tomto výzkumu.

4.1 Analogie torzních vibrací

Pro lepší pochopení elektro-mechanických oscilací je potřeba popsat mechanickou analogii k natáčení fázoru.

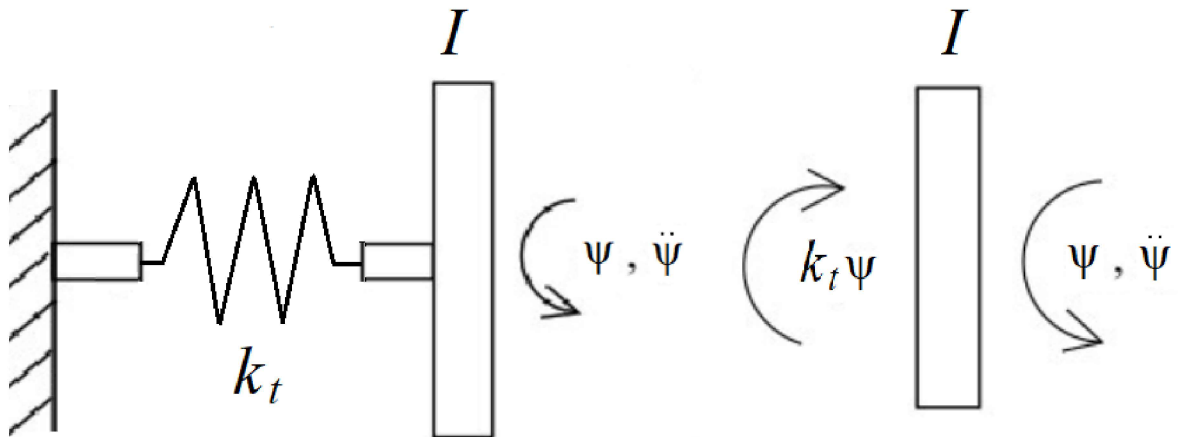


Obrázek 7: Model mechanického systému a analogický obvod - vlastní práce autora

Vycházejme z toho, že systémy z obrázku 7 jsou z hlediska matematického popisu velmi podobné. Nejprve rozeberme každý systém zvlášť.

Popis přes jednu setrvačnou hmotu považujeme pro tuto práci dostačující. Nicméně tato analogie lze rozšířit i na více hmot pro popis komplikovanějších struktur.

System s jednou setrvačnou hmotou demonstruje obrázek 8. Hřídel považujeme za čistě torzní prvek bez vlastní hmotnosti. Naopak disk je považován za čistě setrvačnou hmotu bez jakékoliv tuhosti.



Obrázek 8: Model jednohmotového torzního systému (vlevo) a jeho uvolnění (vpravo) - vlastní práce autora

Pokud tomuto systému udělíme počáteční natočení (kolem osy hřídele), setrvačná hmota v podobě disku začne volně kmitat. Frekvence kmitání bude odpovídat vlastní frekvenci tohoto systému.

Pokud přestaneme uvažovat vetknutí, může se rotor začít otáčet. Toto otáčení bude mít nominální úhlovou rychlost ω a začnou vznikat torzní vibrace ψ . Okamžitá úhlová rychlost pak bude definována vztahem:

$$\omega_k = \omega + \dot{\psi} \quad (4)$$

Podstatným faktem je, že nominální úhlová rychlost zůstává stejná, ale samotné úhlové natočení je proměnlivé.

Dalším předpokladem tohoto modelu je, že vlastní frekvence torzního systému je

nezávislá na úhlové rychlosti otáčení ω . Z tohoto důvodu bude pak disk kmitat se stejnou frekvencí jako kdyby úhlová rychlost byla nulová. Tedy bude kmitat s vlastní frekvencí původního torzního systému jednoduchým harmonickým pohybem.

Torzní tuhost k_t systému z obrázku 8 by reálně závisela na vlastnostech hřídele. To pro tento okamžik není podstatné, protože tato tuhost bude v konečné úvaze sloučena do tuhostí magnetických polí, považujeme ji tedy za danou konstantu.

Disk lze uvolnit dle pravé části obrázku 8 a tím dostaneme rovnici:

$$I\ddot{\psi} = -k_t\psi \quad (5)$$

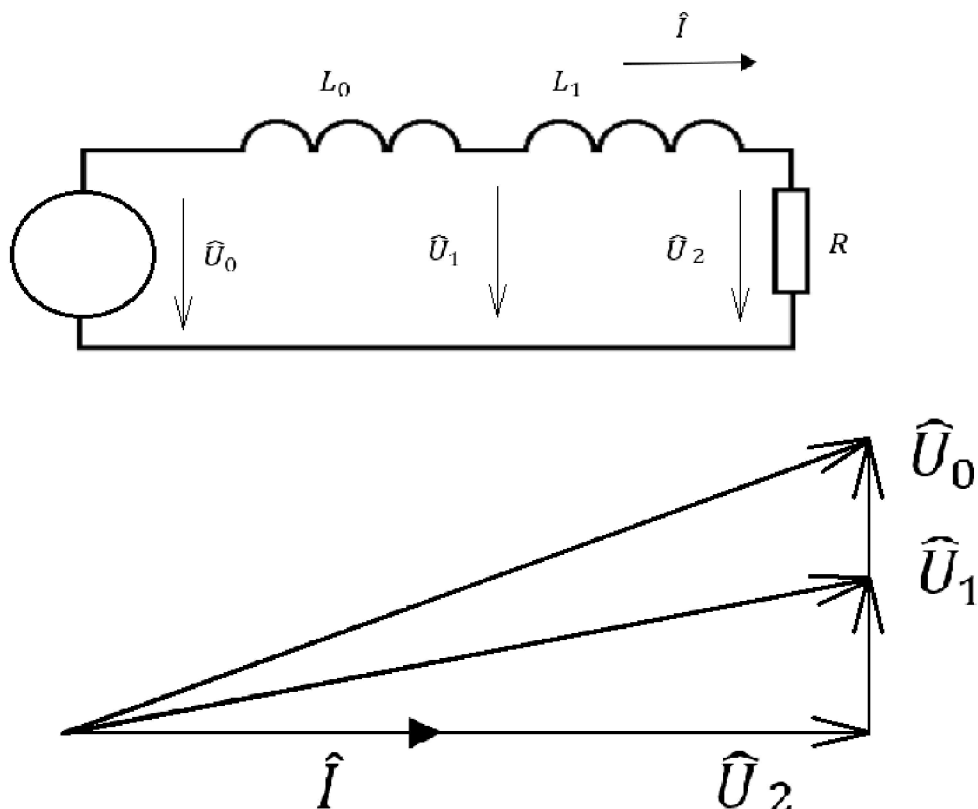
kde:

I moment setrvačnosti disku

Rovnice (5) je pak rovnicí volných kmitů tohoto torzního systému, na kterou můžeme navázat analogicky tuhost magnetických polí a zátěžný úhel.

Pro popis elektrické části bude vhodnější uvažovat trochu složitější systém na obrázku 9, protože indukčnost L_0 postihne indukčnost synchronního stroje a indukčnost L_1 postihne indukčnost sítě. O zásadní rozdíl vůči obvodu z obrázku 7 se ale nejedná. Dvě sériové indukčnosti se snadno dají nahradit pouze jednou. Budeme-li síť uvažovat jako systém primárně tvořený indukčnostmi transformátorů a točivých strojů, pak má reaktance převážně induktivní složku a pro zjednodušení (jednoduchou torzní analogii) můžeme reálnou část zanedbat. Na obrázku 9 je tato situace znázorněna jak schématem, tak fázory napětí a proudu.

Při tomto předpokladu vidíme na obrázku 9, že zátěž činným výkonem bude fázor natáčet a dojde ke zpoždění mezi vstupním a výstupním fázorem. Bude-li trojúhelník malý, pak je úbytek napětí zanedbatelný a tím je zanedbatelná i změna absolutní hodnoty napětí.



Obrázek 9: Zjednodušený elektrický model soustavy - vlastní práce autora

S těmito předpoklady můžeme úlohu z obrázku 9 podstatně zjednodušit. Toto zjednodušení spočívá v tom, že činné zatížení bude způsobovat pouze pootočení fázorů napětí a pokles napětí zanedbáme.

Nyní k samotné analogii.

Budeme-li uvažovat omezenou část sítě, pak jsou jednotlivé prvky sítě tvořeny setrvačnými hmotami na hřídelích synchronních strojů a tuhostmi magnetických polí - jak generátorů, tak vedení či přenosových transformátorů.

Pak dostáváme analogii k mechanickému torznímu systému, kde konstantu torzní tuhosti k_t nahradíme tuhostí magnetických polí indukčností synchronního stroje a indukčností sítě, setrvačnost disku I nahradíme momenty setrvačnosti soustrojí a

úhel natočení ψ pak bude odpovídat zátěžnému úhlu.

Z této analogie vycházíme při výpočtech v dalších kapitolách.

4.1.1 Historická motivace k analogii torzních vibrací

Popis dynamického chování fázorů napětí a proudů v rozvodných soustavách je velmi blízký popisu dynamického chování mechanických veličin transmisí pro mechanické přenášení výkonů. Což bylo v podstatě nastíněno výše.

V 19. a 20. století byly problémy mechanických transmisí úspěšně řešeny, a to dokonce explicitně matematickým popisem. Nabízí se tedy myšlenka použít k řešení fázorového neklidu v elektrických sítích některých historických metod, uložených v dnes už zapomenutých knihách např. od prof. Kožešníka [24]. Zejména se jedná o využití metody zrcadlení souměrných částí, o využití metodiky určení kmiten a uzlů kmitání, metodiky určení kritických frekvencí kmitání. Výhodou těchto metod, oproti dnešnímu modelování, je to, že usnadňují vytvoření exaktních teoretických závěrů, přispívajících ke konkrétním zásahům pro zvýšení stability v okrcích sítě.

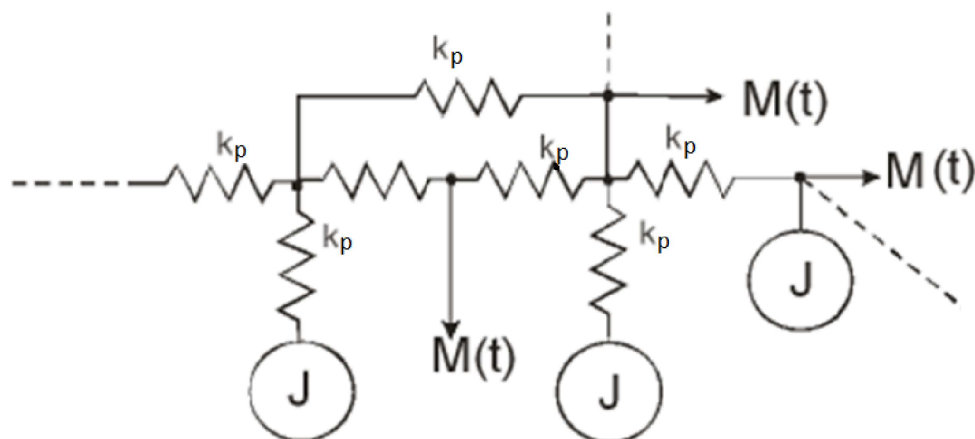


Obrázek 10: Přádělna bavlny v Lancashire UK, museum zachovávající stav z r. 1905
- zdroj museum Lancashire

System mechanických transmisí byl v 19. století v textilkách značně rozsáhlý a rozměrný. Obsahoval množství setrvačných hmot spojených pružnými hřídeli a řemeny. Transmise v textilce ukazuje například obrázek 10.

Složitá soustava také obsahovala budící zdroje kmitů, jak na straně pohonu parním strojem s nevelkým počtem válců, tak na straně poháněných mechanismů obsahujících nelinearity pákových převodů atd. Proto mechanické transmise trpěly torsními oscilacemi, vedoucími často až k lomu hřídelů, nebo k přetržení řemenů. Měřicí prostředek k vyšetření oscilací byl tehdy jednoduchý mechanický torsiograf, zaznamenávající zkroucení torzní pružiny, přes kterou byl na zkoumanou rotující část připojen setrvačník, o němž se předpokládalo, že se točí rovnoměrně.

Analogicky, dnešní výrobní a rozvodná síť je tvořena setrvačnými hmotami točivých elektrických strojů a pružnými členy, které vytváří elektromagnetická pole, jak točivých strojů, tak magnetickými poli přenosových transformátorů a magnetickými poli vedení. Detailněji je tato analogie popsána v předchozí části této kapitoly.



Obrázek 11: Mechanický model vyňaté části transmise

V mechanickém modelu není přímo zobrazena velikost elektrického napětí v soustavě. To může být pro elektrotechnika zarážející. Toto je dáno tím, že praktici právě ze změn snadno měřitelné velikosti napětí v jednotlivých uzlech soustavy usuzují na její chování z hlediska stability. Napětí v soustavě je v mechanickém modelu

schováno v konstantách tuhosti, které reprezentují velikosti magnetických polí v elektrických strojích.

Část mechanického modelu rozsáhlejší transmise bychom si mohli představit například pod schématem na obrázku 11.

Podobným způsobem by bylo možné modelovat omezený okresek distribuční sítě a analyzovat jej pomocí postupů vyvinutými pro mechanické soustavy, jak je popsáno výše v této subkapitole.

4.2 Chování setrvačných hmot točivých strojů v distribuční síti

Nyní popíšme jak se systém chová z pohledu energie.

Kinetickou energii uloženou v setrvačných hmotách synchronního stroje lze popsat jako:

$$E_K = \frac{1}{2} I_t (\omega_s)^2 \quad (6)$$

Na jejímž základě se určuje setrvačná konstanta stroje H , která určuje čas, po který je stroj schopen dodávat jmenovitý výkon. Definice tedy:

$$H = \frac{E_K}{P_s} = \frac{I_t (\omega_s)^2}{2P_s} \quad (7)$$

Kde členy v předchozích vztazích jsou:

I_t celkový moment setrvačnosti na točivém stroji

P_s jmenovitý mechanický výkon generátoru

ω_s úhlová rychlost otáčení stroje

Energetický model pro analýzu synchronního generátoru pak odhaduje odezvu

setrvačnosti coby změnu úhlové rychlosti ω_s . Výkonovou nerovnováhu tedy lze popsat jako změnu kinetické energie, tedy takto:

$$\dot{E}_k = I_t \omega_s \dot{\omega}_s = \frac{2HP_s}{\omega_s} \dot{\omega}_s = P_m - P_e \quad (8)$$

kde:

P_m mechanický výkon dodávaný do generátoru

P_e požadovaný elektrický výkon

Takto lze nejzákladnějším způsobem popsat vliv setrvačných hmot na pohybovou energii.

4.3 Kyvná rovnice

V anglické literatuře je tato problematika k nalezení pod názvem „swing equation“ a popisuje kývání rotorového úhlu během narušení synchronismu.

Hlavním parametrem pohonu synchronního stroje je mechanický moment M_m na jeho hřídeli. Stroj pak produkuje kroutící moment elektromagnetický M_e . Moment udělující zrychlení rotoru vzniká při jakékoliv změně, kdy platí $M_m > M_e$. Pro tento moment pak dostaneme vztah:

$$M_z = M_m - M_e \quad (9)$$

V této rovnici zanedbáváme ztráty. Tedy kroutící moment vzniklý třením, ztrátami v ložiscích či v železe. Moment M_z urychluje hlavní setrvačnou hmotu generátoru. Můžeme tedy psát kyvnou rovnici:

$$I_t \frac{d\omega_s}{dt} = M_z = M_m - M_e \quad (10)$$

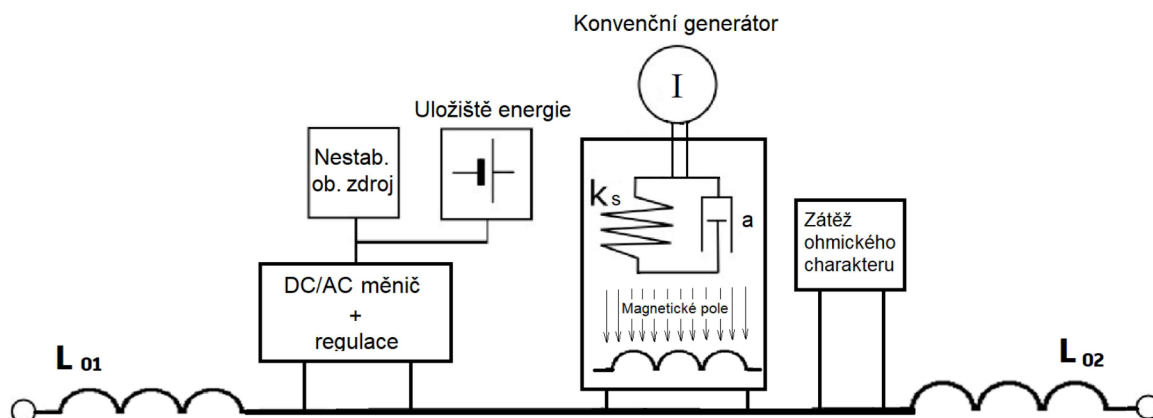
kde:

t čas

ω_s úhlová rychlost rotoru stroje

4.4 Uvažovaný rozsah okrsku sítě

V této práci uvažujeme pouze omezený okrsek sítě. Tedy část sítě, která má vlastní zdroje elektrické energie a také spotřebiče. Tento okrsek musí být schopen fungovat v ostrovním režimu.



Obrázek 12: Schéma okrsku sítě - vlastní práce autora

Zjednodušíme tedy tuto úvahu na oblast za odbočkou 22 kV transformátoru, případně na ostrovní síť do výkonu 30 MW. Od takového okrsku očekáváme chování odpovídající popisu v předchozích dvou subkapitolách. Tento okrsek si můžeme schématicky představit například jako na obrázku 12. Jsou zde zobrazeny dva základní zdroje - klasický točivý generátor a některý z nestabilních obnovitelných zdrojů, které dodávají energii do sítě přes měnič. Jednotlivé indukčnosti L představují indukční charakteristiky prvků sítě, a vyjadřuje tlumení generátoru a k_s analogii elektromagnetické tuhosti rotoru generátoru.

4.5 Fotovoltaické panely a teplota

Účinnost fotovoltaické přeměny energie je důležitým parametrem fotovoltaických článků. Vývoj rekordních účinností fotovoltaických článků byl popsán například v článku [25]. Další důležité parametry fotovoltaických článků také významně závisí na teplotě [26] [27]. Tento fakt má souvislost s teorií pevných látek [28]. Změny teploty způsobují změny Fermiho energetické hladiny v pásové struktuře energetických hladin [29]. V důsledku toho se změní napětí naprázdno i elektrický výkon dodávaný fotovoltaickým systémem [30] [31]. Konstrukce FV systémů s koncentrátory slunečního záření může výrazně zvýšit teplotu FV modulů. Tím se však sníží účinnost přeměny fotovoltaické energie, a proto musí projektant hledat optimální rovnováhu mezi zvýšením výkonu v důsledku vyšší intenzity koncentrovaného záření na fotovoltaických článcích a snížením účinnosti přeměny energie v důsledku vyšší teploty.

Teplotu fotovoltaických článků lze ovlivnit také konstrukcí hybridních fotovoltaických/fototermických systémů [32], nebo konstrukcí s pasivním chlazením. Závislost množství vyrobené elektřiny na teplotě FV modulů byla sledována např. v práci [33].

5 Vlastní výsledky

5.1 Výpočet a test maximální setrvačné hmoty pro daný maximální zátěžný úhel

V této subkapitole je popsána souvislost mezi frekvenčními oscilacemi a setrvačnými hmotami synchronních strojů. Znalosti z teoretické části této práce jsou poté aplikovány na model vazby synchronního stroje a oscilací sítě pro určení maximální setrvačné hmoty připojené k synchronnímu stroji. Podmínkou je maximální amplituda zátěžného úhlu synchronního stroje.

Výpočtový postup je pak ověřen experimentem.

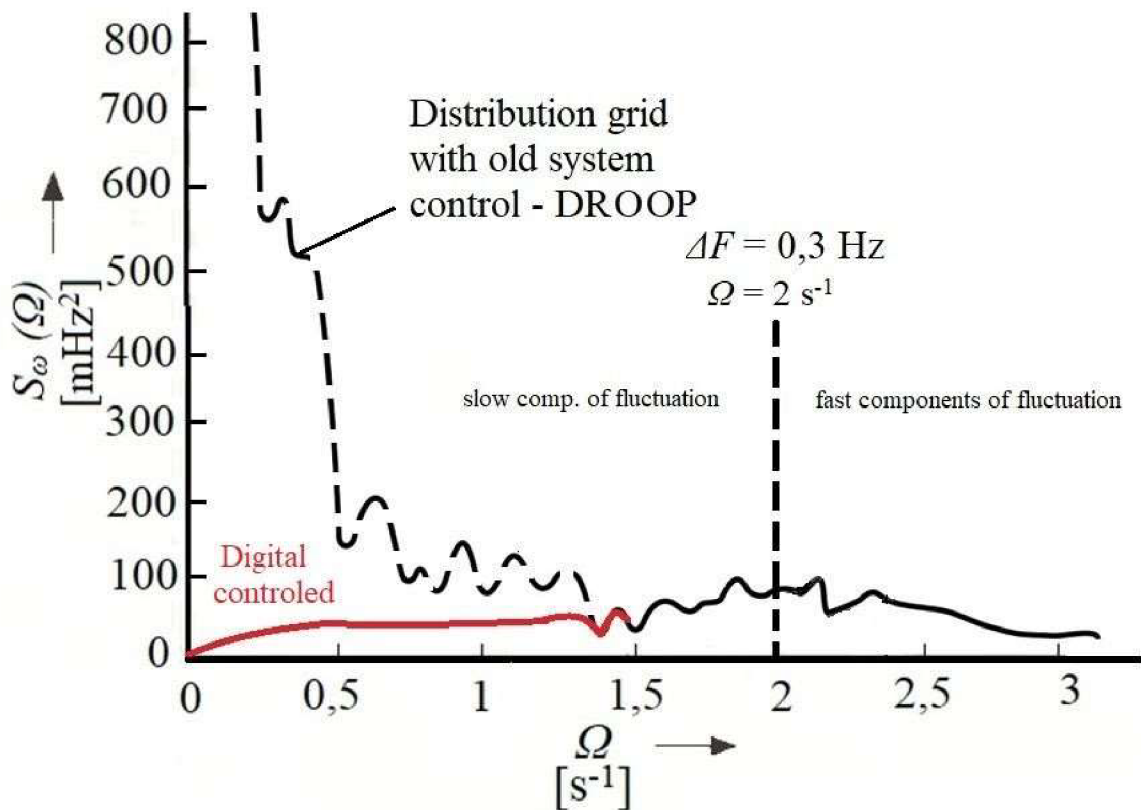
5.1.1 Frekvenční oscilace - souvislost se setrvačnými hmotami

Myšlenka, že síťové napětí má koherentní sinusový průběh s konstantní frekvencí, neodpovídá realitě parametrů, které v síti jsou. Přesná měření ukazují nestabilitu frekvence sítě a fáze napětí. Nestabilita frekvence má charakter náhodného šumu. Tak tomu je proto, že je to reakce na nahodile se měnící poptávku po energii v průběhu dne[34]. Tyto děje jsou významné hlavně v malých ostrovních sítích [35][36][37].

Nestabilitu frekvence sítě lze popsat pomocí statistických vlastností. Na vyhodnocení nestabilit lze využít spektrální výkonovou hustotu $S_{\omega}(\Omega)$. Příklad funkce charakterizující spektrální hustotu odchylek od požadované frekvence sítě je ukázán na obrázku 13.

Spektrum těchto odchylek lze rozdělit na dvě složky:

- Pomalá složka - pro $\Omega < 2s^{-1}$ (průměr $\Delta F < 0,32$ Hz), který je určen vlastnostmi regulace v elektrárnách stejně jako vlastnostmi přísné centrální regulace frekvence. Propojení původně regionálních úseků distribuční soustavy do větších komplexních sítí, a později do evropské centrální sítě, způsobila zmenšení amplitudy velmi pomalých odchylek. Pak tento jev pokračoval, což



Obrázek 13: Příklady výkonové spektrální hustoty $S_{\omega}(\Omega)$ při fluktuacích frekvence - vlastní práce autora [38]

vedlo k aktuálnímu stavu téměř nulové odchylky ve frekvenci distribuční sítě.

- Rychlá složka pro $\Omega > 2s^{-1}$ (průměr $\Delta F > 0,32$ Hz), která je určena úhlovou tuhostí napájecího systému v případě změn výkonu. Tato pochází z velikosti a fázové změny okamžitého napětí při jeho snižování na elektrickém vedení a rychlých změn zatížení. Úhlová tuhost se vztahuje k úhlové tuhosti fázorů napětí.

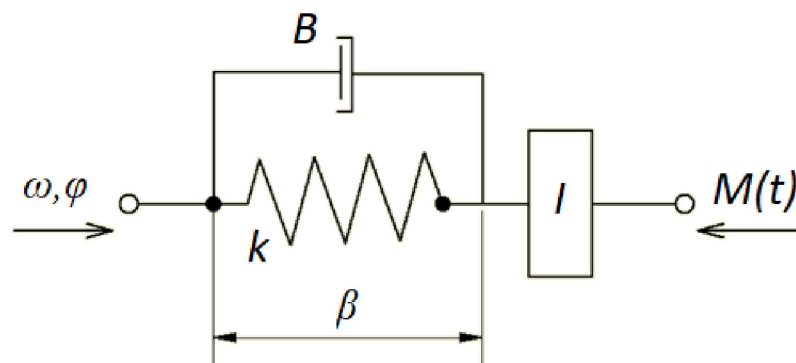
Obrázek 13 ukazuje příklad spektrogramu nestabilit úhlové frekvence distribuční sítě. Moderní distribuční sítě s digitálním řízením frekvence mají nulovou průměrnou odchylku od střední frekvence, ale jsou zde viditelné nestability frekvence a úhlu fázoru v oblasti do $\Omega > 2s^{-1}$ (průměr $\Delta F > 0,32Hz$).

Pokud je k síti připojen synchronní stroj pohánějící setrvačné hmoty, musí mechanický pohyb hřídele stroje sledovat frekvenční a fázové změny fázoru napětí sítě. Hřídel sleduje fázi okamžitého síťového napětí s úhlovou odchylkou a vytváří úhel zátěže β v synchronním stroji. Okamžitá energie spotřebovaná nebo dodávaná strojem do sítě závisí na velikosti a orientaci úhlu zatížení β . Čím větší jsou setrvačné hmoty na hřídeli, ve srovnání s velikostí synchronního stroje, tím větší budou dynamické odchylky frekvence a úhlu zatížení[39].

Jelikož elektromechanický systém (synchronní stroj a jeho setrvačné hmoty) má velmi nízké tlumení, mají zákmitý zátěžného úhlu, vyvolané nestabilitou distribuční sítě, harmonický kmitavý charakter. Kmity jsou projevem nežádoucího přetékání energie mezi sítí a setrvačnými hmotami na hřídeli.

5.1.2 Popis použitého modelu

Elektro-mechanický kmitavý systém se skládá z tuhosti synchronního magnetického pole stroje, účinků tlumení a momentu setrvačnosti, které jsou spojeny s hřídelí. Tento systém je znázorněn na obrázku 14. Doplněním tlumícího členu do (10) do-



Obrázek 14: Model elektro-mechanického systému synchronního stroje - vlastní práce autora [38]

staneme linearizovanou diferenciální rovnicí kmitů elektro-mechanické soustavy synchronního stroje:

$$I\ddot{\beta} + B\dot{\beta} + k\beta = \frac{I}{P_d}\dot{\omega} \quad (11)$$

kde proměnné znamenají:

- β zátěžný úhel synchronního stroje
- ω síťová frekvence
- I celkový moment setrvačnosti spojený s hřídelem
- B konstanta torzního tlumení
- k torzní tuhost synchronního stroje
- P_d počet pól párů synchronního stroje

Zohledňujeme následná použitá zjednodušení:

- Nezatížený synchronní stroj
- Linearita magnetického obvodu
- Vyloučení vlivu externích obvodů pro řízení napětí, napájení a frekvence
- Linearizované řešení pro malé $|\beta| < 0,1$ rad

Vlastnosti systému popisujícího rovnici (11) lze zapsat v Laplaceově transformaci [40] [41] jako:

$$G(p) = \frac{pI}{P_d(p^2I + pB + k)} \quad (12)$$

Výkonová spektrální hustota zakmitávání zátěžného úhlu je:

$$S_\beta(\Omega) = \lim_{p \rightarrow j\omega} G(p)^2 S_\omega(\Omega) \quad (13)$$

kde proměnné znamenají:

$S_\beta(\Omega)$ výkonová spektrální hustota zakmitávání zátěžného úhlu
 $S_\omega(\Omega)$ výkonová spektrální hustota zákmitů odchylek úhlové frekvence sítě

$$S_\beta(\Omega) = \frac{\Omega^2 I^2 S_\omega(\Omega)}{P_d [(k - \Omega^2 I)^2 + \Omega^2 B^2]} \quad (14)$$

Vlastní frekvence systému je Ω_0 :

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I}} \quad (15)$$

Koeficient poměrného tlumení systému

$$a = \frac{B}{2\sqrt{kI}} \quad (16)$$

je pro většinu synchronních strojů velmi nízký; obvykle je to méně než 0,1. V takovém případě je rezonance velmi selektivní. Systém přenáší pouze vlastní frekvenci. Odezva systému má téměř sinusový průběh s amplitudou β_A . Z rovnice (14) lze po dosazení pro $\Omega = \Omega_0$ napsat:

$$S_\beta(\Omega_0) = \beta_A^2 = \frac{I^2}{P_d^2 B^2} = S_\omega(\Omega_0) \quad (17)$$

5.1.3 Odvození maximální velikosti setrvačných hmot pro danou amplitudu elektro-mechanických kmitů buzených sítí

Pokud má mít odezva systému v zátěžném úhlu amplitudu maximálně β_A , nesmí být spektrální výkonová hustota $S_\omega(\Omega_0)$ zákmitů frekvence sítě větší než $S_{\omega max}(\Omega_0)$.

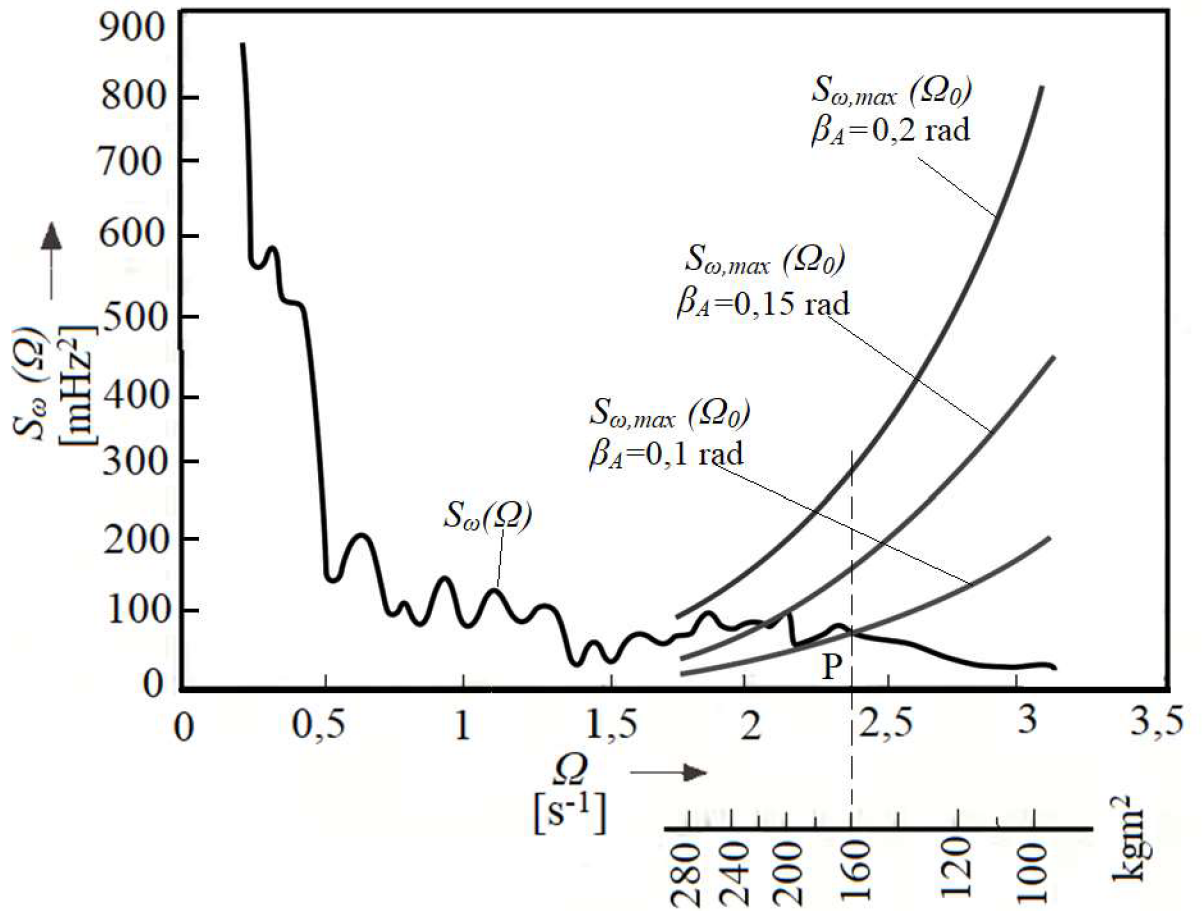
$$S_{\omega max}(\Omega_0) = \frac{P_d^2 B^2}{I^2} \beta_A^2 \quad (18)$$

kde $S_{\omega max}(\Omega_0)$ je horní hranice spektrální výkonové hustoty úhlové frekvence dané sítě.

Dosazením proměnné Ω_0 z rovnice (15) do rovnice (18) pro parametr I se získá:

$$S_{\omega_{max}}(\Omega_0) = \frac{P_d^2 B^2}{k^2} \beta_A^2 \Omega_0^4 \quad (19)$$

Maximální velikost setrvačníku, pro kterou amplituda zákmitů zátěžného úhlu nepřesahuje danou hodnotu β_A , je tedy určena.



Obrázek 15: Vliv fluktulací frekvence sítě a setrvačného momentu I na amplitudu zákmitů zátěžného úhlu - vlastní práce autora [38]

Na obrázku 15 jsou nakresleny vývoje $S_{\omega_{max}}(\Omega_0)$ podle rovnice (26) pro vybranou hodnotu β_A (např. 0,1, 0,15 a 0,2 rad). Tyto vývoje představují horní meze spektrální výkonové hustoty kolísání úhlové frekvence $S_{\omega_{max}}(\Omega_0)$ pro povolené β_A . Tyto vývoje horních mezí jsou vybaveny měřítkem I odpovídajícím rovnici (15):

$$I = \frac{k}{\Omega_0^2} \quad (20)$$

Maximální hodnota momentu setrvačnosti umístěného na hřídeli synchronního stroje je dána prvním průsečíkem (zprava) funkce $S_{\omega max}(\Omega_0)$ pro povolené maximum amplitudy záklmitů zátěžného úhlu β_A s průběhem $S_{\omega}(\Omega)$ měřeným v části sítě v uvažovaném čase.

5.1.4 Praktické ověření

Jako příklad pro ověření byl vybrán synchronní stroj MEZ-A 225 MO 4 s následujícími parametry :

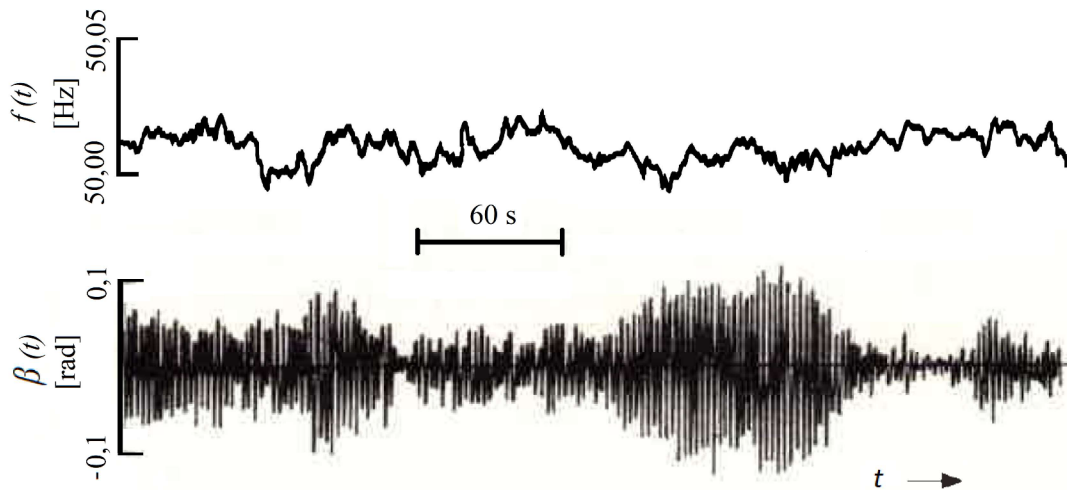
- $P_s = 50$ kVA
- $n = 1500$ min⁻¹
- $k = 1140$ N·m
- $B = 14$ N·m·s

MEZ-A 225 MO 4 je synchronní hydroalternátor se čtyřmi vyniklými póly, bez tlumiče, s bezkartáčovým buzením napájeným externím elektronickým zdrojem s konstantním proudem 1,2 A. To odpovídá buzení při jmenovitém sdruženém napětí 3×400 V v klidovém stavu. Budící proud byl udržován konstantní po celou dobu experimentu. Hřídel stroje byl spojen tuhou spojkou s ocelovým setrvačником o průměru 1300 mm uloženým ve vlastních ložiscích. Moment setrvačnosti $I = 160$ kg·m² byl určen výpočtem z geometrických rozměrů a katalogových údajů. Konstanta tlumení $B = 14$ N·m·s byla vypočtena z útlumu přechodového jevu během fázování do distribuční sítě.

Během experimentu synchronní stroj běžel jako motor v distribuční síti bez dalšího zatížení. Byl zatížen mechanickými ztrátami v ložiscích a spotřebou mechanické energie pro vlastní chlazení a také buzením. Celkové zatížení bylo odhadnuto na 3

kW, což je méně než 8 % jmenovitého výkonu synchronního stroje. Tento stav byl blízký stavu nezatíženému, který je teoreticky diskutován výše.

Pod povolenou amplitudou zákmitů zátěžného úhlu $\beta_A = 0,1$ rad (rovnající se přetečení činného výkonu $P_a = 20$ kW), průřezík P představoval maximální hodnotu $I = 160$ kg·m² (viz. obrázek 15).



Obrázek 16: Náhodné změny síťové frekvence (nahore) a změny zatěžovacího úhlu synchronního stroje (dole) - vlastní práce autora [38]

Obrázek 16 poskytuje důkaz shody s vypočtenou hodnotou průměrné amplitudy ($I = 160$ kg·m²) se záznamem nestabilit frekvence sítě a odpovídající odezvy zátěžného úhlu zatížení. Tento záznam byl měřen na stroji během experimentu.

Zhodnocení experimentu

Změny frekvence sítě způsobí, že zátěžný úhel, u synchronních strojů připojených k síti, zakmitává. Tvar spektra frekvenční odchylky sítě zvyšuje možný setrvačný moment na hřídeli synchronního stroje a zároveň zvyšuje možnou amplitudu zákmitů zátěžného úhlu. Toto je vidět jak z uvedených rovnic, tak z jejich grafické interpretace. Byla tedy určena maximální hodnota momentu setrvačnosti pro bezpečnou amplitudu zákmitů. Důkaz shody s vypočítanou hodnotou momentu setrvačnosti je uveden na obrázku 16 jako záznam frekvence sítě a odpovídající odezvy zátěžného

úhlu.

Průměrná hodnota úhlu zatížení je zjevně v požadovaném intervalu. Okamžitá hodnota úhlu zatížení je vesměs v požadovaném intervalu; průměrná hodnota je však důležitější. Zátěžný úhel v tomto bezpečném intervalu umožňuje bezpečný a spolehlivý chod stroje, který bude řízen externími řídicími jednotkami. Tyto regulátory nejsou v práci zohledněny. Toto omezení by mělo být respektováno jak u pohonů s desítkami a stovkami kW, tak u pohonů s malými synchronními stroji a krokovými motory, kde musí být poháněny velké setrvačné hmoty.

Dodatek k absenci regulátorů

Jak již bylo napsáno výše, tato práce neuvažovala s externími regulátory. Často jsou však hlavní součástí problémů se stabilitou kmitočtu sítě. Zákmity frekvence sítě způsobují zákmity zátěžného úhlu, což zase způsobí zákmity frekvence sítě. Tato interakce je uzavřený kruh.

Stojí za povšimnutí, že většina regulace výkonu v systémech připojených k rozvodné síti je řešena s použitím konvenčních PID regulátorů. Tyto mohou zbytečně dodávat nevhodné dynamické chování.

5.1.5 Metodika určení maximální přípustné setrvačné hmoty

Krok 1 - analýza sítě

V tomto kroku je potřeba analyzovat vlastnosti sítě v daném okrsku/ostrově sítě. Tato analýza vyžaduje určit maximální očekávatelné fluktulace - tedy $S_{\omega_{max}}(\Omega_0)$. Toto jede nejlépe provést měřením přímo na síti.

Teoreticky se lze také uchýlit k odhadu této hodnoty z nejkrizovějšího předpokládaného vývoje při poruchách na síti.

Krok 2 - analýza stroje

Nejprve určit maximální dovolenou amplitudu zakmitávání zátěžného úhlu β_A . Tuto určujeme především s ohledem na jmenovitý výkon stroje v poměru vůči výkonu celého okrsku distribuční sítě.

Poté určit konstantu tuhosti k stroje a konstantu tlumení stroje B . Tyto určíme z přechodových jevů při fázování stroje na síť.

Krok 3 - určení maximální setrvačné hmoty

Na základě parametrů z předchozích kroků, určení maximální setrvačné hmoty dle postupu popsaného v kapitole 5.3.

Krok 4 - Ověření

Je-li to možné, ke stroji připojit setrvačnou hmotu maximální velikosti, a provést měření pro ověření funkce. Při tomto měření se doporučuje uměle vyvolat zákmit v síti - například šetrným umělým narušením chodu jiného generátoru v okrsku sítě.

5.1.6 Shrnutí

V této subkapitole byla odvozena a popsána metoda na určení omezení maximální setrvačné hmoty, která může být připojena k synchronnímu stroji provozovaném na kmitající síti. Tato metoda byla také shrnuta do metodiky pro určení této maximální setrvačné hmoty.

Toto omezení by mělo být respektováno jak u pohonů s desítkami a stovkami kW, tak u pohonů s malými synchronními stroji a krokovými motory, kde musí pohánět velké setrvačné hmoty. Důvodem je to, aby přetoky energie, vznikající při kmitání sítě, ještě více nezhoršovaly nestabilitu sítě. Toto je obzvláště důležité v krizových okamžicích jako je provoz sítě blízko limitu maximálního zatížení, provoz pahýlu sítě po blackoutu či při připojování jednoho samostatnému okrsku k dalšímu.

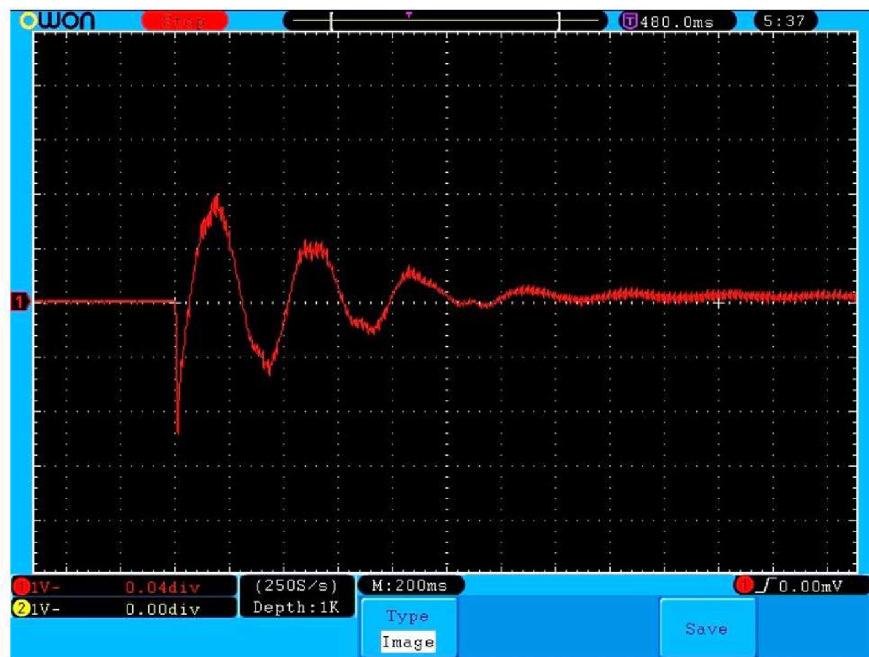
Další takovou situací může být provoz sítě, u níž se předpokládá nouzový rozpad na ostrovní okrsky. Mělo by být kontrolováno, aby v žádném okrsku nebyl moment setrvačnosti na žádném rotačním stroji větší, než připouští řešení v této práci.

Situace s extrémními setrvačnými hmotami jsou spíše vzácné, ale mohou to být například válcovací stolice a jiná extrémní soustrojí, jejichž situace musí být řešena individuálně.

5.2 Test chybného nafázování generátoru do sítě

V této subkapitole bude stručně popsán experiment s úmyslně chybným nafázováním generátoru do sítě a jeho srovnání s blackoutem v Karifolnii v roce 2006.

5.2.1 Průběh výkonu při chybném nafázování



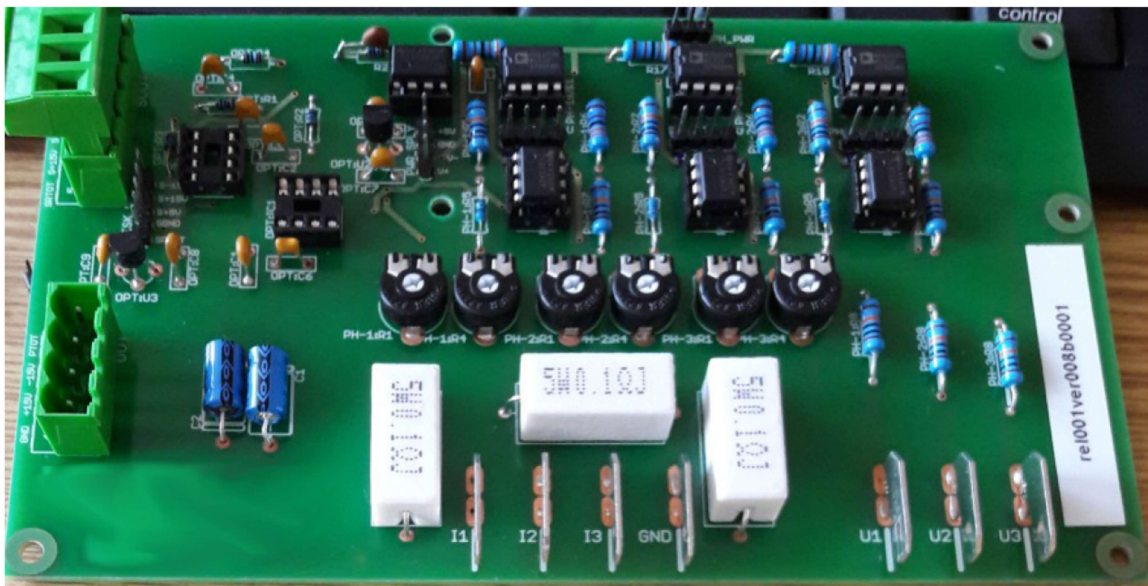
Obrázek 17: Průběh činného výkonu předávaného do okrsku sítě po úmyslně nepřesném nafázování dieselařegátu 1,45 MVA. Vertikálně: 100kW/dílek, horizontálně 200ms/dílek - vlastní práce autora

Byl proveden pokus o nafázování s úmyslně nepřesným úhlem nafázování.

Tento experiment byl proveden na diesel generátoru se synchronním strojem o zdánlivém výkonu 1,45 MVA na okrsku sítě v Praze.

Na obrázku 17 je zobrazen průběh okamžitého činného výkonu předávaného do rozvodné sítě při tomto experimentu.

Průběh byl získán analogovým elektronickým wattmetrem pracujícím na principu analogových násobiček realizující definiční vztah pro okamžitou hodnotu jako součin okamžitých výkonů $u(t) * i(t)$ v jednotlivých fázích. Tento wattmetr byl vyvinut na našem pracovišti. Jeho prototyp je na obrázku 18. Zdůrazněme, že nebyla použita žádná filtrace ani vzorkování. Výjimkou je použití rychlého vzorkování v osciloskopu.



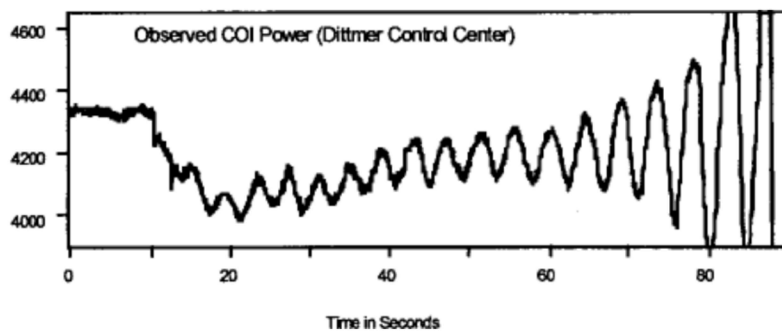
Obrázek 18: Osazená deska prototypu analogového wattmetru - práce pracoviště [11]

Naměřený průběh kmitů vybuzených elektromechanickým impulzem nepřesného nafázování odpovídá tlumenému harmonickému kmitání s dobou periody asi 0,39. To odpovídá vlastní frekvenci elektromechanické soustavy přibližně 2,64 Hz. Konstanta poměrného tlumení je odhadnuta na hodnotu zhruba 0,2. Neopomeňme, že k tlumení přispívá i připojený dieselmotor. Na průběhu je vidět zkreslení základní

sinusové vlny nelinearitami, zde pravděpodobně nelinearitou magnetizační křivky synchronního stroje.

5.2.2 Srovnání s blackoutem

Pro srovnání uvedme průběh naměřeného činného výkonu předcházející blackoutu. Tento je převzat z [42]. Průběh je zobrazen na obrázku 19.



Obrázek 19: Nárůst oscilací činného výkonu (je úměrný úhlu fázoru napětí) při blackoutu dne 8.8.2006 v Kalifornii, USA - převzato z [42]

Z převzatého průběhu je patrná vlastní frekvence kmitů asi 0,4 Hz. V literárním zdroji není přímo uvedeno, zda jde o vlastní elektromechanickou frekvenci soustavy, nebo zda jde o kmity vybuzené poruchou regulace. První možnost je však s ohledem na okolnosti pravděpodobnější. Záznam z okrsku v Kalifornii ukazuje, že po prudkém poklesu přenášeného výkonu na jednom z vedení došlo k netlumenému rozkmitání soustavy vedoucímu až k celkovému blackoutu.

5.2.3 Shrnutí

Z výše uvedeného je zjevné, že v rozvodné síti může docházet a dochází k oscilacím. Tyto oscilace mohou být mimo jiné elektro-mechanického charakteru, jak také dokazuje test popsany v této subkapitole.

Z tohoto důvodu je nezbytné doporučit, aby při návrhu zdrojů a velkých spotřebičů v daném okrsku sítě, byla věnována také pozornost vyšetření elektromechanické

frekvence a tlumení tohoto okrsku. A to alespoň s použitím zjednodušeného modelu popsaného v předchozích kapitolách této práce.

5.3 Testování účinnosti fotovoltaických panelů za extrémních teplot

Tato kapitola popisuje testování účinnosti fotovoltaického článku v širokém rozsahu teplot - od -170 °C do 100 °C . Měření v podobném rozsahu prozatím nebylo autorem zaznamenáno. Takovýto rozsah se v našich klimatických podmínkách může zdát přehnaný. V Evropě se teplota mění zhruba v rozsahu 50 °C . Nicméně obecně lze na zemi nalézt místa, jako například Sibiř, kde se teplo mění i v rozsahu 100 °C .

Je pravdou, že teploty pod úrovní -100 °C na Zemi běžně nenajdeme. Avšak v hlubokém vesmíru se mohou vyskytovat. V tomto testování bylo úmyslem postihnout celou myslitelnou škálu využití fotovoltaického článku, nikoliv jen omezené podmínky, které vznikají při použití na Zemi.

5.3.1 Popis experimentu

K měření byl použit fotovoltaický článek na bázi monokrystalického křemíku. Měření probíhalo ve vakuové komoře, z důvodu zabránění kondenzace vzdušné vlhkosti na ochlazovaném fotovoltaickém článku. K čerpání byla použita jednostupňová rotační olejová vývěva. Zdrojem záření byla halogenová žárovka s reflektorem. Tato osvětlovala komoru přes okénko z čirého akrylátového skla. Lampa byla napájena ze stabilizovaného zdroje. Spektrum tohoto záření je spojitě a je podobné spektru černého tělesa o teplotě přibližně 2900 K . Intenzita záření na fotovoltaický článek byla méně, než intenzita přímého slunečního záření. Toto bylo zvoleno, aby nedošlo k výraznému zahřátí fotovoltaického článku dopadajícím zářením.

Vybavení:

- Panel - Solartec SC2-04, velikost 2320 mm², tloušťka 0,27 mm
- Halogenová žárovka Osram 12 V
- Stabilizovaný zdroj Agilent E3632A
- Olejová vývěva
- Chlazení tekutým dusíkem
- Ohřev malým vaříčem s regulací

Parametry měření:

- Teplota chromatičnosti žárovky přibližně 2900 K
- Výkon žárovky 20 W
- Úhel reflektoru 36°
- Intenzita záření na článek 297 Wm⁻²

V případě měření nízkých teplot byl FV článek umístěn na hliníkový výměník tepla. Tepelně vodivá podložka (Arctic Thermal pad) zajišťovala tepelný kontakt a teplotní homogenitu. Chladicím médiem byl kapalný dusík. Stejná konfigurace byla použita pro měření nad pokojovou teplotou. Zdrojem tepla byl vaříč s malou deskou a autotransfornátorem s regulací výkonu. Tepelný kontakt opět zajišťovala tepelně vodivá podložka.

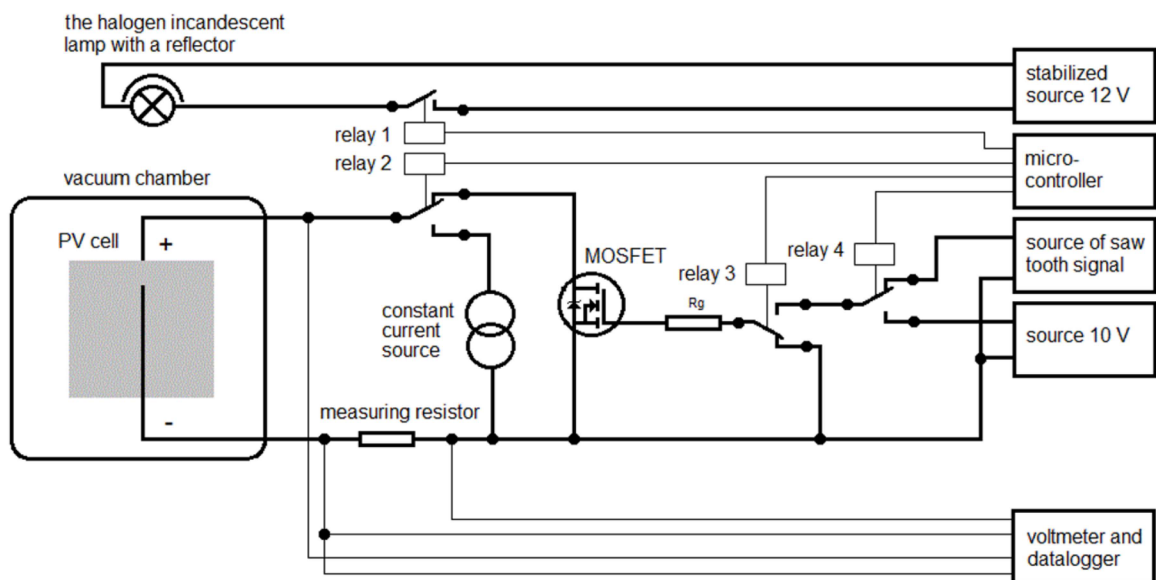
Měření teploty článku

Skutečná teplota fotovoltaického článku byla určena nepřímou metodou z teplotní závislosti $V - A$ charakteristiky neosvětleného fotovoltaického článku (velkoplošná fotodioda). Během měření se fotovoltaický článek poměrně rychle ochlazoval. V

systému: výměník kapalného dusíku - tepelně vodivá pasta - fotovoltaický článek byl velký teplotní gradient.

Měření teploty v jiném místě, než přesně ve fotovoltaickém článku, by bylo nepřesné a závislé na rychlosti ochlazování (teplotním gradientu). Proto byla určena teplotní závislost $V - A$ charakteristiky neosvětleného fotovoltaického článku na teplotě při velmi pomalém ochlazování, tedy s minimálním teplotním gradientem, pomocí termočlánku těsně na horním povrchu fotovoltaického článku. Tato závislost pak byla použita k určení skutečné teploty fotovoltaického článku při experimentu. Neosvětlený fotovoltaický článek tak měřil svou vlastní teplotu nezávisle na teplotním gradientu.

Dioda byla kalibrována jako teploměr s hodnotami napětí diody při konstantním proudu 0,2 A pro celý teplotní rozsah. Tato hodnota proudu byla zvolena z důvodu toho, že při plném osvětlení reflektorem se proud pohyboval kolem této hodnoty. Teplota pro kalibraci byla měřena na článku pomocí termočlánkové sondy typu K. Schéma přístroje pro měření $V - A$ charakteristiky je uvedeno na obrázku 20.



Obrázek 20: Schéma měření při testování účinnosti fotovoltaického článku - vlastní práce autora [21]

Měření probíhalo v těchto čtyřech fázích:

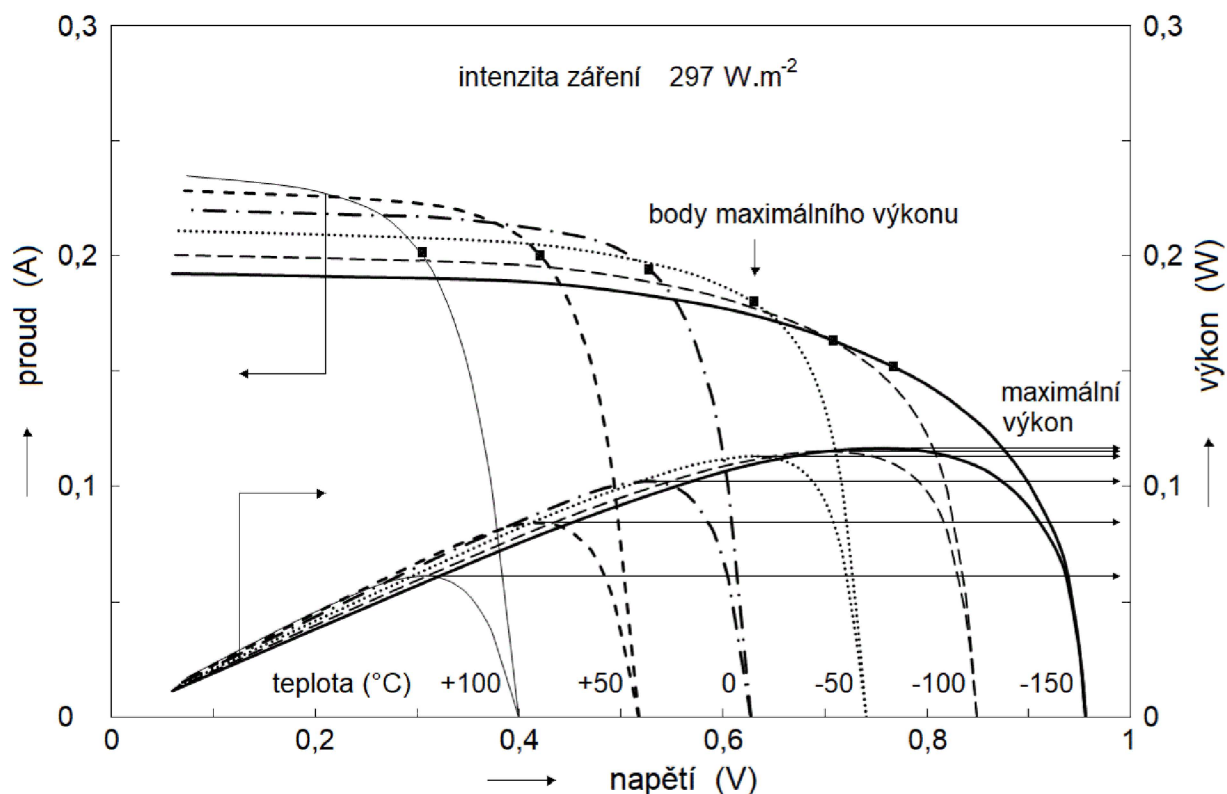
- Fotovoltaický článek není osvětlen, protéká jím konstantní proud 0,2 A (zdroj Agilent E3631A), napětí na fotovoltaickém článku je změřeno. Tato hodnota napětí je použita k určení teploty fotovoltaického článku v daném cyklu měření.
- Fotovoltaický článek je osvětlen, tranzistor je uzavřen, měří se napětí naprázdno U_{OC} v otevřeném obvodu.
- Fotovoltaický článek je osvětlen, tranzistor se otevře a uzavře pilovým signálem (zdroj signálu Agilent 33220A), změří se hodnoty napětí U a proud I_p na $V - A$ charakteristice.
- Fotovoltaický článek je osvětlen, tranzistor je zcela otevřen, měří se proud blízky zkratovému proudu I_{sc} . Protože se k měření proudu používá rezistor, není možné měřit až zkratový proud.

Tyto fáze se cyklicky opakovaly v měřeních při různých teplotách. Ke sběru dat byl použit datalogger - Agilent 34972A.

5.3.2 Výsledky

Na obrázku 21 jsou naměřené $V - A$ charakteristiky fotovoltaického článku ve velmi širokém rozsahu teplot - od -170 °C do $+100\text{ °C}$. Na obrázku 22 jsou uvedeny přepočtené $P - V$ charakteristiky.

Je vidět, že s rostoucí teplotou klesá napětí naprázdno a roste zkratový proud. S rostoucí teplotou se také snižuje maximální elektrický výkon dodávaný fotovoltaickým článkem při konstantní intenzitě záření. Tím se snižuje i účinnost přeměny energie. Zajímavý vztah mezi tímto chováním a fyzikální teorií polovodičů je popsán níže. Dále je diskutován také vliv tohoto chování na konstrukci fotovoltaických systémů.

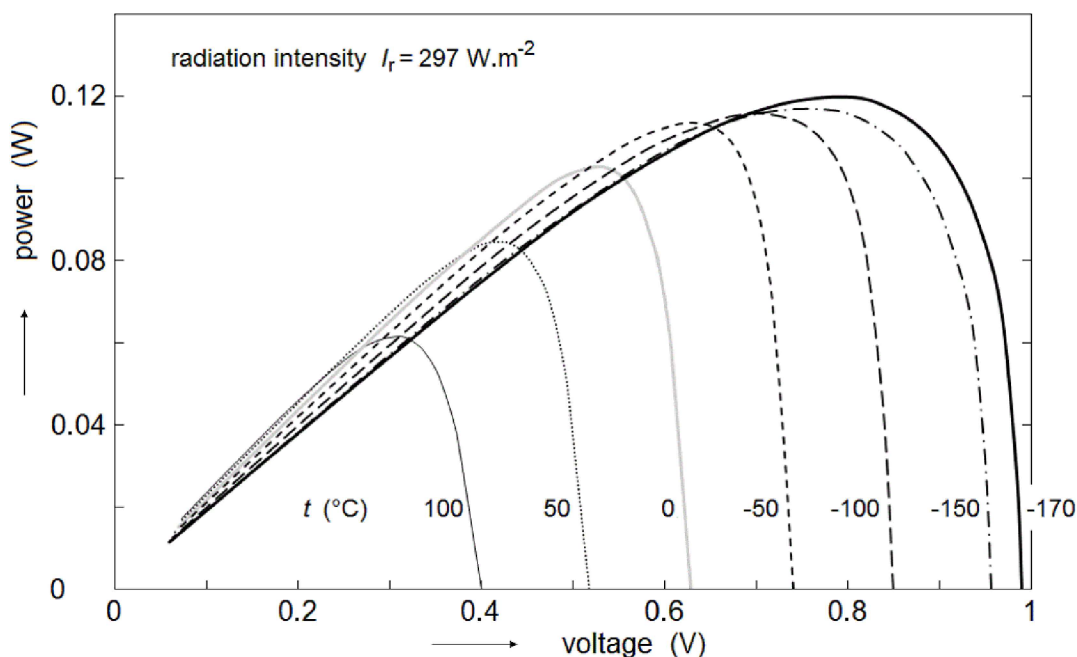


Obrázek 21: $V - A$ charakteristiky fotovoltaického článku při různých teplotách - vlastní práce autora [21]

5.3.3 Zhodnocení výsledků vzhledem ke známé teorii polovodičů

V dostupné literatuře nebylo nalezeno měření teplotních závislostí $V - A$ charakteristik fotovoltaických článků v takto širokém rozsahu teplot. Například v práci [43] byly podobné závislosti naměřeny v teplotním rozsahu $+25^\circ\text{C} \div +80^\circ\text{C}$. Na našem pracovišti byly v minulosti měřeny podobné závislosti pouze v teplotním rozsahu $-15^\circ\text{C} \div +35^\circ\text{C}$. Ani v dalších pracích jsme nenašli měření v teplotním intervalu pod -15°C .

Na obrázku 23 je znázorněno známé schéma energetických hladin PN přechodu podle fyzikální teorie polovodičů (např. [29]). V neosvětleném PN přechodu (obr. 23 a) je Fermiho energetická hladina vyrovnána v celém krystalu. To způsobuje ohyb pásů a vznik difúzního napětí V_D , které je kompenzováno elektrickým polem na

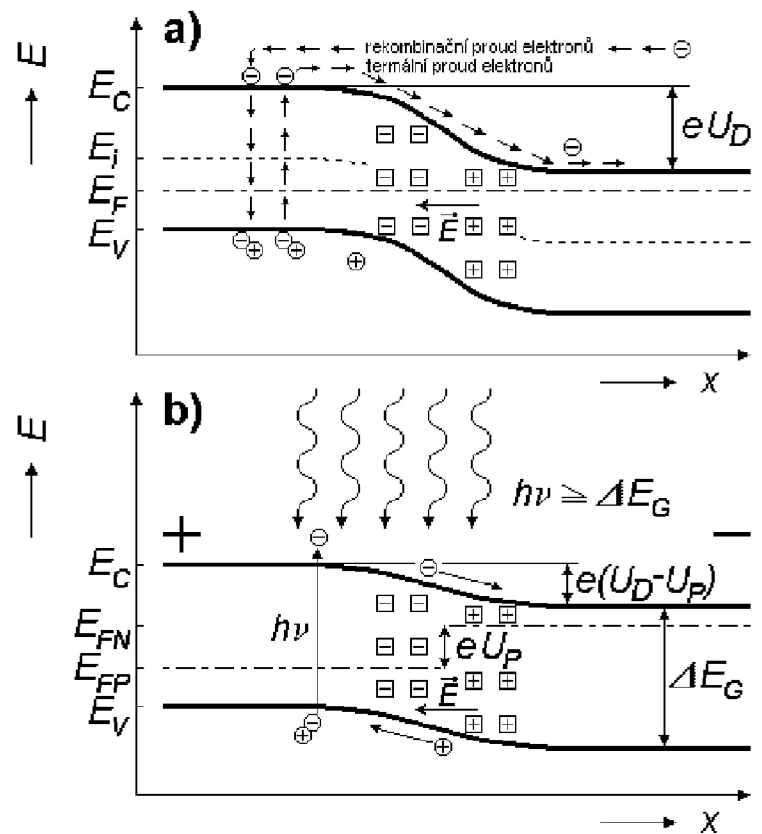


Obrázek 22: $P - V$ charakteristiky fotovoltaického článku při různých teplotách

přechodu PN. Navenek je krystal elektricky neutrální, ale uvnitř je silné elektrické pole. Pokud na PN přechod dopadají fotony s vyšší energií, než je zakázaná mezera, vznikají páry elektron-díra (obrázek 23 b). Elektrické pole PN přechodu odděluje elektrony a díry. Ohyb pásů se vyrovnává, a tím se oddělují hladiny Fermiho energie E_F na straně polovodiče P a N. Mezi stranou polovodiče P a N vzniká fotovoltaické napětí V_P , jak je znázorněno na obrázku 23 b).

V pásovém modelu energetických hladin polovodičů při velmi nízkých teplotách se Fermiho energetická hladina nachází v zakázaném pásu. Na straně N se nachází v blízkosti dolní části vodivostního pásu a na straně P v blízkosti horní části valenčního pásu. S rostoucí teplotou se Fermiho energetická hladina posouvá směrem ke středu zakázaného pásu. Současně se zmenšuje šířka zakázaného pásu. To je znázorněno na obrázku 24. Podle [44] je tato závislost dána rovnicí:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \gamma} \quad (21)$$

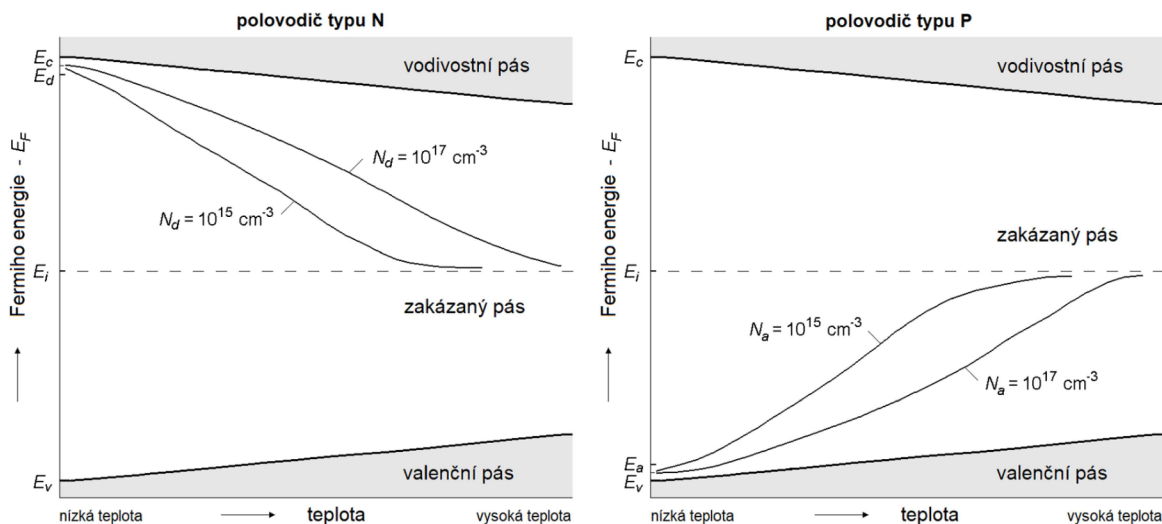


Obrázek 23: Schéma energetických hladin PN přechodu odpovídající známe teorii polovodičů - vlastní práce autora [21]

Kde pro článek z monokrystalického křemíku je:

- $E_g(0) = 1,16$ eV šířka pásové mezery při teplotě 0 K
- $\alpha = 7,0210^{-4}$ eV·K⁻¹
- $\gamma = 1108$ K

Zmenšení šířky pásové mezery znamená, že i fotony s nižší energií mohou způsobit fotovoltaickou přeměnu energie. Tím se snižuje fotovoltaické napětí v otevřeném obvodu a zvyšuje se zkratový proud. Chování $V - A$ charakteristik na obrázku 21 výše je tedy v souladu s touto teorií.

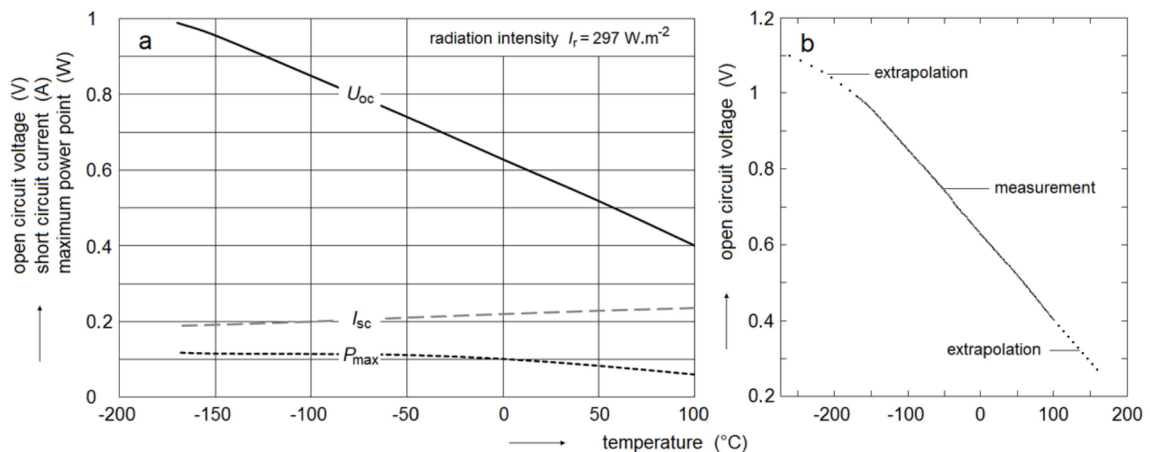


Obrázek 24: Změny šířky zakázaného pásu a Fermiho energetické hladiny v závislosti na teplotě podle fyzikální teorie polovodičů - vlastní práce autora [21]

Obrázek 25 ukazuje teplotní závislosti napětí naprázdno, zkratového proudu, maximálního bodu výkonu a extrapolaci mimo měřenou oblast. Je vidět, že tato závislost U_{OC} je téměř lineární v širokém rozsahu teplot. Extrapolací této závislosti na teplotu $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ by však vzniklo napětí naprázdno přibližně 1,28 V. Šířka zakázaného pásma pro křemík je přibližně 1,1 eV. Když je ohyb pásů plně vyrovnaný, nemůže být rozdíl Fermiho energetických hladin větší než 1,1 eV.

Fotovoltaické napětí v otevřeném obvodu tedy nemůže být větší než 1,1 V. Na obrázku 25 je vidět, že se křivka odchyluje od lineární závislosti kolem $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ a její derivace se mění tak, že při nižších teplotách nepřesahuje 1,1 eV. Porovnáním křivek na obrázcích 24 a 25 je vidět, že přibližně lineární části těchto křivek zhruba odpovídají a derivace křivky se mění na obou koncích. Extrapolace lineární části křivky na obrázku 25 na nulové fotovoltaické napětí, by dala hodnotu teploty přibližně $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Pravděpodobně i zde také dojde k odchylce od lineární závislosti a účinnost přeměny energie bude při teplotách nad $200 \text{ }^\circ\text{C}$ velmi malá. Tato skutečnost je důležitá pro fotovoltaické systémy s vyšší koncentrací záření.

S ohledem na to, že pro měření proudu je použit rezistor a vzhledem k od-



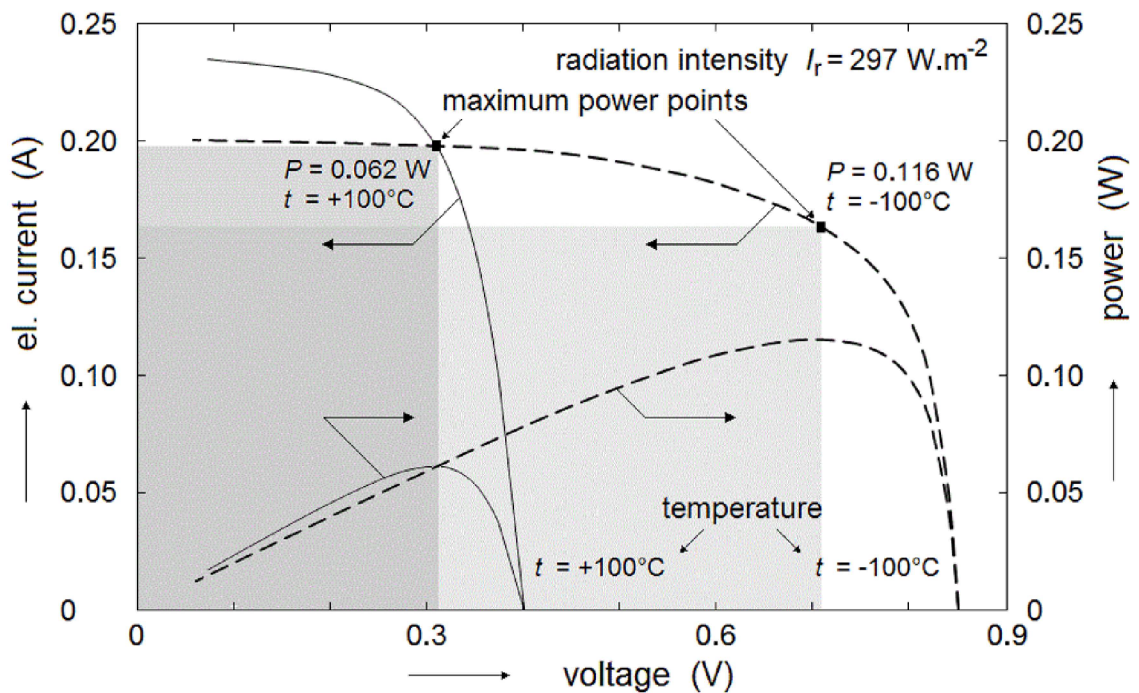
Obrázek 25: Závislost napětí naprázdno, zkratového proudu a maximálního bodu výkonu fotovoltaického článku na teplotě (a) a extrapolace (b) - vlastní práce autora [21]

poru kontaktů a vodičů není možné měřit až zkratový proud. Odpory jsou zapojeny sériově s fotovoltaickým článkem. Na obrázku 21 je však vidět, že charakteristiky byly měřeny téměř do zkratového proudu a že je zřejmá teplotní závislost zkratového proudu. Hodnoty I_{sc} na obrázku 25 jsou extrapolované.

5.3.4 Aplikovatelnost v reálných pozemských podmínkách

Obrázek 26 ukazuje srovnání maximálního výkonu fotovoltaického článku při teplotách $+100 \text{ °C}$ a -100 °C . Zhruba v tomto intervalu se mohou pohybovat teploty fotovoltaického systému systémů bez koncentrace záření na zemském povrchu. Fotovoltaické systémy používané ve vesmíru mohou mít ještě širší teplotní rozsah. Maximálního výkonu dosahuje fotovoltaický článek tehdy, když obdélník daný osami a pracovním bodem na $V - A$ charakteristice má největší plochu (viz obrázek 26). Je vidět, že při dané intenzitě záření při teplotě $+100 \text{ °C}$ je maximální výkon $0,062 \text{ W}$ a při teplotě -100 °C je maximální výkon $0,116 \text{ W}$. To je zhruba dvojnásobek. Rozdíl teplot 200 °C tedy odpovídá změně účinnosti přeměny energie přibližně o 100 %. To znamená, že v rozsahu teplot, které může mít fotovoltaický systém na povrchu

Země, je změna účinnosti přeměny energie přibližně 0,5 %/°C.



Obrázek 26: Maximální výkonové body na $V - A$ charakteristikách při teplotách -100 °C a $+100\text{ °C}$ - vlastní práce autora [21]

Tento vliv teploty na účinnost fotovoltaické přeměny energie znamená, že extrémní hodnoty slunečního záření nemusí nutně znamenat extrémní výnos fotovoltaické elektrárny. Což je jen potvrzením faktu předchozího výzkumů našeho pracoviště [33]. Zdálo by se logické, že pokud svítí Slunce, je výtěžnost fotovoltaické elektrárny vysoká a naopak. Tropické oblasti mají vysokou intenzitu slunečního záření (zejména Afrika, Austrálie a Střední Amerika). Výtěžnost fotovoltaických elektráren je dobrá, ale ne vynikající. Nejvyšší výnosy se obvykle vyskytují v mnohem severnějších a chladnějších oblastech Tibetu a Mongolska s vyšší nadmořskou výškou. Výbornou lokalitou jsou také náhorní plošiny v Chile v poušti Atacama. Také na pobřeží Antarktidy lze dosáhnout podobných ročních výnosů jako v subtropických oblastech. V takovýchto podmínkách je však vhodné použít fotovoltaické moduly pro extrémní klimatické podmínky [45], na jejichž vývoji se již v minulosti podílelo i

naše pracoviště a podílí se na něm do současnosti.

Nejllepšími oblastmi pro provoz fotovoltaických elektráren jsou tedy vnitrozemské oblasti s vyšší nadmořskou výškou, vysokou intenzitou slunečního záření a nízkou teplotou. V případě oblastí bez rozvodné sítě (Tibet, Mongolsko) navíc roste význam malých fotovoltaických systémů mimo síť.

5.3.5 Shrnutí

V této subkapitole bylo popsáno testování účinnosti fotovoltaického článku v extrémním teplotním rozsahu. Měření v takovémto rozsahu, se nám nepodařilo dohledat v dostupné literatuře.

Bylo popsáno měření $V - A$ charakteristik fotovoltaického článku na bázi monokrystalického křemíku ve velmi širokém rozsahu teplot od $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz obrázek 21). Na zemském povrchu se může teplota fotovoltaického systému bez koncentrace záření pohybovat přibližně v rozsahu $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě použití fotovoltaického systému v hlubokém vesmíru však mohou být teploty v celém rozsahu naměřených hodnot i nižší.

Zejména konstruktéři kosmických lodí musí být opatrní, protože vyšší napětí může zařízení poškodit. Chování teplotních závislostí $V - A$ charakteristik a $P - A$ charakteristik bylo z hlediska fyzikální teorie polovodičů také diskutováno.

Závislost napětí naprázdno je přibližně lineární v celém rozsahu teplot, kterých může fotovoltaický systém na povrchu Země dosáhnout (viz obrázek 25). Při teplotách kolem $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ však dochází k saturaci. Toto bylo rovněž vysvětleno v souladu s fyzikální teorií polovodičů. Pokles účinnosti přeměny energie s rostoucí teplotou má přibližně hodnotu $0,5\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ v celém rozsahu teplot od -100°C do $+100^{\circ}\text{C}$ (viz obrázky 22 a 26).

Pokud je fotovoltaický systém provozován v místech s extrémními klimatickými podmínkami, zejména s extrémními změnami teplot během roku, elektrické napětí fotovoltaických modulů se výrazně změní (až o přibližně $60\text{ } \%$, viz obrázek 25). V

případě kosmických aplikací mohou být tyto výkyvy ještě výraznější a zejména pro tyto aplikace má provedené testování velký význam.

Použití koncentrátorů záření může také výrazně zvýšit rozsah provozních teplot. Toto je třeba zohlednit při návrhu fotovoltaického systému a pečlivě vybrat jednotlivé komponenty. Zejména elektronické měniče bývají citlivé na přepětí nebo podpětí. Provozní teplotu fotovoltaických modulů lze snížit také návrhem fotovoltaického/fototermického systému chlazeného vodou.

6 Závěr

V rámci první části této práce byla shrnuta teorie potřebná pro problematiku solárních článků/panelů a pro stabilitu omezeného okrsku distribuční sítě. Ve druhé části práce jsou shrnuty výsledky matematických odvození, experimentů a testování na reálných prvcích používaných v síti.

V rámci prvního cíle byla nastudována problematika stability rozvodné sítě a to zejména v omezeném okrsku. Typově je tento okrsek definován v rámci kapitoly 4.4. Toto studium bylo zaměřeno především na analogii mechanických torsních vibrací a chování distribuční sítě. V rámci tohoto byl proveden jednoduchý test s úmyslně chybným nafázováním synchronního generátoru do sítě. Podobnými testy lze poměrně snadno určit základní kmitavé vlastnosti prvku v okrsku sítě, případně i celého okrsku sítě, pokud bude správně proveden monitoring chování. Lze to přirovnat k modální analýze mechanického systému, kdy jedním úderem kladívka a vhodným měřením lze analyzovat kmitavé vlastnosti systému.

Jako součást teoretického studia byl také definován poněkud jiný pohled na členění stability distribuční sítě.

Druhým cílem bylo věnovat se spolehlivosti a chování chodu mechatronických celků a případně jeho částí. V rámci této části práce vznikly dvě publikace.

První publikace [38] shrnuje to, jak byl zkoumán chod synchronního generátoru jakožto mechatronického celku připojeného k síti. Motivem bylo to, že chování synchronního generátoru s připojenou velkou setrvačnou hmotou bylo nestandardní, respektive jiné než očekávané. Matematicky bylo odvozeno, že setrvačná hmota na soustrojí je omezena nejen „zespodu“, s ohledem na plynulost chodu stroje, ale že existuje také horní limit. Tento limit je dán právě elektro-mechanickým kmitáním stroje a rozvodné sítě. Toto matematické odvození bylo ověřeno a potvrzeno na experimentálních datech.

V druhé publikaci [21] je shrnuto testování účinnosti fotovoltaického článku v extrémním

rozsahu teplot. Toto zkoumání navazuje na fakt, že fotovoltaické elektrárny jsou jedním ze zdrojů nestabilit a fluktulací v síti. Samotný fotovoltaický článek byl vybrán jakožto prvek mechatronického celku, kterým fotovoltaická elektrárna je. Bylo prokázáno, že účinnost článku se s teplotou výrazně mění. Toto je potřeba zohlednit při navrhování fotovoltaické elektrárny a především při navrhování případného zálohování a regulace.

Třetím cílem bylo sestavit metodiku pro testování a nastavení spolehlivého chodu energetického celku. Tato metodika je popsána v kapitole 5.1.5. Jsou zde metodicky shrnuty poznatky z [38]. Na toto by měl být brán zřetel především v případech návrhu systému s velkými setrvačnými a možná také v případech návrhů systémů s virtuálními setrvačnými hmotami, které jsou v posledních letech často diskutovány.

Z jednoduché analýzy výše zmíněných cílů, lze konstatovat, že fluktulace v rozvodné síti mají vliv na elektro-mechanické kmitání synchronních strojů, které může tyto fluktulace zesílit. Také lze ze závěrů měření a testování na síti dovodit, že toto elektro-mechanické kmitání úzce souvisí s velikostí setrvačné hmoty připojené k synchronnímu stroji. Omezení tohoto kmitání lze dosáhnout omezením setrvačných hmot připojených ke hřídeli synchronního stroje. Tento fakt tak potvrzuje základní hypotézu definovanou v kapitole 2 této práce.

7 Použitá literatura

1. ADERIBOLE, Adedayo; ZEINELDIN, Hatem H.; EL-MOURSI, Mohamed Shawky; PENG, Jimmy Chih-Hsien; AL HOSANI, Mohamed. Domain of Stability Characterization for Hybrid Microgrids Considering Different Power Sharing Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018, roč. 33, č. 1, s. 312–323. Dostupné z DOI: 10.1109/TEC.2017.2743105.
2. KRISMANTO, Awan Uji; MITHULANANTHAN, N.; SETIADI, Herlambang; SETYAWAN, Eko Yohanes; ABDILLAH, Muhammad. Impacts of grid-tied microgrid on stability and interaction of power systems considering RE uncertainties. *SUSTAINABLE ENERGY GRIDS & NETWORKS*. 2021, roč. 28. ISSN 2352-4677. Dostupné z DOI: 10.1016/j.segan.2021.100537.
3. GRIGSBY, L. L. *Power System Stability and Control*. Power System Stability and Control. 3. vyd. CRC Press, 2013. ISBN 9781315216768. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.4324/b12113>.
4. ROBAK, Sylwester; GRYSZPANOWICZ, Konrad. Rotor angle small signal stability assessment in transmission network expansion planning. *Electric Power Systems Research*. 2015, roč. 128, s. 144–150. ISSN 0378-7796. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.07.003>.
5. RAHMAN, S.; SAHA, S.; ISLAM, S. N.; ARIF, M. T.; MOSADEGHY, M.; HAQUE, M. E.; OO, A. M. T. Analysis of Power Grid Voltage Stability With High Penetration of Solar PV Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2021, roč. 57, č. 3, s. 2245–2257. ISSN 0093-9994. Dostupné z DOI: 10.1109/TIA.2021.3066326.
6. YAN, R.; SAHA, T. K. Investigation of voltage stability for residential customers due to high photovoltaic penetrations. *IEEE Trans. Power Syst.* 2012, roč. 27, č. 2, s. 651–662.
7. FAN, Miao; SUN, Kai; LANE, Derek; GU, Wei; LI, Zhengshuo; ZHANG, Fang. A Novel Generation Rescheduling Algorithm to Improve Power System Reliability With High Renewable Energy Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018, roč. 33, č. 3, s. 3349–3357. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2810642.

8. YUN, Zhihao; CUI, Xinhui. Online Preventive Control Method for Static Voltage Stability of Large Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020, roč. 35, č. 6, s. 4689–4698. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3001018.
9. KAYS, Jan; SEACK, Andre; SMIREK, Theo; WESTKAMP, Fabian; REHTANZ, Christian. The Generation of Distribution Grid Models on the Basis of Public Available Data. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. 2017, roč. 32, č. 3, s. 2346–2353. ISSN 0885-8950. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2609850.
10. SARSTEDT, Marcel; GARSKE, Steffen; BLAUFUSS, Christoph; HOFMANN, Lutz. Modelling of Integrated Transmission and Distribution Grids based on Synthetic Distribution Grid Models. In: *2019 IEEE MILAN POWERTECH*. IEEE, 2019. ISBN 978-1-5386-4722-6. IEEE Milan PowerTech Conference, Milan, ITALY, JUN 23-27, 2019.
11. DANEČEK, Milan. Elektromechanické oscilace způsobené připojením obnovitelných zdrojů energie v okresech elektrické distribuční sítě. Praha, 2020. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
12. HUNGERFORD, Zoe; BRUCE, Anna; MACGILL, Iain. The value of flexible load in power systems with high renewable energy penetration. *Energy*. 2019, roč. 188, s. 115960. ISSN 0360-5442. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115960>.
13. TRENTINI, Rodrigo; KUTZNER, Ruediger; HOFMANN, Lutz. Power grid modeling based on the Electromechanical Energy Approach aiming power systems stability studies. In: *2016 24TH MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION (MED)*. Mediterranean Control Assoc; IEEE Robot & Automat Soc; CSS; IEEE; ICUAS; IEEE Control Syst Soc, 2016, s. 943–948. Mediterranean Conference on Control and Automation. ISBN 978-1-4673-8345-5. ISSN 2325-369X. 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Athens, GREECE, JUN 21-24, 2016.
14. FERNANDEZ-GUILLAMON, Ana; GOMEZ-LAZARO, Emilio; MULJADI, Eduard; MOLINA-GARCIA, Angel. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*. 2019, roč. 115. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2019.109369.

15. TIELENS, Pieter; VAN HERTEM, Dirk. The relevance of inertia in power systems. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*. 2016, roč. 55, s. 999–1009. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.016.
16. BEVRANI, Hassan; ISE, Toshifumi; MIURA, Yushi. Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*. 2014, roč. 54, s. 244–254. ISSN 0142-0615. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.07.009.
17. STRBAC, Goran; SHAKOOR, Anser; BLACK, Mary; PUDJIANTO, Danny; BOPP, Thomas. Impact of wind generation on the operation and development of the UK electricity systems. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*. 2007, roč. 77, č. 9, s. 1214–1227. ISSN 0378-7796. Dostupné z DOI: 10.1016/j.epsr.2006.08.014.
18. ŠAFRÁNKOVÁ, Jana. Studium akumulace energie z fotovoltaických panelů. Praha, 2020. Teze disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
19. HUNGERFORD, Zoe; BRUCE, Anna; MACGILL, Iain. The value of flexible load in power systems with high renewable energy penetration. *Energy*. 2019, roč. 188, s. 115960. ISSN 0360-5442. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115960>.
20. ALHEJJI, Ayman; MOSAAD, Mohamed I. Performance enhancement of grid-connected PV systems using adaptive reference PI controller. *AIN SHAMS ENGINEERING JOURNAL*. 2021, roč. 12, č. 1, s. 541–554. ISSN 2090-4479. Dostupné z DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.006.
21. LIBRA, Martin; PETRÍK, Tomáš; POULEK, Vladislav; TYUKHOV, Igor I.; KOUŘÍM, Pavel. Changes in the Efficiency of Photovoltaic Energy Conversion in Temperature Range With Extreme Limits. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2021, roč. 11, č. 6, s. 1479–1484. Dostupné z DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3108484.
22. POULEK, Vladislav; SAFRANKOVA, Jana; CERNA, Ladislava; LIBRA, Martin; BERANEK, Vaclav; FINSTERLE, Tomas; HRZINA, Pavel. PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration, and High String Voltage in Moderate Climate. *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*. 2021, roč. 11, č. 2, s. 561–565. ISSN 2156-3381. Dostupné z DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3050984.

23. LIBRA, Martin; DANEČEK, Milan; LEŠETICKÝ, Jan; POULEK, Vladislav; SEDLÁČEK, Jan; BERÁNEK, Václav. Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone. *Energies*. 2019, roč. 12, č. 5. ISSN 1996-1073. Dostupné z DOI: 10.3390/en12050795.
24. KOŽEŠNÍK, J. *Dynamika strojů*. Praha: SNTL, 1958.
25. KURTZ, Sarah; REPINS, Ingrid; METZGER, Wyatt K.; VERLINDEN, Pierre J.; HUANG, Susan; BOWDEN, Stuart; TAPPAN, Ian; EMERY, Keith; KAZMER-SKI, Lawrence L.; LEVI, Dean. Historical Analysis of Champion Photovoltaic Module Efficiencies. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018, roč. 8, č. 2, s. 363–372. Dostupné z DOI: 10.1109/JPHOTOV.2018.2794387.
26. GREEN, Martin A. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2003, roč. 11, č. 5, s. 333–340. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.496>.
27. ZAIMI, M.; EL ACHOUBY, H.; ZEGOUDI, O.; IBRAL, A.; ASSAID, E.M. Numerical method and new analytical models for determining temporal changes of model-parameters to predict maximum power and efficiency of PV module operating outdoor under arbitrary conditions. *Energy Conversion and Management*. 2020, roč. 220, s. 113071. ISSN 0196-8904. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113071>.
28. KITTEL, Charles. *Introduction to solid state physics*. 8. vyd. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2004.
29. POULEK, Vladimír; LIBRA, Martin. *Photovoltaics*. Praha: ILSA, 2010. ISBN 978-80-904311-2-6.
30. SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B.P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, roč. 79, s. 192–203. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>.
31. LI, Jie; LI, Runran; JIA, Yuanjie; ZHANG, Zhixin. Prediction of I–V Characteristic Curve for Photovoltaic Modules Based on Convolutional Neural Network. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 7. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20072119.

32. MATUSKA, Tomas; SOUREK, Borivoj; JIRKA, Vladimir; POKORNY, Nikola. Glazed PVT Collector with Polysiloxane Encapsulation of PV Cells: Performance and Economic Analysis. *International Journal of Photoenergy*. 2015, roč. 2015, s. 1–7. Dostupné z DOI: 10.1155/2015/718316.
33. POULEK, V.; MATUŠKA, T.; LIBRA, M.; KACHALOUSKI, E.; SEDLÁČEK, J. Influence of increased temperature on energy production of roof integrated PV panels. *Energy and Buildings*. 2018, roč. 166, s. 418–425. ISSN 0378-7788. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.063>.
34. TADEO AMIN, William; DANILO MONTOYA, Oscar; MANUEL GARRIDO, Victor; GIL-GONZALEZ, Walter; GARCES, Alejandro. Voltage and Frequency Regulation on Isolated AC Three-phase Microgrids via s-DERs. In: *2019 IEEE GREEN TECHNOLOGIES CONFERENCE (GREENTECH)*. 2019. IEEE Green Technologies Conference. ISBN 978-1-7281-1457-6. ISSN 2166-546X. IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Lafayette, LA, APR 03-06, 2019.
35. FERRO, Giulio; ROBBA, Michela; SACILE, Roberto. A Model Predictive Control Strategy for Distribution Grids: Voltage and Frequency Regulation for Islanded Mode Operation. *ENERGIES*. 2020, roč. 13, č. 10. Dostupné z DOI: 10.3390/en13102637.
36. DELFINO, Federico; FERRO, Giulio; ROBBA, Michela; ROSSI, Mansueto. An architecture for the optimal control of tertiary and secondary levels in small-size islanded microgrids. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*. 2018, roč. 103, s. 75–88. ISSN 0142-0615. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.05.026.
37. DELFINO, F.; ROSSI, M.; FERRO, G.; MINCIARDI, R.; ROBBA, M. MPC-based tertiary and secondary optimal control in islanded microgrids. In: *2015 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SYSTEMS ENGINEERING (ISSE) PROCEEDINGS*. IEEE; IEEE SYSTEM COUNCIL, 2015, s. 23–28. ISBN 978-1-4799-1919-2. IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE) Proceedings, ROME, ITALY, SEP 28-30, 2015.
38. PETRÍK, Tomáš; DANEČEK, Milan; UHLÍŘ, Ivan; POULEK, Vladislav; LIBRA, Martin. Distribution Grid Stability—Influence of Inertia Moment of Synchronous Machines. *Applied Sciences*. 2020, roč. 10, č. 24. ISSN 2076-3417. Dostupné z DOI: 10.3390/app10249075.

39. SERRA, Federico M.; FERNANDEZ, Lucas M.; MONTOYA, Oscar D.; GIL-GONZALEZ, Walter; HERNANDEZ, Jesus C. Nonlinear Voltage Control for Three-Phase DC-AC Converters in Hybrid Systems: An Application of the PI-PBC Method. *ELECTRONICS*. 2020, roč. 9, č. 5. Dostupné z DOI: [10.3390/electronics9050847](https://doi.org/10.3390/electronics9050847).
40. HAN, Jiangbei; LIU, Zhijian; LIANG, Ning; SONG, Qi; LI, Pengcheng. An Autonomous Power-Frequency Control Strategy Based on Load Virtual Synchronous Generator. *PROCESSES*. 2020, roč. 8, č. 4. Dostupné z DOI: [10.3390/pr8040433](https://doi.org/10.3390/pr8040433).
41. HAQUE, Md. Enamul; NEGNEVITSKY, Michael; MUTTAQI, Kashem M. A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2010, roč. 46, č. 1, s. 331–339. ISSN 0093-9994. Dostupné z DOI: [10.1109/TIA.2009.2036550](https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036550). 43rd Annual Meeting of the IEEE-Industry-Applications-Society, Edmonton, CANADA, OCT 05-09, 2008.
42. BALLANCE, J.W.; BHARGAVA, B.; RODRIGUEZ, G.D. Monitoring power system dynamics using phasor measurement technology for power system dynamic security assessment. In: *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003*, sv. 3, 7 pp. Vol.3-. Dostupné z DOI: [10.1109/PTC.2003.1304466](https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304466).
43. KHAN, Firoz; BAEK, Seong-Ho; KIM, Jae Hyun. Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions. *Applied Energy*. 2016, roč. 183, s. 715–724. ISSN 0306-2619. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.020>.
44. VARSHNI, Y.P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*. 1967, roč. 34, č. 1, s. 149–154. ISSN 0031-8914. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(67\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0031-8914(67)90062-6).
45. POULEK, V.; STREBKOV, D.S.; PERSIC, I.S.; LIBRA, M. Towards 50years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. *Solar Energy*. 2012, roč. 86, č. 10, s. 3103–3108. ISSN 0038-092X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.013>.