

Marek Pástor, Jaroslav Dudrik

Kaskádový fotovoltaický striedač pre distribuovaný zdroj elektrickej energie

Článok sa zameriava na fotovoltaickú elektrárňu ako decentralizovaný zdroj elektrickej energie. Prezentuje optimalizáciu striedača pre fotovoltaický systém pri zohľadnení požiadaviek decentralizovaného fotovoltaického systému umiestneného na streche. Ako alternatívu ku klasickým mostíkovým striedačom s trojúrovňovým riadením predstavuje 15-úrovňový kaskádový mostíkový striedač s troma jednosmernými vstupmi a prediktívnym prúdovým riadením.

Kľúčové slová: distribuovaný zdroj, fotovoltaika, kaskádový striedač, prediktívne riadenie

I. ÚVOD

Narastajúca požiadavka na čisté a bezpečné generovanie elektrickej energie zdôrazňuje význam využívania obnoviteľných zdrojov energie. Využívanie slnečnej energie vo forme fotovoltaiky je v súčasnosti jedným z najrýchlejšie sa rozvíjajúcich priemyselných odvetví.

Väčšina elektrickej energie je v súčasnosti generovaná v centralizovaných zdrojoch elektrickej energie ako sú tepelné, vodné alebo jadrové elektrárne. Dôvodom je jednoduché sústredenie vysokého výkonu, umiestnenie mimo obývaných oblastí, jednoduchá logistika, nízke náklady na vyrobenú elektrickú energiu, atď. Centralizované zdroje energie majú trvalý prísun paliva a sú schopné nepretržitej prevádzky.

Decentralizované zdroje energie predstavujú alternatívu k centralizovaným zdrojom energie. Väčšinou majú nízky výkon (desiatky až stovky kilowattov) a výrazne vyššie náklady na kWh vyrobenej elektrickej energie než centralizované zdroje. Na druhej strane umožňujú pokryť spotrebu priamo v mieste inštalácie, vyrábajú elektrickú energiu bez priameho znečisťovania okolia, sú bezpečné, môžu byť prispôbené požiadavkám lokálnej záťaže, atď. Zvyčajne však nemajú k dispozícii trvalý prísun paliva.

Fotovoltaika (FV) ako obnoviteľný zdroj elektrickej energie má väčšinu vlastností decentralizovaných zdrojov energie. Z pohľadu elektrizačnej sústavy predstavuje nestabilita slnečného žiarenia, a tým premenlivé množstvo elektrickej energie vyrobenej fotovoltaickou (FV) elektrárnou, problematickú integráciu FV elektrární veľkého výkonu (jednotky až desiatky megawattov) do siete.

Rozptýlenie výkonu FV elektrární na väčšiu plochu (decentralizácia) môže pomôcť vyriešiť problém s prudkými zmenami výkonu v dôsledku zmeny osvetlenia na malej ploche. Decentralizácia FV elektrární umožňuje inštaláciu FV elektrárne malého výkonu priamo v mieste spotreby. Nevýhodou takéhoto riešenia z ekonomického pohľadu je príliš vysoká cena za kWh vyrobenej elektrickej energie.

Pre využívanie elektrickej energie vyrobenej FV generátorom (jednosmerné elektrické napätie generované FV panelmi) v striedavej sieti je potrebná konverzia na striedavé napätie. Táto konverzia je realizovaná prostredníctvom FV striedača, ktorý spolu s FV generátorom vytvára FV elektrárňu. FV generátor tak predstavuje kľúčový komponent FV elektrárne, ktorý výrazne ovplyvňuje vlastnosti celého systému FV elektrárne.

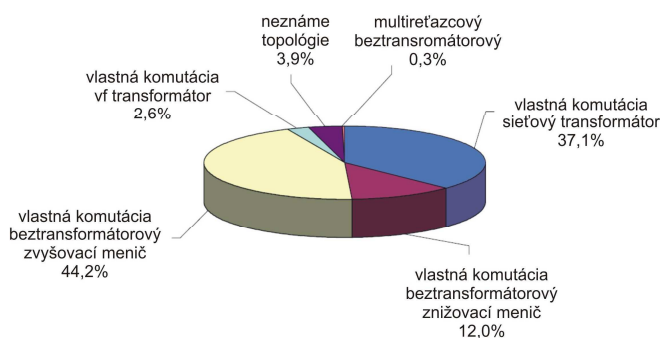
II. FOTOVOLTICKÉ STRIEDAČE

Fotovoltaický striedač slúži na premenu jednosmerného napätia a prúdu generovaného FV generátorom na striedavé napätia a prúd. Má za úlohu preniesť celý výkon generovaný FV generátorom a zabezpečiť požadovanú kvalitu výstupnej elektrickej energie.

FV systémy je možné rozdeliť na samostatné (pre oblasti bez pripojenia na elektrizačnú sústavu, ostrovné) a na pripojené do siete. Podľa FV systému je potrebné zvoliť vhodný FV striedač. V prípade ostrovného FV systému musí FV striedač poskytovať napäťovú podporu pre záťaž (vyžaduje sa napäťové riadenie FV striedača). Naopak v prípade systému pripojeného na sieť nie je potrebné, aby FV striedač poskytoval napäťovú podporu (vyžaduje sa prúdové riadenie FV striedača).

FV striedače je možné deliť podľa množstva kritérií. Príklad rozdelenia podľa spôsobu komutácie, topológie a použitia transformátora je uvedený na Obr. 1.

Trh striedačov pre FV systémy pripojené na sieť sa v posledných rokoch rozvíja aj v dôsledku legislatívnych zmien v krajinách Európskej únie. Znižovanie ceny a zvyšovanie účinnosti FV striedačov bolo hlavným cieľom pred približne 20 rokmi, keď sa oddelili od striedačov pre napájanie elektrických motorov. Za posledných 15 rokov klesli ceny FV striedačov približne o 50%, zatiaľ čo sa maximálna účinnosť zvýšila z 94% na viac ako 97%. Aj keď znižovanie ceny a zvyšovanie účinnosti (hlavne pri čiastočnej záťaži) ostali naďalej dôležitými cieľmi, do popredia sa stále viac dostáva EMC, bezpečnosť, spoľahlivosť a diagnostika FV systémov [1].



Obr. 1. Podiel jednotlivých topológií FV striedačov do 5kW na trhu v roku 2003 [1].

III. FOTOVOLTICKÝ SYSTÉM PRIPOJENÝ K SIETI AKO DISTRIBUOVANÝ ZDROJ

Decentralizovaný zdroj elektrickej energie je zvyčajne umiestnený priamo v mieste spotreby pričom je ho principiálne možné využívať aj ako záložný zdroj energie v prípade výpadku siete. FV striedač ako súčasť distribuovaného FV systému môže obsahovať buď napäťové alebo prúdové riadenie. Spôsob riadenia definuje vlastnosti takéhoto FV systému.

NAPĚŤOVÉ RIADENIE

Fotovoltický systém je napájaný z FV generátora, ktorý sa správa ako napäťový zdroj. Na vstupe FV striedača je kondenzátor. Výstup FV striedača sa správa ako napäťový zdroj a v dôsledku vysokého du/dt musí byť na jeho výstupe pripojená indukčná záťaž (Obr. 2). Oddelovacia tlmivka L1 slúži zároveň na oddelenie sieťového napätia U_G a pre činnosť systému je nevyhnutná. Na základe žiadanej hodnoty výkonového pomeru medzi sieťou a striedačom je napätie na tlmivke U_L riadené tak, aby mal sieťový prúd požadovanú hodnotu. Snímanie sieťového napätia je potrebné pre synchronizáciu FV systému so sieťou.

Náhradná schéma FV striedača s lokálnou záťažou pripojeného na sieť je uvedená na Obr. 3. Lokálna záťaž môže predstavovať napríklad spotrebu rodinného domu, ktorý má nainštalovaný FV systém.

Fázor napätia na oddelujúcej indukčnosti L1 je možné definovať ako:

$$\bar{U}_L = \bar{U}_G - \bar{U}_S \quad (1)$$

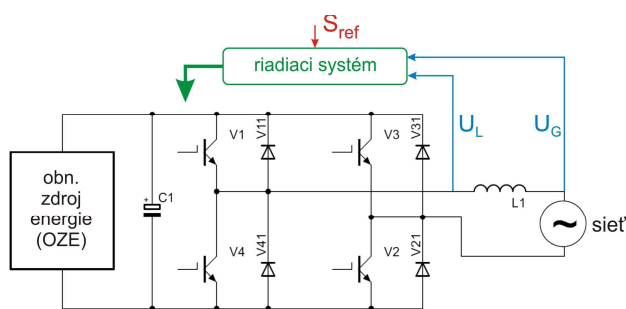
kde:

$$\bar{U}_S : \text{fázor výstupného napätia FV striedača, } \bar{U}_S = U_S \angle \delta,$$

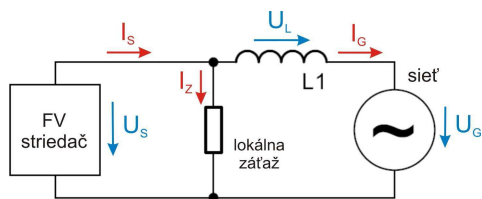
$$\bar{U}_G : \text{fázor napätia siete, } \bar{U}_G = U_G \angle 0.$$

Striedač umožňuje obojsmerný tok činného a jalového výkonu. To znamená, že výkon siete, ako činný P_G tak jalový Q_G , môže byť kladný (sieť dodáva výkon) aj záporný (sieť prijíma výkon).

Veľkosť napätia striedača je daná napájanou lokálnou záťažou. Ak je to záťaž určená na sieťové napätie, tak napätie striedača U_S musí byť rovnaké ako je napätie siete U_G .



Obr. 2. FV striedač s napäťovým riadením pripojený na sieť (tlmivka L1 slúži na oddelenie napätia striedača a siete a je nevyhnutná pre činnosť systému).



Obr. 3. Náhradná schéma FV striedača s napäťovým riadením a lokálnou záťažou pripojeného k sieť (FV striedač obsahuje potrebný filter).

Ak je pripojená lokálna záťaž, je potrebné zvažovať výstupné napätie striedača s ohľadom na pripojený spotrebič. Zvyčajne sa očakáva, že systém bude poskytovať [2]:

- stabilizáciu napätia na záťaži pri prevádzke bez siete aj so sieťou,
- záložný zdroj pri výpadku siete,
- korigovanie reaktívneho výkonu ($\cos\varphi > 0,9$),
- riadenie toku činného výkonu, striedač zabezpečuje obojsmernú výmenu energie medzi obnoviteľným zdrojom energie a sieťou.

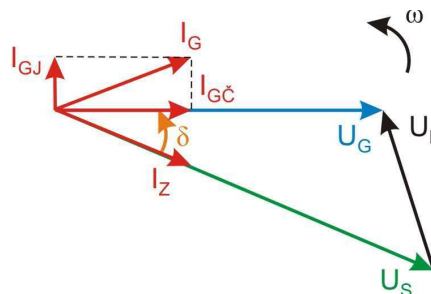
Keďže lokálna záťaž je pripojená priamo na výstup striedača, amplitúda napätia striedača sa nemôže meniť, pokiaľ má byť napätie na záťaži stabilizované. Na Obr.4 je znázornená situácia, ak je napätie siete v mieste pripojenia nižšie ako je požadované napätie. Záťažný uhol δ je záporný (napätie siete U_G predbieha napätie striedača U_S). Činný výkon pre záťaž je dodávaný zo siete, jalový výkon dodáva striedač.

Na základe (1) je možné sieťový prúd vyjadriť ako:

$$\bar{I}_G = \frac{U_G e^{j0} - U_S e^{j\delta}}{jX_L} = -\frac{U_S \sin\delta}{X_L} - j \frac{U_G - U_S \cos\delta}{X_L} \quad (2)$$

Činná zložka sieťového prúdu závisí pri konštantnom napätí U_S len od záťažného uhla δ . Pre záporný záťažný uhol bude činná zložka prúdu kladná (činný výkon je zo siete odoberaný), pre kladný záťažný uhol bude činná zložka prúdu záporná (činný výkon je do siete dodávaný). Jalová zložka sieťového prúdu závisí od napätia U_G a U_S a mení sa s kosínusom záťažného uhla δ . Keďže napätie U_S musí byť konštantné, tok výkonu je riadený len prostredníctvom záťažného uhla δ . Ak by bol pre situáciu na Obr.4 požadovaný jednotkový účinník sieťového prúdu musel by sa zväčšiť záťažný uhol, čo by však znamenalo zvýšenie činného výkonu odoberaného zo siete. Činný a jalový výkon sú pri napäťovom riadení FV striedača navzájom prepojené a tento typ striedača nie je vhodný pre kompenzovanie jalového výkonu v sieť [2].

Ak by mal byť sieťový prúd I_G nulový (činný a jalový výkon pre záťaž je dodávaný len z FV striedača), musela by byť sieť odpojená (prúd I_G bude nulový len ak bude nulové napätie na oddelujúcej tlmivke, čo znamená nulový tok výkonu v systéme), resp. FV striedač s napäťovým riadením nedokáže dodávať celý výkon pre lokálnu záťaž v prítomnosti siete.



Obr. 4. Sieťový prúd pri amplitúde \bar{U}_S väčšej ako \bar{U}_G a záťažnom uhle $\delta < 0$ ($P_G > 0, Q_G < 0$)

PRÚDOVÉ RIADENIE

Fotovoltický striedač s prúdovým riadením má v porovnaní s FV striedačom s napäťovým riadením nezmenený vstup (napájaný je z napäťového zdroja). Pre dosiahnutie prúdového riadenia je potrebné

na výstup FV striedača zaradiť tlmivku (alebo iný vhodný filter), keďže samotný mostíkový striedač je schopný na svojom výstupe vytvárať len príslušné napätie. V prípade použitia prúdového striedača by tlmivka L1 (Obr.6) nebola potrebná.

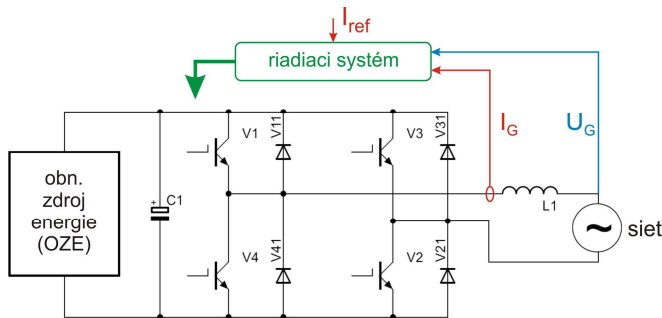
FV striedač s prúdovým riadením vytvára na svojom výstupe požadovanú hodnotu prúdu v závislosti od referenčnej hodnoty zodpovedajúcej požadovanému výkonu (Obr. 5).

Ak sa použije striedač s prúdovým riadením, tak prúd striedača I_S je možné nezávisle meniť. Striedač pracuje ako zdroj prúdu. Medzi sieťou a FV striedačom nie je potrebné použiť oddeľovaciu tlmivku, keďže striedač sa správa ako zdroj prúdu (Obr. 6). Prevádzka systému je možná len s prítomným napätím siete U_G , nakoľko FV striedač nedokáže poskytnúť napäťovú podporu pre lokálnu záťaž.

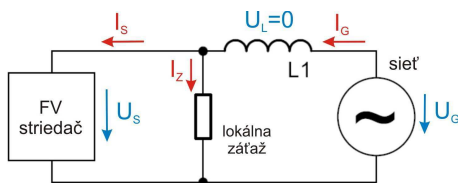
Nech je lokálna záťaž induktívneho charakteru. Požiadavkou je pomocou FV striedača kompenzovať jalový výkon odoberaný záťažou zo siete. Prúd záťaže je možné vyjadriť ako rozdiel prúdu odoberaného zo siete I_G a prúdu striedača I_S :

$$\vec{I}_Z = \vec{I}_G - \vec{I}_S \quad (3)$$

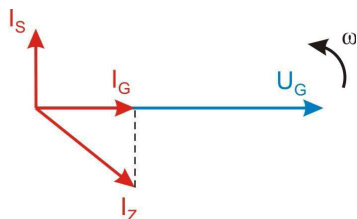
Na základe (3) je možné prúd záťaže považovať za sieťový prúd zmenšený o prúd FV striedača. V prípade požiadavky na kompenzáciu jalového výkonu odoberaného záťažou bude mať prúd I_G odoberaný zo siete len činnú zložku a prúd striedača I_S bude mať len jalovú zložku (Obr. 7).



Obr. 5. FV striedač s prúdovým riadením pripojený na sieť (tlmivka L1 nie je nutná pre činnosť systému)

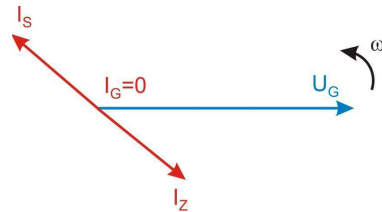


Obr. 6. Náhradná schéma FV striedača s prúdovým riadením a lokálnou záťažou pripojeného k sieti



Obr. 7. Kompenzácia jalového prúdu FV striedačom s prúdovým riadením

Na rozdiel od FV striedača s napäťovým riadením dokáže FV striedač s prúdovým riadením dodávať celý činný a jalový výkon záťaže v prítomnosti siete (Obr.8).



Obr. 8. Dodávanie celého výkonu záťaže FV striedačom s prúdovým riadením

TABUĽKA I
Porovnanie napäťového a prúdového riadenia FV striedača

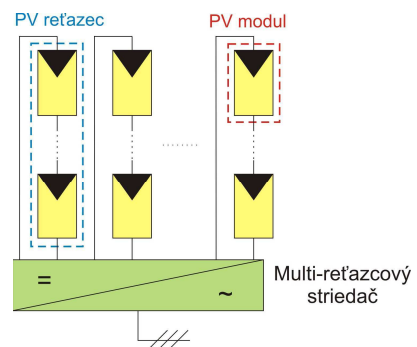
	Napäťové riadenie	Prúdové riadenie
cieľ riadenia	striedavé napätie	striedavý prúd
skratový prúd	vysoký	nízky (obmedzený na nominálny prúd)
samostatná činnosť (bez siete)	možná	nemožná
kompenzácia účinníka	nevhodné	vhodné
stabilizácia napätia	možná	nemožná

IV. TOPOLOGIA FV STRIEDAČA

Komerčne dostupné FV striedače sa delia na tri veľké skupiny:

- centrálné striedače (central inverters),
- striedače pre samostatný FV modul (module oriented inverters),
- striedače pre reťazec FV modulov (string and multi-string inverters).

FV panel je elektrický zdroj s maximom výkonu (P_{MPP}) pri definovanom napätí na jeho svorkách (U_{MPP}). Pre všetky napätia iné, než U_{MPP} je pri nezmenenej teplote a osvetlení výkon FV panela nižší než P_{MPP} . Pre dosiahnutie vyššieho napätia sú FV panely sériovo spájané. Takýto sériový FV reťazec má opäť charakteristický bod globálneho maxima výkonu dosahovaný pri napätí U_{MPP} . Pre získanie maximálneho výkonu z FV generátora je žiaduce aby FV generátor pracoval s napätím U_{MPP} . Činnosť FV generátora v bode maxima výkonu (MPP – Maximal Power Point) je dosahovaná prostredníctvom sledovača maxima výkonu (MPPT – Maximal Power Point Tracker).



Obr. 9. Multi-reťazcový striedač pre FV systém

MPP FV generátora závisí od osvetlenia, teploty, doby prevádzky, čiastočného zatienenia, atď. V prípade distribuovaného FV systému umiestneného na streche domu bude FV generátor rozdelený na niekoľko samostatných FV reťazcov (Obr.9). Každý z týchto FV reťazcov bude mať v dôsledku rôzneho osvetlenia, teploty, orientácie, počtu FV panelov a pod. odlišný bod MPP. Je teda žiaduce, aby mal každý FV reťazec svoje vlastné MPPT. Takto získaná energia z FV generátora je následne upravená a prenášaná FV strieďačom. Uvedené predpoklady majú za následok voľbu multi-reťazcového FV strieďača. Ten umožňuje na svoj vstup pripojiť niekoľko FV reťazcov, pre ktoré samostatne zabezpečuje MPPT a celú získanú energiu prenáša na svoj strieďavý výstup. Takáto distribuovaná FV elektrárňa je prispôbená pre umiestnenie na strechách budov.

V roku 2006 bola životnosť FV generátora na úrovni 25 rokov pričom FV generátor má vysokú spoľahlivosť. Na druhej strane životnosť FV strieďačov bola udávaná na úrovni 5 až 10 rokov hlavne v dôsledku problémov s elektrolytickými kondenzátormi. Teda počas životnosti FV generátora je FV strieďač potrebné niekoľkokrát vymeniť. Podľa veľkých výrobcov FV strieďačov nie je možné dosiahnuť životnosť FV strieďača na úrovni 20 rokov a cena FV strieďača je dôležitejšia ako jeho životnosť. Na druhej strane zníženie ceny a zvýšenie spoľahlivosti FV strieďačov je možné využitím nových topológií FV strieďačov. [3]

VIACÚROVNŔOVÉ MENIČE

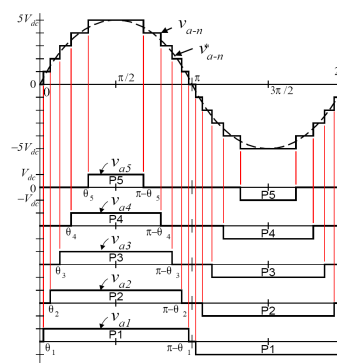
Koncept viacúrovňového meniča bol predstavený v roku 1975. Dôvodom bola možnosť prenášania vysokého výkonu pri vysokom napätí pomocou meniča so schodovitým napätím. Podobne ako v prípade jednoúrovňového dvojúrovňového meniča sa aj viacúrovňové meniče delia na meniče s jednosmerným a obojsmerným tokom výkonu. Strieďače patria do skupiny meničov s obojsmerným tokom výkonu. V praxi sa využívajú tri základne typy viacúrovňových strieďačov:

- kaskádový mostíkový strieďač,
- strieďač s kondenzátorovým vyvažovaním neutrálneho bodu (CNPC – Capacitor Clamped NPC)
- strieďač s diódovým vyvažovaním neutrálneho bodu (DNPC – Diode Clamped NPC)

Všetky uvedené typy viacúrovňových strieďačov pracujú na princípe skladania výstupného napätia z diskretných jednosmerných hodnôt a teda na svojom vstupe vyžadujú oddelené jednosmerne zdroje. No nie všetky vyššie uvedené typy viacúrovňových strieďačov sú vhodné pre aplikácie vo fotovoltaike [5]. CNPC strieďač má problém s nízkou účinnosťou pri prenose činného výkonu (v dôsledku energie uloženú v kondenzátoroch). DNPC strieďač má zložité riadenie činného výkonu.

Kaskádový mostíkový strieďač vznikne sériovým spojením mostíkových strieďačov a má teda vlastnosti mostíkového strieďača.

Výhody viacúrovňových meničov vyplývajú z princípu skladania výstupného napätia z diskretných jednosmerných hodnôt (Obr. 10). Výsledné schodovité napätie v prípade strieďačov dosahuje nižšie THD aj bez použitia filtra ako v prípade dvojúrovňových prípadne trojúrovňových strieďačov. Nižšie du/dt znamená nižšie vyžarované rušenie a tým zlepšené vlastnosti z pohľadu EMC. Viacúrovňové meniče môžu pracovať s nižšou spínacou frekvenciou pri rovnakých parametroch systému. Rozdelenie prenášaného výkonu medzi niekoľko modulov zvýši preťažiteľnosť meniča. Nižšie jednosmerne



Obr. 10. Výstup 11-úrovňového kaskádového strieďača (5 jednosmerných zdrojov s rovnakou amplitúdou) riadeného so základnou spínacou frekvenciou [7]

napájacie napätia znižujú spínacie straty, znamenajú nižší výkon prenášaný jedným polovodičovým prvkom a umožňujú použiť polovodičové prvky na nižšie napätie.

V. KASKÁDOVÝ MOSTÍKOVÝ STRIEĎAČ

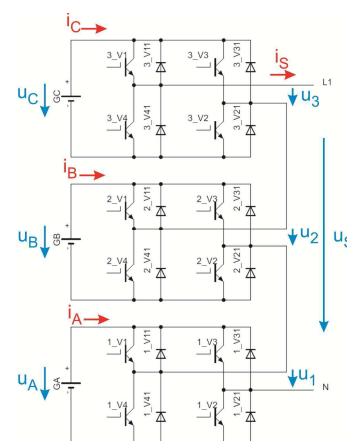
Kaskádový mostíkový strieďač vznikne sériovým spojením mostíkových strieďačov na ich strieďavej strane. Topológia kaskádového strieďača v prípade spojenia troch mostíkov je uvedená na Obr. 11. Nevýhodou kaskádového strieďača v priemyselných aplikáciách je potreba izolovaných jednosmerných zdrojov. V prípade fotovoltaiky toto nepredstavuje problém. Naopak kaskádový strieďač môže byť s výhodou využitý ako multi-reťazcový strieďač. V takom prípade predstavuje každý jednosmerný vstup znázornený na obr. 10 jeden FV reťazec spolu s jednosmerným meničom zabezpečujúci MPPT pre daný FV reťazec.

Výstupné napätie kaskádového mostíkového strieďača s galvanickým oddelením na jednosmernej strane (kaskádový strieďač) je tvorené súčtom okamžitých hodnôt výstupných napätí jednotlivých mostíkov.

$$u_S = u_1 + u_2 + u_3 \quad (4)$$

Pre dosiahnutie rovnakých napäťových prírastkov napätia u_S je potrebné zabezpečiť rovnosť napájacích napätí $u_A = u_B = u_C$. V takom prípade je počet úrovní výstupného napätia u_S daný:

$$n = 2d + 1 \quad (5)$$



Obr. 11. Kaskádový mostíkový strieďač (pri rovnosti napätí jednosmerných zdrojov schopný vytvoriť 7 úrovní výstupného napätia)

V [6] sú pre zvýšenie počtu úrovní namiesto jednosmerných zdrojov s rovnakým napätím použité zdroje s násobným napätím. Ak bude platiť $u_A = 2u_B = 4u_C$ atď., tak počet úrovní n výstupného napätia u_S je daný:

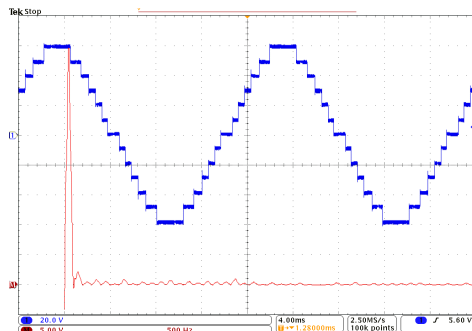
$$n = 2 \left[\sum_{k=1}^d C_k(d) \right] + 1 \quad (6)$$

kde:

$C_k(d)$ - je kombinačné číslo,

d - je počet oddelených jednosmerných zdrojov.

Ak sa použijú 3 mostíkové striedače s jednosmernými napätiami 60, 120 a 240 V, tak výsledný kaskádový striedač schopný na svojom výstupe vytvoriť 15 napäťových úrovní s maximálnym napätím 420 V.



Obr. 12. Merané výstupné napätie 15-úrovňového kaskádového striedača (3 jednosmerné zdroje: $U_A = 40$ V, $U_B = 20$ V, $U_C = 10$ V) s napäťovým riadením ($m_a=0.8$, $m_f=2$, $U_{RMS}=42$ V, $THDu=9\%$) a FFT analýza.

PRÚDOVÉ RIADENIE FV STRIEDAČA

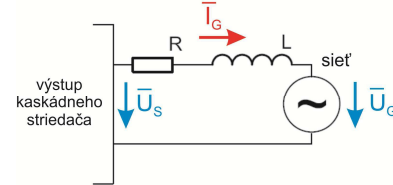
Na základe porovnania napäťového a prúdového riadenia bolo pre FV striedač pre distribuovaný systém zvolené prúdové riadenie. FV striedač teda dokáže pracovať len s pripojenou sieťou no umožňuje plnú reguláciu činného a jalového výkonu dodávaného do siete a lokálnej záťaže.

Pre vytvorenie prúdového riadenia existuje niekoľko možností. Pri použití šírkovej modulácie (PWM – Pulse Width Modulation) je potreba linearizácie modelu kaskádového striedača a následná regulačná štruktúra bude mať kaskádový charakter. Na druhej strane využitie prediktívnych riadiacich štruktúr ponúka možnosť riadenia výstupného prúdu striedača s vysokou dynamikou bez nutnosti riešenia nelineárnych vlastností výkonových polovodičových meničov.

Prediktívne techniky riadenia môžu byť rozdelené na hysterézne, trajektorové a modelové. V prípade hysterézneho prediktívneho riadenia existuje oblasť, ktorej sa má riadená veličina pohybovať. Pri trajektorovom prediktívnom riadení sleduje regulovaná veličina predpísanú trajektóriu. Modelové prediktívne riadenie využíva model systému pre predpovedanie budúceho stavu systému a následnú optimalizáciu regulovanej veličiny.

V [9] autori použili kombináciu trajektorového a modelového prediktívneho riadenia aplikovaného na troj-úrovňový DNPC striedač. Táto riadiaca technika bola po úprave aplikovaná na navrhovaný 15-úrovňový kaskádový striedač.

Základným princípom navrhnutého riadenia je fakt, že kaskádový striedač umožňuje na svojom výstupe vytvoriť 15 napäťových úrovní.



Obr. 13. Pripojenie kaskádového striedača k sieti pri prúdovom riadení

Pri známej záťaži a predošlom stave systému je možné vypočítať nasledovný stav systému a následne zvoliť taký napäťový vektor, ktorý bude minimalizovať rozdiel medzi požadovaným a dosiahnuteľným nasledovným stavom systému.

Systém zobrazený na Obr. 13 môže byť opísaný rovnicou:

$$u_S = Ri_G + L \frac{di_G}{dt} + u_G \quad (7)$$

Predpoveď prúdu siete je založená na diskretnom modeli, ktorý môže byť jednoducho implementovaný v počítači. Derivácia v (7) môže byť nahradená diskretnou aproximáciou (T_S je vzorkovací čas):

$$\frac{di_G}{dt} \approx \frac{i_G(k+1)T_S - i_GkT_S}{T_S} \quad (8)$$

Dosadením (8) do (9) vznikne diskretný model systému:

$$u_{SkT_S} = Ri_{GkT_S} + L \frac{i_G(k+1)T_S - i_{GkT_S}}{T_S} + u_{GkT_S} \quad (9)$$

Z (9) je možné vyjadriť nasledovnú hodnotu prúdu v dobe $(k+1)T_S$:

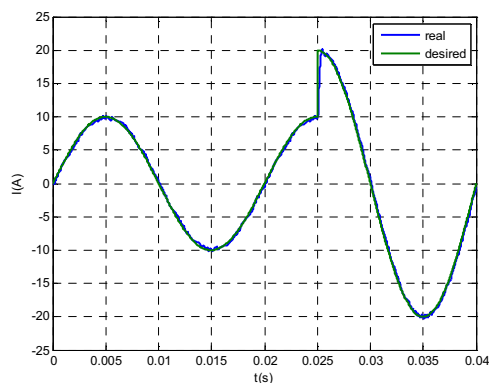
$$i_{G(k+1)T_S} = \frac{T_S}{L} (u_{SkT_S} - e_{kT_S}) + i_{GkT_S} \left(1 - \frac{RT_S}{L} \right) \quad (10)$$

Rovnica (10) je využitá pre výpočet nasledovnej hodnoty sieťového prúdu. Pri trajektorovom prediktívnom riadení je potrebné vytvoriť trajektóriu, ktorú má regulovaná veličina sledovať. Pre vytvorenie nasledovnej žiadanej hodnoty sieťového prúdu $i_G^*(k+1)T_S$ je využitá Lagrangeová kvadratická aproximácia, ktorá využíva Lagrangeove polynómy najnižšieho možného rádu:

$$i_G^*(k+1)T_S = 3i_G^*kT_S - 3i_G^*(k-1)T_S + i_G^*(k-2)T_S \quad (11)$$

Pre realizáciu prediktívneho riadenia je potrebné vytvoriť kvalitatívnu funkciu, ktorá bude definovať cieľ riadenia a bude vypočítavaná v každom kroku. Kvalitatívna funkcia môže byť zvolená ľubovoľne a jej tvar bude definovať kvalitu riadenia. Kvalitatívna funkcia môže minimalizovať spíniaciu frekvenciu, vyššie harmonické, odchýlku od želanej hodnoty, definovať dynamiku, atď. Kvalitatívna funkcia bola zvolená ako absolútna hodnota rozdielu medzi požadovanou a skutočnou hodnotou prúdu, ktorú je možné dosiahnuť pri použití 15 napäťových vektorov:

$$z_{kT_S} = \left| i_G^*(k+1)T_S - i_{G(k+1)T_S} \right| \quad (12)$$

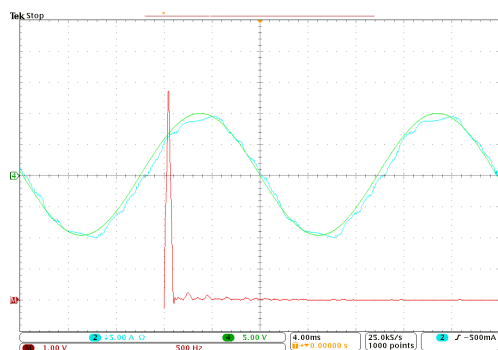


Obr. 14. Príklad simulácie sledovania referenčnej trajektórie prúdu pri prediktívnom riadení ($U_A = 240$ V, $U_B = 120$ V, $U_C = 60$ V, $T_S = 200$ μ s, $R = 1$ Ω , $L = 6$ mH)

V každej dobre vzorkovania T_S je na výstupe kaskádového striedača zvolený ten napätový vektor, ktorý minimalizuje kvalitatívnu funkciu (12) na množine všetkých dostupných napätových vektorov.

VI. MERANIE NA LABORÁTORNOM MODELI

Bol vytvorený laboratórny model 15-úrovňového kaskádového striedača napájaného tromi oddelenými jednosmernými zdrojmi. Meraním bola okrem iného overená schopnosť kaskádového striedača sledovať žiadanú hodnotu prúdu. Výsledok merania je zobrazený na Obr. 15, kde sú zároveň aj uvedené parameter meraného systému.



Obr. 15. Meraný výstupný prúd kaskádového striedača: CH1: žiadaná hodnota ($I_{max} = 10$ A), CH4: skutočná hodnota, M: FFT do 1kHz ($T = 200$ μ s, $R = 13,2$ Ω , $L = 6$ mH, $U_A = 240$ V, $U_B = 120$ V, $U_C = 60$ V)

VII. ZÁVER

V článku je prezentovaná možnosť využitia kaskádového striedača s viacerými jednosmernými vstupmi pre distribuované zdroje elektrickej energie založené na využití fotovoltiky. Navrhnutý prúdový regulátor pracuje správne s dostatočnou kvalitou regulácie. Množstvo aspektov kaskádového striedača ako FV striedača pre distribuovaný zdroj elektrickej energie nie je stále vyriešených. V nasledujúcej práci bude riešené pripojenie systému k sieti, spolupráca s lokálnou záťažou, využitie výstupného filtra vyššieho rádu. Kaskádový striedač je momentálne riadený pomocou programu RT-Lab, ktorý umožňuje rýchle implementovanie zmien v radiacej štruktúre ako je pridanie fázového závesu a pod.

POĎAKOVANIE

Tento článok bol vypracovaný s podporou projektu Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy, ITMS 26220220029, ktorý je spolufinancovaný zo štrukturálneho fondu EÚ ERDF v rámci výzvy OPV a V-2008/2.2/01-SORO a prioritnej osi 2 Podpora výskumu a vývoja.



LITERATÚRA

- [1] International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme: http://www.iea-pvps.org/trends/download/2008/Figure_Seite_02.pdf
- [2] S. H. KO, S. R. LEE, H. DEHBONEI, CH. NAYAR: A Comparative Study of the Voltage Controlled and Current Controlled Voltage Source Inverter for the Distributed Generation System, [Online]. Dostupné na: <http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec05/AUPEC2005/Volume1/S073.pdf>
- [3] NREL: A Review of PV Inverter Technology Cost and Performance Projections, 2006, [Online]. Dostupné na: http://www.nrel.gov/analysis/seminar/pdfs/2006/ea_seminar_jan_12.pdf
- [4] A. PANDEY, B. SINGH, N. B. SINGH, A. CHANDRA, K. AL-HADDAD, D. P. KOTHARI: A Review of Multilevel Power Converters, IEE Journal, 2006, [Online]. Dostupné na: <http://www.ieindia.org/pdf/86/elp86a163.pdf>
- [5] M. CALAIS, V. G. AGELIDIS: Multilevel converters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems- An Overview, 1998, [Online]. Dostupné na: www.ieeexplore.ieee.org/iel4/5707/15282/00707781.pdf
- [6] S. KHOMFOI, L. M. TOLBERT: Multilevel Power Converters, kapitola z H.Rashid: Power Electronics Handbook, druhé vydanie, Elsevier, 2007, ISBN10: 0-12-088479-8, strany 451 – 482.
- [7] L. M. TOLBERT, F. Z. PENG: Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems, [Online]. Dostupné na: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?reload=true&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6967%2F18765%2F00867569.pdf%3Farnumber%3D867569&authDecision=-203>
- [8] R. Kennel, "Predictive Control of Inverter Supplied Electrical Drives", v Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, 2000, strany 761 - 766 vol.2.
- [9] G. S. Perantzakis, F. H. Xepaps, S. A. Papatianassiou, S. N. Manias, "A Predictive Current Control Technique for Three-Level NPC Voltage Source Inverter", [Online]. Dostupné na: http://users.ntua.gr/stpapat/Paper_2.55.pdf
- [10] A. LÚQUE, S. HEGEDUS: Handbook of Photovoltaics Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003, ISBN: 0-471-49196-9
- [11] GPEC: Current Demand of High Performance Inverters for Renewable Energy Systems, 2007, [Online]. Dostupné na: http://www.gpec.dee.ufc.br/publicacoes/Sdahr_Antunes.pdf
- [12] T.ISHIKAWA: Grid-connected Photovoltaic Powersystems: Survey of Inverter and Related Protection Equipments, [Online]. Dostupné na: http://www.iea-pvps.org/products/download/rep5_05.pdf
- [13] C. V. NAYAR, S. M. ISLAM, H. DEHBONEI, K. TAN, H. SHARMA: Power Electronics for Renewable Energy Sources, kapitola z H. Rashid: Power Electronics Handbook, druhé vydanie, Elsevier, 2007, ISBN10: 0-12-088479-8, strany 673 – 716.

ADRESY AUTOROV

Ing. Marek Pástor, Technická Univerzita Košice, Katedra elektrotechniky a mechatniky, Letná 9, Košice, 042 00, Slovenská Republika, marek.pastor@tuke.sk

prof. Ing. Jaroslav Dudrik, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektrotechniky a mechatniky, Letná 9, Košice, 042 00, Slovenská Republika, jaroslav.dudrik@tuke.sk