# 一种基于新型载波同相层叠 PWM 方法的飞跨电容型光伏发电并网技术

徐 军[1]，王 琨[2]，翟登辉[1]，冯 琳[2]，李国杰[2]

(1.许继集团有限公司，河南 许昌 461000；2.国家能源智能电网(上海)研发中心，
上海交通大学电气工程系，上海 200240)

**摘要：**针对飞跨电容型三电平光伏逆变器载波移相算法线电压谐波较高，无法灵活控制飞跨电容电压等问题，提出一种基于新型载波同相层叠 PWM 方法的飞跨电容型光伏发电并网方案。通过增加零电平向量分配环节，平衡飞跨电容电压，降低光伏逆变器线电压谐波。阐述了新型载波同相层叠算法基本原理，分析了该方案降低光伏逆变器线电压 THD 的优点。通过 Matlab/Simulink 数字仿真和实验样机，验证了基于新型载波同相层叠方法的飞跨电容型光伏发电并网系统能够有效跟踪最大输出功率，保证直流电压稳定，降低光伏系统输出线电压谐波。

**关键词：**载波层叠 PWM 方法；载波移相 PWM 方法；飞跨电容逆变器；电容电压平衡；光伏发电并网系统

## Grid-connected photovoltaic power generation technology with flying capacitor inverter based on novel carrier-based disposition PWM method

XU Jun[1], WANG Kun[2], ZHAI Denghui[1], FENG Lin[2], LI Guojie[2]

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
2. State Energy Smart Grid R & D Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For 3-level flying capacitor photovoltaic (PV) inverter (FCPI), carrier-based phase-shifted method has the disadvantage of high line voltage harmonics and incapable of controlling flying capacitor voltage flexibly. This paper presents a grid-connected PV power generation system using novel carrier-based disposition PWM method which can balance flying capacitor voltage manually and reduce line voltage harmonics through adding zero-level vectors. This paper presents a 3-level FCPI grid-connected power generation system with proposed method, describes the basic principles of the proposed method and analyses the advantage of reducing line voltage total harmonic distortion (THD). Through Matlab/Simulink digital simulation and experiments, the results prove that the system has a fast response with capabilities of achieving maximum power point tracking (MPPT), stabling DC voltage and reducing line voltage of FCPI using the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307106).

**Key words:** carrier-based PWM; phase-shifted PWM; flying capacitor inverter; capacitor voltage balance; PV grid-connected system

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0134-06

## 0 引言

近年来，随着化石燃料的日益枯竭，光伏发电等新能源逐渐得到重视[1-6]。我国是光伏装机容量增长较快的国家，预计 2020 年，光伏发电装机容量将达到 30 GW。目前，常用的光伏逆变器拓扑主要有二极管钳位型和飞跨电容型，二极管钳位型利用二极管钳位，存在中点电压不平衡的固有缺陷[7-10]。飞跨电容型采用电容钳位，不存在直流母线中点电压偏移问题，但由于其一般采用载波移相算法，无法灵活控制飞跨电容电压且线电压谐波较高[11-13]。

文献[14]对飞跨电容型逆变器多载波调制方法进行了对比，得出载波移相调制方案最优，但此方案只是传统算法中的最佳方案，其固有线电压谐波

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51307106)

较高未能解决；文献[15]针对飞跨电容型拓扑提出一种新型载波交叠特性 PWM 方法，但该算法基于复杂的载波波形，实现较为繁琐；文献[16]提出一种新型载波同相层叠 PWM 方法，可以有效平衡飞跨电容电压并且降低输出线电压谐波。

本文提出一种基于新型载波同相层叠 PWM 方法的飞跨电容型光伏发电系统，在传统载波层叠算法基础上，增加零电平选择环节，根据预设初值合理分配零电平向量，平衡飞跨电容电压，从而降低光伏发电系统线电压谐波。当光伏系统接收恒定光照时，光伏逆变器能够有效跟踪最大功率，降低输出线电压 *THD*。最后，搭建了 Matlab/Simulink 数字仿真模型和实验样机，两者实验结果的一致性验证了该方法的正确性与可行性。

## 1　飞跨电容型逆变器基本原理

飞跨电容型多电平逆变器由于采用电容进行钳位而非二极管，因此，并不存在二极管钳位式逆变器的中点电压平衡问题，但此种拓扑结构必须使飞跨电容电压维持在某一定值。图 1 所示是飞跨电容型三电平逆变器拓扑结构，为简便起见，图中只绘出了单桥臂。图中：Sa1~Sa4 为电力电子开关；$VD_1$~$VD_4$ 为反向串联二极管；$C_1$ 和 $C_2$ 为直流母线电容，提供系统零点电位；$C_f$ 为飞跨电容，正常工作时其电压必须维持在 $V_{dc}/2$。

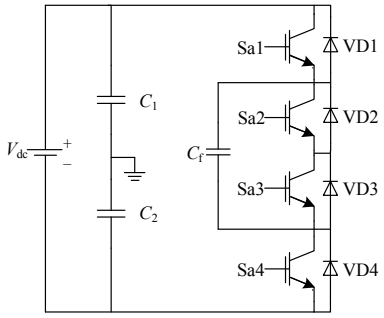


**图 1 飞跨电容型三电平逆变器单桥臂结构**

Fig. 1 3-level flying capacitor inverter with one bridge

飞跨电容型逆变器工作状态如表 1 所示，包括“1”、“0”和“−1”三种电平状态，其中零电平状态分为“0+”和“0−”两种状态，分别表示对飞跨电容 $C_f$ 进行充电和放电，由此可见，相对二极管钳位型拓扑结构，其开关状态有冗余。

易知，为了使飞跨电容 $C_f$ 上电压维持在 $V_{dc}/2$，需要使两种零电平状态成对出现，以达到充放电平衡，这是决定飞跨电容型多电平逆变器能否正常工作的关键。传统载波移相算法可以应用于飞跨电容型逆变器正是因为其算法在一个周期中产生的两种零电平状态能够自动平衡，但该算法逆变器输出线电压谐波较高。

**表 1 飞跨电容型三电平逆变器输出电压及开关状态**

Table 1 Output voltage and switching states of 3-level flying capacitor inverter

| 输出电压 | 开关状态 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Sa1 | Sa2 | Sa3 | Sa4 |
| $V_{dc}/2$(1) | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0+ | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0− | 0 | 1 | 0 | 1 |
| $-V_{dc}/2$(−1) | 0 | 0 | 1 | 1 |

## 2　新型载波同相层叠 PWM 方法

载波同相层叠算法是多电平逆变器应用较为成熟的一种，其算法应用简单，且线电压谐波较低，但是由于其算法特性，无法平衡飞跨电容电压，故不能直接应用于飞跨电容型拓扑。本文应用的新型载波同相层叠 PWM 方法则是对传统算法进行改进，充分利用飞跨电容型多电平逆变器开关状态冗余的特点，增加“0+”、“0−”零电平选择环节，在两个周期内使飞跨电容上的电压保持平衡。

算法具体流程如图 2 所示，其中 $K$ 为根据载波频率计算的预设参数，假设算法载波频率为 $F_1$，调制波频率为 $F_2$，则确定参数 $K$ 过程如下。

1) 利用式(1)计算单个调制周期中零电平出现的次数。

$$n = \frac{F_1}{F_2} + 1 \tag{1}$$

2) 根据零电平个数 $n$ 确定 $K$ 值。

若 $n$ 为偶数，$K=n$；

若 $n$ 为奇数，$K=(n-3)/2$。

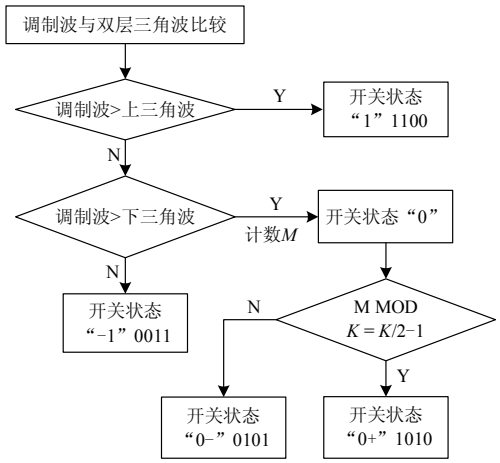


**图 2 改进载波同相层叠 PWM 算法流程图**

Fig. 2 Flow chart of improved PDPWM method

可以看出，算法思路是利用载波同相层叠PWM方法产生开关状态，在零电平时对“0+”、“0−”向量进行合理分配，以达到平衡飞跨电容电压的目的。该方法结合了飞跨电容型多电平逆变器开关状态冗余和载波同相层叠算法的优点，相比载波移相算法，可以降低飞跨电容型光伏逆变器线电压谐波。

## 3 飞跨电容型光伏发电并网系统

基于新型载波同相层叠PWM方法的飞跨电容型三电平光伏发电系统如图3所示，包括光伏阵列、DC-DC直流变换器、DC-AC飞跨电容型三电平逆变器[17]。光伏发电系统通过升压变压器并入10 kV电网，光伏系统容量为5 kWp，光伏系统通过30 km线路与10 kV母线相连。

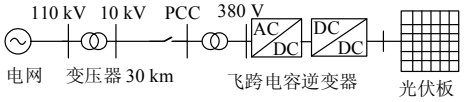


**图3 飞跨电容型光伏发电并网系统**

Fig. 3 Photovoltaic generation system with FCPI

### 3.1 光伏电池

光伏电池输出电流与输出电压的函数关系式如式(2)所示。

$$I = I_{\mathrm{ph}} - I_{\mathrm{d}}\{\exp[\frac{q(V+R_{\mathrm{s}}I)}{AkT}]-1\} - \frac{V+R_{\mathrm{s}}I}{R_{\mathrm{p}}} \tag{2}$$

式中：$V$和$I$为光伏电池输出电压、电流；$I_{\mathrm{ph}}$为由光照强度决定的短路电流；$I_{\mathrm{d}}$为流过二极管的电流；$R_{\mathrm{s}}$和$R_{\mathrm{p}}$为串并联阻抗；$q$为电子电量；k为波尔兹曼常数；$T$为温度；$A$为二极管理想因子[18-19]。

根据上述公式绘制光伏电池等效电路如图4所示。该模型由可控电流源、二极管、串联电阻和并联电阻组成，利用该模型并将其转化为等效工程数学模型，再利用仿真软件可以有效模拟光伏电池。

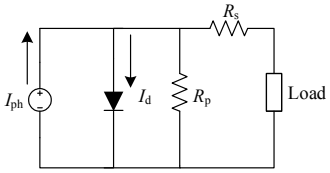


**图4 光伏电池等效电路**

Fig. 4 Equivalent circuit of PV battery

### 3.2 DC-DC直流变换器

DC-DC直流变换器是光伏系统进行最大功率跟踪的核心部分，本文采用的为Boost升压拓扑结构，如图5所示，包括电感L、二极管D、功率开关S和电容C，最大功率跟踪算法所产生的占空比控制该电路功率开关S的开通和关断，改变负载与电源内阻的比例，以获得最大输出功率[20-22]。

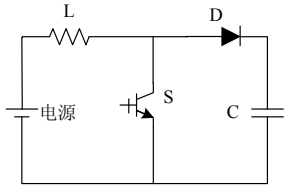


**图5 Boost升压电路**

Fig. 5 Boost circuit

MPPT算法是光伏系统获得最大功率跟踪的关键，本文所用算法为电导增量法与积分调节器相结合的方法，利用电导增量法寻找最大功率点需要满足的式(3)。

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V} = 0 \tag{3}$$

其中$P=UI$，代入后可以推导得出等效公式为

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}V} + \frac{I}{V} = 0 \tag{4}$$

当满足式(4)时光伏系统就会达到其最大输出功率，而通过积分调节器可以找到使式(4)接近零的占空比$D$，积分调节器的输出就是MPPT占空比的修正值$\Delta D$，算法具体框图如图6所示。

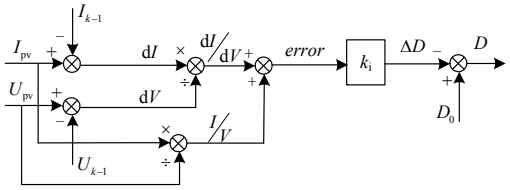


**图6 电导增量法与积分调节器**

Fig. 6 Incremental method with integral regulator

### 3.3 DC-AC

逆变并网部分采用PQ控制法，具体为典型双闭环控制，电压外环控制光伏系统直流电压恒定为600 V，内环控制并网电流[23]，逆变器拓扑采用飞跨电容型三电平结构，载波调制算法采用新型载波同相层叠PWM方法，具体控制方法如图7所示。

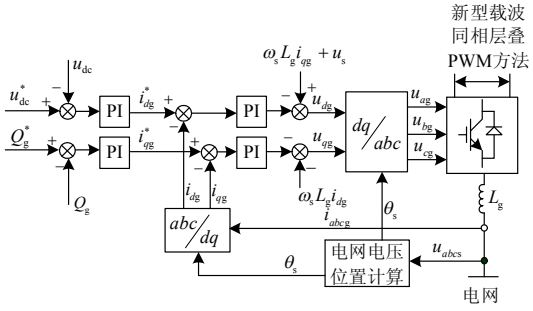


**图7 逆变器控制原理框图**

Fig. 7 Schematic diagram of a three-phase inverter

## 4　仿真及实验结果分析

(1) Matlab/Simulink 数字仿真

建立如图 3 所示的飞跨电容型三电平光伏发电并网系统，光伏板采用晶科公司某种型号，5 组并联，每组由 250 W 的 4 块光伏板构成，系统装机容量为 5 kWp。DC-DC 直流变换器及 DC-AC 逆变器电路均采用电力电子模型，仿真步长设定为 1 μs，控制部分仿真步长设定为 50 μs，系统光照强度为 1 000 W/m$^2$ 且保持不变。

数字仿真系统在仿真初始时刻启动 MPPT，系统经过 0.02 s 达到稳态，最大跟踪功率为 5 kW，有功功率输出波形如图 8 所示。从仿真波形可以看出，系统具有较快的响应速度且输出功率稳定。

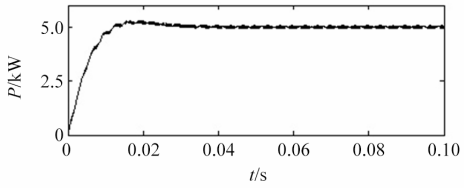


**图 8 光伏仿真系统输出有功功率**

Fig. 8 Output power of PV simulation system

光伏逆变器输出线电压及滤波后并网线电压如图 9 所示，逆变器输出梯形线电压谐波分析如图 10 所示，系统稳定后调制度为 0.8。一般来说，传统载波移相算法在调制度为 0.8 时逆变器输出线电压 *THD* 为 56%，而本文所提出的光伏发电系统，相同调制度下输出线电压 *THD* 仅为 38%，相较传统算法线电压谐波大大降低。光伏发电系统直流母线电压及并网电流如图 11 所示。

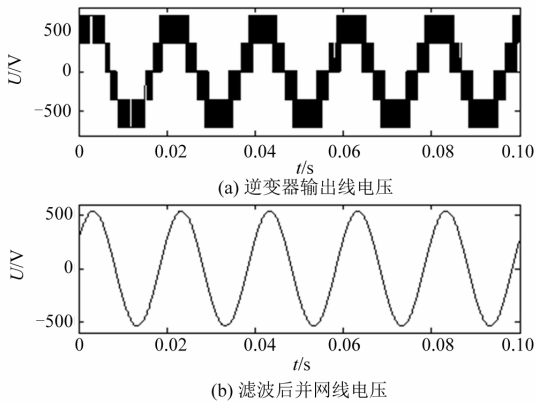


**图 9 光伏逆变器输出线电压及滤波后并网线电压**

Fig. 9 Output line voltage of PV inverter and PV system after filter (simulation)

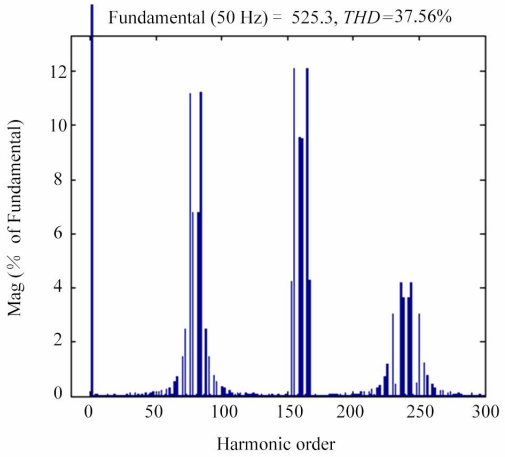


**图 10 光伏逆变器输出线电压(滤波前)*THD***

Fig. 10 Line voltage *THD* of PV inverter (simulation)

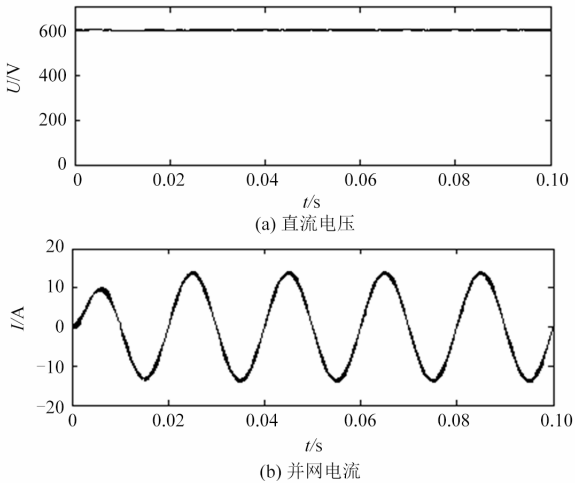


**图 11 光伏仿真系统直流电压及并网电流**

Fig. 11 DC voltage and grid current of PV system (simulation)

(2) 样机实验

为了验证基于新型载波同相层叠 PWM 方法的飞跨电容型光伏发电并网技术的正确性，本文建立了 5 kW 飞跨电容型光伏并网逆变器样机，光伏电池由 Chroma 公司光伏模拟器 62150H-600S 提供，直流母线电压采用 600 V，开关管采用 SEMIKRON 公司的 SKM50GB123D，开关频率为 3 kHz，控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F240，网侧滤波电感为 1 mH，滤波电容为 10 μF。图 12 所示为光伏系统实验直流电压及并网电流波形，可以看出，实验波形与数字仿真波形基本一致，说明了本文所提方法的正确性与可行性。实验所得并网电流中谐波含量比仿真波形稍大，其原因是实验中为防止上下管直通需要对功率开关管增加死区时间的控制，以及逆变器并网点实际交流电压并不是理想三相电压，存在一定不对称所致。

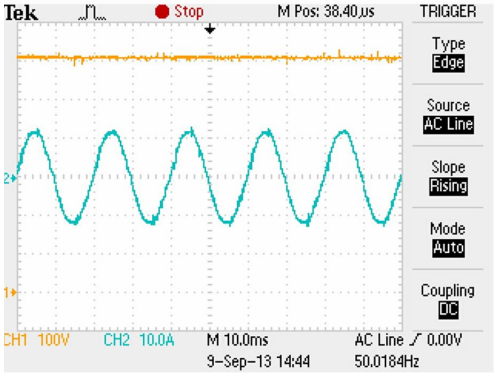


图 12 光伏逆变器实验样机直流电压及并网电流

Fig. 12 DC voltage and grid current of PV system (experiment)

## 5 结论

本文基于新型载波同相层叠 PWM 方法提出一种飞跨电容型三电平光伏发电系统。该方案结合了飞跨电容型逆变器开关状态冗余与载波同相层叠方法的优点，响应时间短，能够降低飞跨电容型光伏逆变器输出线电压谐波 *THD*。在恒定光照强度条件下，系统能够有效地跟踪最大输出功率，较大程度地降低输出线电压谐波。最后搭建了 Matlab/Simulink 数字仿真模型和实验样机，仿真与实验结果的一致性验证了该方法的正确性与可行性。

## 参考文献

[1] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.
GUO Tianyong, ZHAO Gengshen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.

[2] 宋卓然, 陈国龙, 赫鑫, 等. 光伏发电的发展及其对电网规划的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 92-96.
LIU Zhuoran, CHEN Guolong, HE Xin, et al. Study on development of PV generation and its impacts on distribution network planning[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7): 92-96.

[3] 陶琼, 吴在军, 程军照, 等. 含光伏阵列及燃料电池的微网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 89-92.
TAO Qiong, WU Zaijun, CHENG Junzhao, et al. Modeling and simulation of microgrid containing photovoltaic array and fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 89-92.

[4] 张雅静, 郑琼林, 马亮, 等. 采用双环控制的光伏并网逆变器低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 136-141.
ZHANG Yajing, ZHENG Qionglin, MA Liang, et al. LVRT of photovoltaic grid-connected inverter adoping dual-loop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Sosiety, 2013, 28(12): 136-141.

[5] 王立乔, 姜旭东. 单相多电平逆变器空间矢量调制技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 114-121.
WANG Liqiao, JIANG Xudong. A single-phase space vector PWM method for multilevel inverter and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 114-121.

[6] 康海云, 杭乃善, 卢桥, 等. 分布式光伏发电在智能电网中的作用分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10): 86-90.
KANG Haiyun, HANG Naishan, LU Qiao, et al. Role of distributed photovoltaic generation in smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10): 86-90.

[7] 王立建, 王明渝, 高文祥, 等. 复合控制技术在独立光伏并联发电系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 88-93.
WANG Lijian, WANG Mingyu, GAO Wenxiang, et al. Research of multiple control technology for stand-alone photovoltaic parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 88-93.

[8] KO Y H, PARK B G, KIM R Y, PREMRUDEEPREECHACHARN S, et al. A simple space vector PWM scheme with neutral point balancing for three-level neutral point clamped inverter[C] // Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011: 1-6.

[9] SRIRATTANAWICHAIKUL W, KUMSUWAN W, PREMRUDEEPREECHACHARN S, et al. A carrier-based PWM strategy for three-level neutral-point-clamped voltage source inverters[C] // Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011: 948-951.

[10] 朱克平, 江道灼. 一种改进型的光伏并网逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 99-104.
ZHU Keping, JIANG Daozhuo. An improved inverter for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 99-104.

[11] 刘苗, 洪峰, 王成华. 五电平飞跨电容型双降压逆变器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 83-87.
LIU Miao, HONG Feng, WANG Chenghua. A novel flying-capacitor dual buck five-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 83-87.

[12] 徐杰, 袁越, 傅质馨, 等. 光伏发电并网系统中公共连接点的电压调节[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11):

2970-2990.
XU Jie, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Voltage adjust of common connection pint in grid-connected photovoltaic generation system[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(11): 2970-2990.

[13] 张明锐, 林承鑫, 徐瑞新. 一种基于固态变压器的光伏发电并网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 133-138.
ZHANG Mingrui, LIN Chengxin, XU Ruixin. Grid-connected photovoltaic power generation technology based on SST[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 133-138.

[14] 李小凡. 飞跨电容型多电平变流器的多载波PWM方法[J]. 机电工程技术, 2011, 40(4): 82-84.
LI Xiaofan. Multi-carrier PWM method of flying capacitor multilevel inverter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2011, 40(4): 82-84.

[15] 王小峰, 何湘宁, 邓焰. 载波交叠特性 PWM 方法在飞跨电容多电平逆变器中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 98-102.
WANG Xiaofeng, HE Xiangning, DENG Yan. PWM methods with carrier overlapping characteristics in flying capacitor multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 98-102.

[16] 王琨, 冯琳, 李国杰. 一种适用于飞跨电容型多电平逆变器的新型载波同相层叠 PWM 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 8-13.
WANG Kun, FENG Lin, LI Guojie. A novel carrier-based disposition PWM method with voltage balance for flying capacitor multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 8-13.

[17] 巢睿祺, 王杰. 太阳能光伏并网系统的控制与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 81-87.
CHAO Ruiqi, WANG Jie. Control and simulation of the grid-connected solar photovoltaic system[J]. Power system and clean energy, 2014, 30(2): 81-87.

[18] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模与仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(34): 83-87.
LI Jing, XU Honghua, ZHAO Haixiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid-connected PV Power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(34): 83-87.

[19] 丁坤, 张经炜, 翟泉新, 等. 基于 S-Function Builder 的光伏阵列仿真模型[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 66-69.
DING Kun, ZHANG Jingwei, ZHAI Quanxin, et al. Simulation model for PV arrays based on S-function builder[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(5): 66-69.

[20] 方波, 李明, 康龙云. 直接占空比扰动的新型光伏自适应爬山法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 30-34.
FANG Bo, LI Ming, KANG Longyun. Novel adaptive hill climbing algorithm for PV power system with direct duty cycle perturbation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 30-34.

[21] 徐晓淳, 刘春生, 李锋. 光伏系统 MPPT 的改进模糊控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 81-84.
XU Xiaochun, LIU Chunsheng, LI Feng. Improved fuzzy control on MPPT method of solar system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 81-84.

[22] 鲁贻龙, 王斌, 陈丹平. 一种改进的变步长扰动观察光伏发电 MPPT 控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 64-68.
LU Yilong, WANG Bin, CHEN Danping. An improved variational step perturbation and observation control method for maximum power point tracking in photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 64-68.

[23] 陈侃, 冯琳, 贾林壮, 等. 基于 RTDS 的光伏并网数字物理混合实时仿真平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 42-48.
CHEN Kan, FENG Lin, JIA Linzhuang, et al. Design of digital/physical hybrid simulation platform for photovoltaic grid-connected system based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 42-48.

**收稿日期：2014-09-11；　修回日期：2014-11-16**

**作者简介：**

徐　军(1983-)，男，中级工程师，研究方向为微电网系统及电力电子设备；E-mail: xujun.xjgc@qq. com

王　琨(1988-)，男，硕士研究生，研究方向为电力电子控制、光伏发电、微电网等；

翟登辉(1984-)，男，中级工程师，研究方向为微电网系统及电力电子设备。

(编辑　魏小丽)