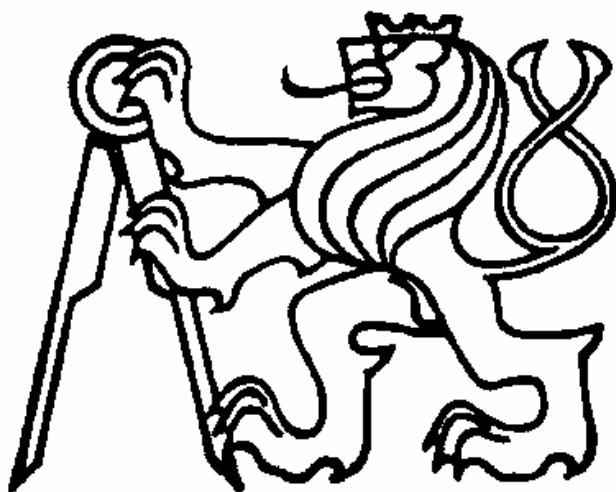


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Petr Wolf

**Modelování fotovoltaických článků a panelů v podmínkách
nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektrotechnologie a materiály

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2013

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Petr Wolf
 Katedra elektrotechnologie
 Fakulta elektrotechnická ČVUT
 Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.
 Katedra elektrotechnologie
 Fakulta elektrotechnická ČVUT
 Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektrotechnologie a materiály v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektrotechnologie a materiály
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1. Úvod	3
2. Současný stav problematiky	6
3. Cíle disertační práce.....	7
4. Metody zpracování	8
5. Hlavní přínosy a výsledky	9
6. Závěr.....	13
Seznam v tezi použité literatury.....	14
Seznam publikací vztahujících se k disertační práci.....	16
Summary.....	18
Resumé	19

1. Úvod

U fotovoltaických (FV) systémů sloužících jako zdroje elektrické energie se v převážné většině případů setkáváme s požadavkem sériového a paralelního spojení jednotlivých FV článků. Sériové propojení umožní zvýšit napětí až na hodnotu v řádu 10^2 V, což je vhodné pro následnou účinnou konverzi či přímé využití ve spotřebiči. Z důvodu zvýšení proudu bývají převážně u výkonnějších FV systémů sériově spojené FV články v panelu či sériově spojené panely dále paralelně propojovány. Paralelním propojením navíc snížíme počet potřebných vodičů elektrického rozvodu, což bývá výhodné z hlediska pořizovacích nákladů a vlastní montáže systému.

Jednotlivé FV články či panely tvořící FV generátor mohou však vlivem odlišných pracovních podmínek či odlišné výroby vykazovat rozdílnou V-A charakteristiku. Při jejich vzájemném elektrickém propojení dostáváme na výstupu generátoru novou (výslednou) V-A charakteristiku, přičemž již nelze zaručit optimální provoz všech jednotlivých článků v generátoru. Tímto dochází ke ztrátě výkonu z důvodu odchýlení od bodu maximálního výkonu (MPP) jednotlivých článků.

Navíc může nastat situace, kdy se některé FV články začnou chovat jako spotřebiče. Může dojít ke dvěma základním případům:

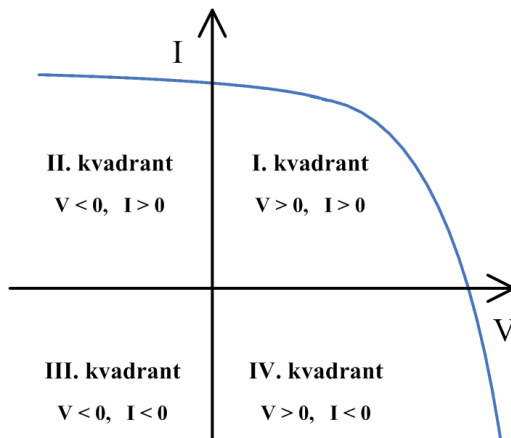
1. V případě sériového propojení mohou články či panely s nižším proudem v bodě MPP pracovat v II. kvadrantu (Obr. 1), stanou se spotřebiči energie a dojde k výraznému poklesu výstupního výkonu generátoru. Tyto články budou výrazně více zahřívané ztrátovým výkonem (teplem), hrozí u nich lokální průraz a vznik defektů (tzv. hot-spotu). Tomuto problému lze předejít využitím tzv. překlenovacích (bypass) diod, což se v praxi běžně používá.

Jelikož je proud v bodě MPP u článků přímo úměrný dopadajícímu záření, je tato situace zvláště kritická v případě nerovnoměrné intenzity záření v rámci FV generátoru, obzvláště při lokálním stínění některých článků v FV generátoru. V případě koncentrátorových FV systémů bývá výrazně nerovnoměrná intenzita záření způsobena optickými vlastnostmi koncentrátoru (např. soustavou zrcadel či Fresnelových čoček).

2. V případě paralelního propojení článků či jejich řetězců (sériově propojených článků), může dojít ke vzniku tzv. vyrovnávacích proudů, kdy některé články pracují v IV. kvadrantu (Obr. 1). Tato situace nastane, pokud je na článek připojeno napětí vyšší nežli jeho napětí naprázdno V_{OC} , přičemž napětí v bodě MPP se obvykle pohybuje okolo 80 % V_{OC} .

Napětí V_{OC} je lineárně závislé na teplotě, v případě krystalických křemíkových článků klesá s hodnotou cca 0,4 %/K. Při provozu generátoru v bodě MPP dochází k vyrovnávacím proudům až při výrazně vyšší teplotě některého ze článků či řetězců oproti zbylé části FV generátoru. V případě provozu generátoru bez zátěže dochází ke vzniku vyrovnávacích proudů již při mírném teplotním rozdílu mezi články či řetězci.

Problémům lze předejít sériovým vřazením tzv. závěrné diody do řetězce, u kterého se očekává nižší napětí naprázdno nežli je provozní napětí zbytku systému. S ohledem na ztráty výkonu na diodách a jejich vysokou poruchovost v reálných FV systémech je využití závěrných diod v současné době spíše výjimečné. Výzkumy Fraunhoferova institutu ISE navíc ukázaly, že FV panely odolají bez poškození obvykle toku vyrovnávacího proudu rovnému až 7 násobku proudu nakrátko I_{SC} při standardních testovacích podmínkách (Planning and Installing Photovoltaic Systems 2008). Použití závěrných diod je vhodné pouze ve výjimečných případech, např. při paralelním propojení řetězců majících výrazně odlišné parametry z důvodu výrobní technologie, nebo odlišného směrování. Typickou situací s odlišným směrováním FV panelů je umístění části FV generátoru se sklonem na východ a na západ. Pokud je to možné, je vhodné tyto situace řešit jiným způsobem, např. elektrickým rozdělením FV generátoru na více částí a využitím více nezávisle pracujících spotřebičů (příp. sledovačů bodu MPP).



Obr. 1: Pracovní oblasti FV článku (panelu)

S ohledem na nerovnoměrné pracovní podmínky bývají nejkritičtější následující systémy:

1. Fasádní a tzv. stavebně integrované FV systémy (Building integrated PV, BIPV)

U těchto FV systémů je typické nerovnoměrné chlazení FV článků a panelů z důvodu rozdílného proudění vzduchu nebo chlazení již přehřátým vzduchem. Na chlazení článků a panelů se podílí kondukce, konvekce i radiace.

2. Systémy kde dochází ke stínění

Stínění může být způsobeno externími objekty (např. okolními budovami, krajinným rázem) nebo částmi vlastního FV systému (např. nevhodně provedeným rámem panelů, sběrnými kontakty FV článků, sousední řadou FV panelů).

3. FV systémy s koncentrátorem záření

Intenzita záření dopadající na FV článek je zvýšena pomocí zrcadel či čoček. V takovýchto systémech může docházet k výrazně nerovnoměrnému rozložení teploty na FV článku vlivem nerovnoměrného chlazení, často dochází současně k nerovnoměrnému rozložení intenzity záření. Tyto systémy využívají pasivního i aktivního chlazení.

2. *Současný stav problematiky*

Problematikou nerovnoměrně pracujících FV článků se zabývají jednak publikace určené pro návrháře a projektanty FV systémů (Planning and Installing Photovoltaic Systems 2008), kde jsou uváděna doporučení, jak vhodným návrhem předejít vzniku nerovnoměrných pracovních podmínek a omezit jejich nepříznivé důsledky. Doporučení vycházejí z obecných znalostí a zkušeností s provozem těchto systémů, týkají se v převážné většině FV systémů bez koncentrace záření. Dále existuje řada vědeckých článků a studií řešících problematiku nerovnoměrných pracovních podmínek pomocí simulací či uvádějících výsledky experimentů (Luque et al. 1998, Coventry et al. 2002, Franklin a Coventry 2002, Benda et al. 2007, Macháček et al. 2008, Mellor et al. 2009, Domenech-Garret 2011, Wang a Hsu 2011, Baig et al. 2012). Řada těchto publikací se týká koncentrátorových FV systémů, kde dochází k výrazným rozdílům teploty a intenzity záření.

Prováděné simulace úzce souvisí se znalostí fyziky FV článků, metodami nalezení jejich vhodného náhradního modelu a určením parametrů modelu. Tato problematika je stále aktuální a je prezentována na konferencích a ve vědeckých publikacích. Současně jsou vyvíjeny softwarové nástroje určené pro simulaci chování FV systémů a k optimalizaci jejich návrhu. Některé z nich jsou vhodné i pro provádění simulací kompletních FV systémů pracujících v nerovnoměrných podmínkách zahrnujících FV generátor, elektrické rozvody, pomocné prvky a zátěž. Jiné nástroje je možné využít pro stanovení podmínek provozu (např. určení výchozího teplotního pole metodou konečných prvků).

Z uvedeného je patrné, že problematika nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření v rámci FV systémů je multidisciplinární a úzce souvisí v fyzikou polovodičů, fyzikou přestupu tepla, elektronikou, matematickou analýzou, modelovacími a programovacími technikami a konstrukčními postupy při výrobě komponent FV systému.

3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je zhodnotit vliv nerovnoměrně rozložené teploty a intenzity záření v rámci fotovoltaických (FV) systémů. Nerovnoměrné pracovní podmínky jednotlivých vzájemně elektricky propojených částí mají za následek ztrátu výkonu FV generátoru, v některých případech můžou mít vliv na urychlení procesů stárnutí či může dokonce dojít k nevratnému poškození článků a panelů.

Nerovnoměrné pracovní podmínky FV článků a panelů a související nežádoucí jevy (provoz v II. kvadrantu, vznik vyrovnávacích proudů) jsou jevy uváděné a známé, nicméně ne dostatečně studované v souvislostech na výsledný vliv na výkon FV generátoru. Nebyla např. nalezena vhodná literatura, kde by tyto jevy byly dostatečně kvantifikovány a porovnány s jinými daleko více diskutovanými jevy (např. ztrátou výkonu vlivem nárůstu teploty, ztrátou výkonu v kabeláži a dalších prvcích systému). Cílem předložené disertační práce je proto doplnění znalostí o vlivu nerovnoměrných podmínek na výkon FV generátoru. Jelikož pokles výkonu vlivem nerovnoměrných pracovních podmínek nemusí být výrazný, je studium této problematiky dosti náročné s ohledem na přesnost měření či provádění simulací.

Situace nerovnoměrných pracovních podmínek je třeba rozdělit na případy, kdy k nerovnoměrnosti dochází v rámci jednotlivých FV článků, v rámci FV panelů či v rámci soustavy FV panelů (FV generátoru). Dále je třeba odlišit, zda se jedná o nerovnoměrně rozloženou teplotu, intenzitu záření, či kombinací obou těchto jevů. Každý z těchto případů je typický pro určitou kategorii FV systémů, např. k vysoké nerovnoměrnosti intenzity záření a teploty v rámci článků dochází v rámci koncentrátorových FV systémů. Velké teplotní rozdíly v rámci jednotlivých FV panelů lze pozorovat např. u některých systémů s integrací do budov, obzvláště u fasádních systémů, vysoká nerovnoměrnost záření nastane v případě lokálního stínění okolními objekty nebo vlastním FV systémem (např. sousedí řadou FV panelů, komínem, jímačem blesků atd.). Rozdílná dopadající intenzita záření může pochopitelně způsobit nerovnoměrně rozloženou teplotu, paradoxně v zastíněné oblasti obvykle dochází k růstu teploty vlivem provozu článků v II. kvadrantu a hrozí vznik tzv. hot-spotu (Kap. 2.1.4, Kap. 5.2.2).

4. Metody zpracování

Výsledky presentované v disertační práci vznikly jednak využitím simulací modelů FV článků a jejich sério-paralelního propojení (Kap. 5.2.2, Kap. 5.2.3, Kap. 5.4.1), jednak využitím reálního měření na vzorcích (Kap. 4.3.1, Kap. 5.5.3). V dalších případech (Kap. 5.3.1, Kap. 5.3.2, Kap. 5.3.3, Kap. 5.3.4, Kap. 5.5.3) bylo využito obou těchto metod, tj. byly změřeny V-A charakteristiky článků a následně provedena simulace jejich sério-paralelního propojení.

Zpracování výsledků měření a provádění simulací bylo provedeno v prostředí programu Matlab pomocí připravených skriptů a funkcí.

Generování V-A charakteristiky článku při znalosti modelu bylo založeno na iteračním hledání řešení rovnice pro 1- a 2-diodový náhradní model FV článku (rovnice 1 a rovnice 2). Modely jsou blíže popsány v Kap. 2.1.1.

Simulace sério-paralelního propojení článků byla provedena metodou součtu napětí či proudů při shodném proudu či napětí jednotlivých článků (Kap. 5.2.1).

Pro nalezení parametrů náhradního 1- a 2-diodového modelu byla vyvinuta metoda iteračního hledání s využitím multilineární regrese (Kap. 3.2.6), která umožňuje nalezení všech parametrů pro běžně používané náhradní modely článků a panelů na základě naměřených bodů jedné V-A charakteristiky. Tato metoda byla aplikována na naměřené hodnoty v Kap. 4.4.1.

$$I = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

$$I = I_{PH} - I_{O1} \left[\exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{n_1 k T}\right) - 1 \right] - I_{O2} \left[\exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{n_2 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (2)$$

5. Hlavní přínosy a výsledky

Navržení a otestování nové metody určení parametrů modelu FV článku (Kap. 3.2.6)

Byla navržena a ověřena metoda pro nalezení parametrů náhradních modelů FV článků založená na multilineární regresi a iteraci.

Tato metoda je výjimečná tím, že umožňuje stanovení pro různé typy modelů FV článků a to pomocí jedné V-A charakteristiky. Metoda byla aplikována na data získaná měřením V-A charakteristiky monokrystalického FV článku při různých teplotách a intenzitách záření. Ověření bylo provedeno porovnáním V-A charakteristiky získané měřením s charakteristikou získanou modelem s nalezenými parametry. Bylo zjištěno, že pro testovaná data je metoda vhodná pro 1-diodový model a 2-diodový model při uvažování $n_1 = 1$ a $n_2 = 2$. Pro obecný 2-diodový model se 7 parametry neumožňuje metoda jednoznačné určení parametrů.

Podrobný popis této metody, její implementace a výsledky získané při její aplikaci na naměřená data monokrystalického křemíkového FV článku byly publikovány v časopise Solar Energy (Wolf a Benda 2013).

Nalezení závislosti saturačního proudu na intenzitě záření (Kap. 4.4.1)

Byla nalezena závislost saturačního proudu I_{02} na intenzitě záření pro uvedený monokrystalický FV článek a naznačeno možné vysvětlení. Tato závislost byla zatím dle nalezených zdrojů uváděna pouze pro články s heteropřechody, kde je dle předpokládané teorie její vliv výraznější. Toto zjištění bylo též uvedeno ve zmíněné publikaci (Wolf a Benda 2013).

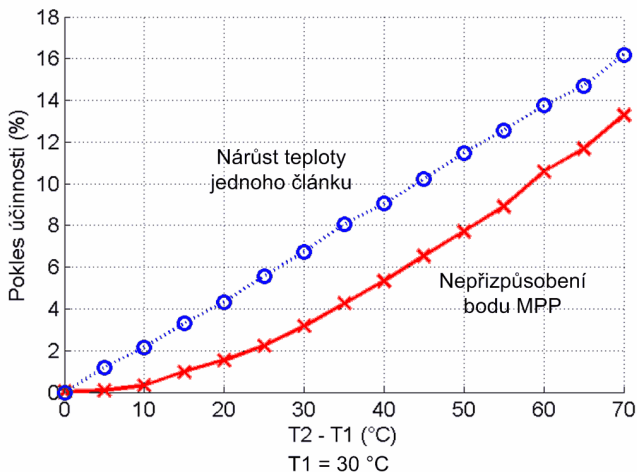
Zhodnocení paralelního propojení řetězců pro případ rozdílné teploty jednotlivých článků.

Pokud paralelně připojíme řetězec s odlišnou teplotou článků ke zbytku FV generátoru, dojde k již uvedené ztrátě výkonu vlivem odchýlení od bodu MPP jednotlivých článků. V případě výrazně rozdílné teploty či provozu bez zatížení (naprázdno) může dojít ke vzniku vyrovnávacích proudů. Pomocí simulace byla analyzována situace paralelního připojení řetězce ke zbytku systému a paralelního propojení dvou řetězců s odlišnou teplotou. V grafech byl pro tyto případy ukázán pokles výkonu v závislosti na teplotách řetězců.

Pro případ paralelního spojení dvou krystalických křemíkových FV článků byl pokles účinnosti vlivem nepřizpůsobení bodu MPP ukázán současně s poklesem účinnosti vlivem nárůstu teploty, pokud by články pracovaly odděleně (oba v bodě MPP), Obr. 2.

Bylo zjištěno, že pokles výkonu vlivem nepřizpůsobení bodu MPP při paralelním spojení článků je do rozdílu jejich teplot cca 15 K zanedbatelný (pod 1%). Při rozdílu teplot 70 K již dosahuje téměř 14 % a pro určení výstupního výkonu a V-A charakteristiky již nelze uvažovat střední teplotu celého FV generátoru (což je obvyklý postup v praxi pro nerovnoměrné rozložení teploty). Při tomto teplotním rozdílu je ztráta výkonu vlivem nepřizpůsobení bodu MPP jednotlivých článků již srovnatelná se ztrátou nárůstu teploty na jedním z nich (při uvažování provozu obou článků v bodě MPP). Simulace paralelního propojení byla pro zvolené teploty ověřena měřeními. Pro takto velký teplotní rozdíl hrají oba tyto jevy významnou roli na poklesu výkonu oproti provozu FV systému v ideálních podmínkách.

Některé z výsledků vlivu nerovnoměrné teploty dvou paralelně propojených FV článků byly prezentovány na konferenci ISES Solar World Congress (Benda et al. 2009).



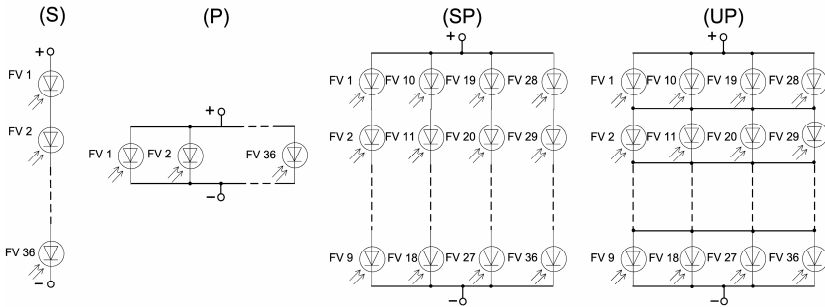
Obr. 2: Pokles účinnosti 2 článků vlivem nepřizpůsobení bodu MPP a vlivem nárůstu teploty jednoho článku

Zhodnocení různých způsobů propojení FV článků v panelu při provozu v nerovnoměrných pracovních podmínkách (Kap. 5.3.3, Kap. 5.4.1)

Pomocí simulace byl ověřen vliv různých způsobů propojení FV článků v panelu na jeho výstupní parametry. Způsob provedení simulace včetně zvolených variant propojení (Obr. 3) byl inspirován publikací Wang a Hsu (2011), kde byl uvažován vliv nerovnoměrně rozložené intenzity záření. Výsledky byly ve shodě s touto publikací, navíc byla provedena simulace nerovnoměrně rozložené teploty. Současně bylo uvedeno porovnání s ideálním případem, kdy články pracují nezávisle, tj. každý v bodě MPP.

Nejvhodnějším způsobem propojení pro případ nerovnoměrné intenzity záření bylo zjištěno paralelní propojení všech článků (P), dále byly presentovány výsledky ostatních uvažovaných možností propojení.

Obdobná simulace byla provedena pro případ nerovnoměrné teploty v rámci FV panelu a byly uvedeny její výsledky. Jako nejvhodnější způsob propojení bylo nalezeno sériové propojení všech článků (S), u ostatních variant byl uveden pokles výkonu vlivem nepřizpůsobení bodu MPP jednotlivých článků.



Obr. 3: Způsoby propojení FV článků

Ověření vlivu teplotního gradientu v rámci FV článku pomocí simulace a měření (Kap. 5.5.3)

V případě koncentrátorových systémů dochází často k výrazně nerovnoměrným pracovním podmínkám v rámci FV článku. Byl proveden experiment, při němž byla změřena V-A charakteristika FV článku s výrazným teplotním gradientem a výsledky porovnány se simulací. Simulace vycházela ze změření V-A charakteristiky uvažovaného FV článku

při různých teplotách a uvažování článku s teplotním gradientem jako paralelního součtu mnoha částí tohoto článku s příslušnou (rovnoměrně rozloženou) teplotou.

Zhodnocení vlivu nerovnoměrně rozložené teploty u fasádního FV systému (Kap. 5.3.4)

Pomocí simulace byl zhodnocen vliv teplotního gradientu u fasádního FV systému na výstupní elektrické parametry. Detailní tepelný model fasádního FV systému instalovaného na stavební fakultě ČVUT (Benda et al. 2007, Staněk 2011) byl tímto doplněn o elektrický model při uvažování nerovnoměrného rozložení teploty.

Bylo ukázáno, že v případě fasádního systému je vhodné sériové propojení panelů s teplotním gradientem do jednoho řetězce a poté případně paralelní spojení těchto řetězců. Při tomto způsobu propojení panelů (při maximálním rozdílu teploty 24 K) byla ztráta výkonu generátoru vlivem nepřizpůsobení bodu MPP stanovena na hodnotu 0,06 %, což je zanedbatelná hodnota hraničící s přesností simulace. Při paralelním propojení panelů s teplotním gradientem byla simulovaná ztráta výkonu výrazně vyšší, a to 0,56 %. I pro tento případ však ztráta výkonu byla srovnatelná s celkovým nárůstem teploty o cca 1 K a tudíž její vliv je oproti celkovému nárůstu teploty FV generátoru zanedbatelný. S dostatečnou přesností (chybou max. 1,25 %) lze pro oba tyto případy uvažovat střední hodnotu teploty FV generátoru. Na základě analýzy propojení dvou článků (Obr. 2) můžeme očekávat, že v případě fasádního systému s paralelním propojením panelů s teplotním gradientem bude ztráta výkonu vlivem nepřizpůsobení bodu MPP obdobně nelineárně závislá na maximálním teplotním rozdílu v rámci FV generátoru. Z tohoto lze usuzovat, že při vyšším teplotním rozdílu již může být ztráta výkonu vlivem teplotního gradientu nezanedbatelná.

Vytvoření balíčku skriptů a funkcí v prostředí Matlab

V prostředí Matlab bylo připraveno celkem 33 vzájemně provázaných funkcí, které je možné využít pro předzpracování dat získaných měřeními, generování V-A charakteristik při znalosti parametrů modelu (metoda dle Kap. 2.1.5), určení parametrů modelů FV článků a panelů (implementovány některé metody uvedené v Kap. 3.2) či simulaci jejich vzájemného elektrického propojení (metoda dle Kap. 5.2.1). Funkce byly přehledně popsány, aby mohly být využity v dalším výzkumu.

6. Závěr

Předložená disertační práce se zabývá chováním fotovoltaických článků a panelů v podmínkách nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření. Popisuje též náhradní modely FV článků a panelů, některé z rozšířených metod nalezení parametrů modelů, nově navrženou metodu nalezení parametrů modelu při znalosti jedné V-A charakteristiky a metody pro práci s modely.

V rámci práce byly diskutovány jednotlivé případy, kdy k nerovnoměrným pracovním podmínkám dochází a ukázán vliv pracovních podmínek na výslednou účinnost FV článků a panelů. Byla provedena řada simulací, měření a porovnání s publikovanými výsledky jiných autorů.

Nerovnoměrné pracovní podmínky nelze v praktických aplikacích zcela vyloučit. Vhodným konstrukčním návrhem a vhodným elektrickým propojením lze však výrazně eliminovat jejich dopad na pokles výstupního výkonu FV generátoru a současně zamezit vzniku nežádoucích efektů, které mohou v krajním případě způsobit degradaci či nevratné poškození FV generátoru. Jedná se především o provoz FV generátoru ve II. a IV. kvadrantu, kdy dochází k výraznému tepelnému nárůstu a může dojít k lokálnímu průrazu či poškození dalších částí systému (např. laminačních vrstev). Provoz v I. kvadrantu, kdy FV články dodávají energii do vnější zátěže, lze dále zajistit využitím překlenovacích a závěrných diod.

Pomocí simulací a měření bylo ukázáno, že v typických nekoncentratorových FV systémech není v obvyklých situacích vliv poklesu výkonu FV generátoru vlivem odchýlení od bodu MPP jednotlivých článků významný. Daleko větší vliv na účinnost mají ostatní jevy (např. pokles účinnosti vlivem rovnoměrného navýšení teploty). Pokles výkonu z důvodu odchýlení od bodu MPP při nerovnoměrných pracovních podmínkách je však prokazatelný a podílí se na celkovém poklesu účinnosti oproti provozu FV generátoru v ideálních pracovních podmínkách.

Seznam v tezi použité literatury

- Baig, H. - Heasman, K.C. - Mallick, T.K.
Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, Vol. 16, 2012, s. 5890-5909.
- Benda, V. - Macháček, Z. - Staněk, K.
Non-uniform temperature distribution on a back-ventilated PV Façade. In *ANZSES: Conference Proceedings*, 2007.
- Benda, V. - Macháček, Z. - Wolf, P. - Staněk, K.
Effect on Non-uniform temperature distribution in the photovoltaic array on efficiency of photovoltaic systems. In *ISES Solar World Congress: Conference proceedings*, 2009.
- Coventry, J.S. - Franklin, E.T. - Blakers, A.
Thermal and electrical performance of a concentrating PV/Thermal collector: results from the ANU CHAPS collector. In *Solar Conference: Proceedings*, Australian and New Zealand Solar Energy Society, 2002.
- Domenech-Garret, J.L.
Cell behaviour under different non-uniform temperature and radiation profiles using a two dimensional finite element model. *Solar Energy*, Vol. 85, 2011, s. 256-264.
- Franklin, E. - Coventry, J.
Effects of Highly Non-uniform Illumination Distribution on Electrical Performance of Solar Cells. In *40th ANZSES Conference: Proceedings*, Newcastle, Australia, 2002.
- Luque, A. - Sala, G. - Arboiro, J.C.
Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 51, 1998, s. 269-290.
- Macháček, Z. - Staněk K. - Wolf, P.
Vliv nerovnoměrně rozložené teploty na elektrické parametry FV pole. In *3. česká fotovoltaická konference: Sborník příspěvků*, Brno, 2008. ISBN 978-80-254-3528-1.
- Mellor, A. - Domenech-Garret, J.L. - Chemisana D. - Rosell, J.I.
A two dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination. *Solar Energy*, Vol. 83, 2009, s. 1459-1465.

Planning and Installing Photovoltaic Systems.

A guide for installers, architects and engineers. 2nd edition. Earthscan London, 2008. ISBN-13:978-1-84407-442-6.

Staněk, K.

Fotovoltaické zdroje pro budovy v podmínkách skutečného provozu - výpočetní modelování a experimentální validace. Disertační práce, ČVUT v Praze, 2011.

Wang, Y.J. - Hsu, P.C.

An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. Energy, Vol. 36, 2011, s. 3069-3078.

Wolf, P. - Benda, V.

Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods. 2013. Solar Energy 93, 151-157.

Seznam publikací vztahujících se k disertační práci

Publikace v impaktovaných časopisech

Wolf, P. - Benda, V. [55%]

Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods. Solar Energy, Vol. 93, 2012, s. 151-157.

Publikace v recenzovaných časopisech

Patenty

Publikace excerptované WOS

Publikace ostatní

Wolf, P. - Benda, V. [90%]

Stanovení parametrů FV článků na základě měření V-A charakteristiky. In Jubilejní 30. nekonvenční zdroje elektrické energie: Sborník konference. Brno: VUT v Brně, 2009, s. 47-49. ISBN 978-80-02-02164-3.

Benda, V. - Macháček, Z. - Wolf, P. - Staněk, K. [20%]

Effect of Non-Uniform Temperature Distribution in the Photovoltaic Array on Efficiency of Photovoltaic Systems. In Proceedings ISES Solar World Congress. Glasgow: International Solar Energy Society, 2009, s. 901-909. ISBN 978-1-920017-42-2.

Wolf, P.

Modelování elektrických parametrů FV článků a jejich sério-paralelních uspořádání. Odborná studie. ČVUT FEL. Praha, 2009

Wolf, P. - Benda, V. [50%]

Vliv nerovnoměrně rozloženého teplotního pole na výkon FV článků. In 29. Nekonvenční zdroje elektrické energie: Sborník konference. Brno: VUT v Brně, 2008. ISBN 978-80-02-02058-5.

Wolf, P. - Benda, V. - Macháček, Z. [40%]

The effect of surface temperature distribution in PV cells on the overall power generation. In MedPower: Proceedings. Thessaloniki, Řecko. 2008, ISBN 978-960-98540-0-9.

Macháček, Z. - Staněk, K. - Wolf, P. [10%]

Vliv nerovnoměrně rozložené teploty na elektrické parametry FV pole.
In 3. Česká fotovoltaická konference. Rožnov pod Radhoštěm, 2008,
s. 151-154. ISBN 978-80-254-3528.

Kaplanis, S. - Kaplani, E. - Wolf, P. [80%]

On the Effect of the PV Array Inclination to its Performance & Efficiency.
In 4th International Workshop on Teaching in Photovoltaics: Proceedings.
Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.
ISBN 978-80-01-04047-8.

Ohlasy a citace

Výzkumné granty

- Grant CTU0802413. Analýza tepelného pole v fotovoltaicko termálním modulu a jeho vlivu na elektrické a tepelné vlastnosti. Interní grant ČVUT. 2008.

Odborné stáže

- Stáž Erasmus na Technological Educational Institute of Patras, Řecko. 16.04.2007 – 16.07.2007. Příprava podkladů pro na disertační práci, měření vlivu elektrických parametrů FV modulů na teplotě s ohledem na přirozené chlazení konvekci.
- Odborná stáž na Institut für Solare Energietechnik ISET e.V., Kassel. Německo. 01.02.2008 – 31.05.2008. Téma: Analýza meteorologických dat za účelem zpřesnění modelu pro předpovídání výkonu FV systémů, využití umělých neuronových sítí a genetických algoritmů.

Summary

This thesis focuses on effects caused by non-uniform radiation and temperature in photovoltaic (PV) systems, especially how these conditions affect the electrical performance. Also the influence on reliability and lifetime of PV systems is discussed. The non-uniform operating conditions are studied on separate PV cells as well as on their interconnection in form of a PV panel or a PV generator. The effects are studied by performing simulations and measurements on samples. In case of simulation, it is essential to choose an appropriate model and methods to work with the model. For this reason the first three chapters give a brief introduction on typical models of PV cells and PV modules. Methods which can be applied on the models and on measured data are described.

The first chapter is a brief introduction into the topic of PV systems and non-uniform operating conditions.

In the second chapter common used models of PV cells and modules are discussed. The optical, thermal and electrical model is briefly described and a rough idea about a complex model is given.

The third chapter describes several of common used methods to retrieve model parameters using measured data. It also describes a proposed method based on curve fitting using multiple linear regression and iteration.

The fourth chapter discusses methods for measuring electrical parameters and operational conditions of PV cells and panels. Results of a measured sample of a PV cell are presented.

In the fifth chapter the causes and effects of non-homogenous operating conditions on interconnected PV cells and modules are discussed. Non-homogenous operating conditions on separate cells are discussed in case of concentrating systems. Cases where such operating conditions leads to substantial energy losses or even system damage are discussed.

Resumé

Tato disertační práce se zabývá vlivem nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření u fotovoltaických (FV) systémů na výsledné elektrické parametry. Popisuje i další jevy, které při těchto podmínkách vznikají a mohou mít na FV systém dočasný nebo i trvalý vliv. Úvahy a postupy jsou aplikovány na případy vzniku nerovnoměrných podmínek v rámci jednotlivých FV článků, v rámci FV panelů i soustavy FV panelů. Vliv nehomogenních podmínek je studován pomocí simulací i reálných měření, získané poznatky jsou porovnávány s výsledky dalších autorů. Pro provádění simulací je stěžejním úkolem vybrat náhradní model a určit jeho parametry. Proto jsou prvních tři kapitoly věnovány popisu metod pro práci s modely FV článků a panelů a s naměřenými daty.

První kapitola stručně shrnuje současný stav FV systémů a stav popisované problematiky.

Druhá kapitola se zabývá používanými elektrickými modely FV článků a panelů. Uvádí základní vazby mezi optickým, tepelným a elektrickým modelem a naznačuje představu o tzv. komplexním modelu FV generátoru.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny některé z často využívaných postupů určování parametrů náhradních modelů FV článků a panelů, je zde popsána metoda vyvinutá a testovaná v rámci této práce využívající k určení parametrů modelu multilineární regresi a iteraci.

Čtvrtá kapitola popisuje vhodné metody a postupy měření elektrických veličin a provozních parametrů FV článků a panelů. Dále uvádí výsledky měření elektrických parametrů FV článku, které budou v další kapitole využívány.

Pátá kapitola se zabývá příčinou a následky nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření v případě sério-paraletního propojení FV článků a elektricky propojených FV panelů. Dále analyzuje situaci nerovnoměrných podmínek v rámci jednotlivých FV článků pro koncentrátorové systémy, kde je tato nerovnoměrnost nejvýznamnější. Popisuje situace, kde dochází vlivem nerovnoměrnosti k výrazným ztrátám energie či kde může dojít k poškození FV článků či panelů.