

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.009

# 局部阴影条件下基于 MMC 换流器的光伏并网

罗诚安, 于惠钧, 李林, 闵婕

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 提出了局部阴影条件下基于模块化多电平 (MMC) 的光伏并网系统, 并设计了该系统的控制策略。光伏阵列经 DC-DC 变换电路调节后并入电压源型换流器, 构成子模块 PSM, 子模块 PSM 和电抗器串联组成 MMC。控制系统包括启停控制、最大功率点控制以及并网控制。启停控制, 在能量反馈阶段采用直流电压控制策略, 在电容放电阶段采用三相同时放电策略; 最大功率点跟踪控制采用扰动观测法。利用 Matlab/Simulink 对光伏并网系统进行仿真, 仿真结果表明: 该系统能提高太阳能利用率, 降低并网输出波形的谐波含量, 实现功率独立控制。

**关键词:** 局部阴影; 模块化多电平逆变器; 光伏并网; 最大功率点跟踪

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2017)02-0049-07

## Grid-Connected PV System Based on MMC Under Partial Shading

LUO Cheng'an, YU Huijun, LI Lin, MIN Jie

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** A grid-connected PV system has been proposed based on MMC (modular multilevel converter) under partial shading, followed by a design of the control strategy of the system. Each photovoltaic array is connected with a VSC by a DC-DC converter circuit, thus forming a sub-module PSM, PSM and reactor in series to form MMC. The whole control system includes the start-stop control, the maximum power point control, and the grid connected control system. The start-stop control adopts DC voltage control strategy in the energy feedback phase, three phase simultaneous discharge strategy is used in capacitor discharge phase. By using Matlab/Simulink simulation software, a simulation test of the system has been carried out, with its results to verify the effectiveness and feasibility of the system in that it helps to improve the solar energy utilization, reduce the harmonic content of the grid connected output waveform, and realize the independent control of the output power.

**Keywords:** partial shading; MMC; grid-connected PV; MPPT

## 0 引言

近年来, 环境污染和能源枯竭的问题越来越严重, 许多国家开始重视环保并积极开发清洁能源。太阳能作为一种具有再生性的清洁能源, 成为了各国争相开发和研究的对象<sup>[1]</sup>。我国开发和利用太阳能、优化能源结构的步伐也在不断加快, 并走在了世界前列。随着我国光伏产业的快速发展, 太阳能

发电的装机容量得到了大幅提升的同时, 一些问题也相继显现出来, 如发电效率和输出电压等级低等<sup>[2]</sup>。

当光照发生变化时, 光伏阵列 (photovoltaic array, PV) 的性能、输出特性等都会随之变化。因此, 国内外学者对局部阴影条件下最大功率点跟踪算法 (maximum powerpoint tracking, MPPT) 进行了大量研究<sup>[3-8]</sup>。文献 [3] 提出了一种新型的电感拓扑结构,

收稿日期: 2016-11-25

作者简介: 罗诚安 (1991-), 男, 广东湛江人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为柔性直流输电技术,

E-mail: 334909@qq.com

在光照强度分配不均匀的情况下，零序电流和负序电流通过接在不同组件之间的电感实行分流，进而提高输出效率。文献 [4] 提出了一种基于干扰观测法的最大功率点跟踪算法，该算法提高了光电的转换效率和电力系统的动态稳定性。文献 [5] 研究了粒子群优化算法在光伏阵列多峰值的最大功率点跟踪控制中的应用，设计了一种具有较高鲁棒性的模糊控制器。文献 [6] 提出了在局部阴影条件下光伏阵列的最大功率跟踪算法，但是该算法实现较困难。

为了提高光伏发电系统的输出电压等级，学者们提出了逆变输出多电平电压，以此减小谐波，提高电能质量。文献 [9] 提出了一种基于 MMC (modular multilevel converter) 的光伏并网系统，但是该系统的造价过高，算法实现较难。文献 [10] 提出了基础 MMC 的光伏并网系统，将功率单元改为半桥式结构，实现了相近的控制，还增加了系统的稳定性。文献 [11] 提出了一种新的调制策略，该策略能实现 MMC 上下桥臂的平衡控制，很好地解决了级联式 MMC 应用于光伏并网系统的技术难题。

综上所述，本文提出了一种在局部阴影条件下基于 MMC 的光伏并网系统。本系统能在光照分配不均匀时实现光伏的最大功率点跟踪，提高了光能利用率；具有较高的电压等级，降低了光伏逆变输出对电网的谐波污染；实现了有功功率和无功功率的单独控制，并无需进行额外的无功补偿。

## 1 光伏并网系统

### 1.1 光伏并网系统的拓扑结构

本文所设计的光伏并网系统采用级联式模块化多电平 (MMC) 结构，如图 1 所示。MMC 每相由上下 2 个桥臂组成，每个桥臂由  $N$  个子模块 PSM (photovoltaic array sub-module, PSM) 和 1 个电抗器  $L$  串联组成<sup>[12]</sup>。

MMC 子模块的结构如图 2 所示。图中，VSC (vehicle stability control) 换流器是由 2 个绝缘栅双极型晶体管 ( $T_1, T_2$ )、2 个反向二极管 ( $D_1, D_2$ ) 和 1 个电容  $C$  构成的半 H 桥结构。

在光伏并网系统中，PV 经 DC-DC 变换电路进行升降压变换，以满足逆变时直流侧的电流要求；控制直流侧电压能实现光伏阵列的最大功率点跟踪；通过脉冲宽度调制技术 (pulse width modulation, PWM) 触发或关断子模块上的开关器件，控制子模块的投入或切出，以保证子模块的电压恒定、输出电压的稳定，实现功率的独立控制。本文所设计的光伏

并网系统能实现交流侧的多电平输出、功率的独立控制，具有输出电压谐波小、输出效率高优点。

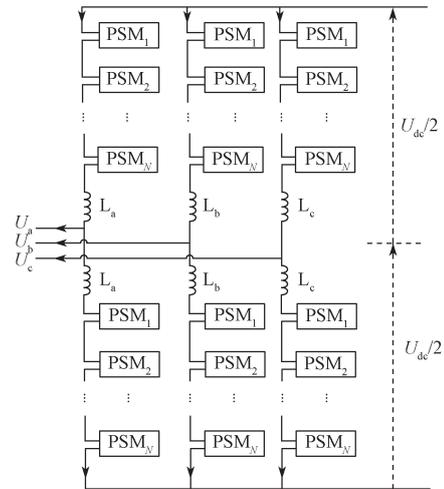


图 1 基于 MMC 的光伏并网系统的拓扑结构图  
Fig. 1 Topological structures of grid-connected PV system based on MMC

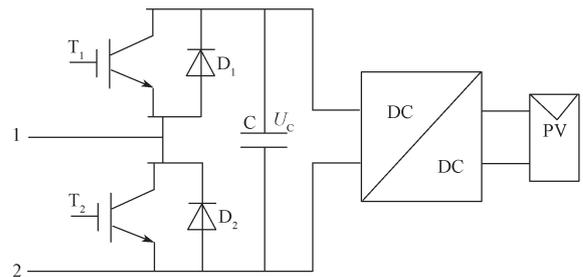


图 2 子模块结构图  
Fig. 2 PSM structures

### 1.2 PSM 的工作原理

通过调节上下桥臂的电压比率，同时串联叠加各子模块的输出电压，就可以在交流侧得到所期望的多电平电压。上下桥臂间电压比率是通过调整上桥臂 PSM 的投入运行模块数  $N_p$  以及下桥臂 PSM 的投入运行模块数  $N_n$  来实现，即通过设置  $T_1, T_2$  的不同开关状态实现  $N_p, N_n$  的控制。子模块 PSM 的工作状态分为 3 种情况。

#### 1) 闭锁状态

闭锁状态下， $T_1$  和  $T_2$  同时处于关断状态。当系统处于初始状态或出现故障时，PSM 会被强制闭锁，如图 3 所示。由图可知，上下桥臂的所有 IGBT 都处于关闭状态。当没有电流流进或流出 PSM 时，PV 对电容进行充电。当有电流正向流入 PSM 时，子模块电流  $i_{psm}$  通过续流二极管  $D_1$  和光伏阵列 PV 一起向电容充电；反之， $i_{psm}$  通过反向二极管  $D_2$  流出 PSM，由光伏阵列产生的电流  $i_{pv}$  对电容进行充电。

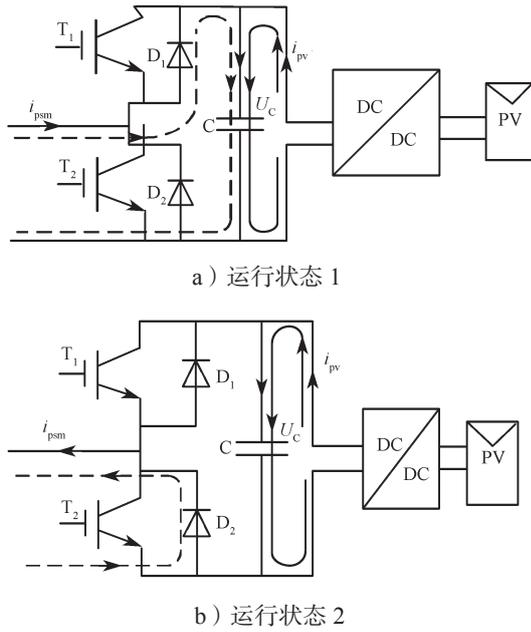


图 3 闭锁状态时子模块的工作情况

Fig. 3 Working condition of PSM in the lock-out state

2) 投入状态

投入状态下,  $T_1$  导通,  $T_2$  关断, 如图 4 所示。由图可知, 如果电流  $i_{psm}$  是流入状态, 则电流  $i_{psm}$  与光伏阵列产生的电流  $i_{pv}$  共同向电容 C 充电 (见图 4a)。如果电流  $i_{psm}$  是流出状态, 则当光伏阵列电流  $i_{pv} < i_{psm}$  时, 电容 C 处于放电状态, 电容电压  $U_c$  降低, 同时光伏阵列产生的电流  $i_{pv}$  通过  $T_1$  流向电网 (见图 4b); 当  $i_{pv} > i_{psm}$  时, PV 向电容充电, 电容电压  $U_c$  上升, PSM 的输出电压为  $U_c$ , 投入工作的子模块 PSM 数量增加 (见图 4c); 当  $i_{pv} = i_{psm}$  时, 电容处于平衡状态, PV 产生的电流通过  $T_1$  流出子模块。

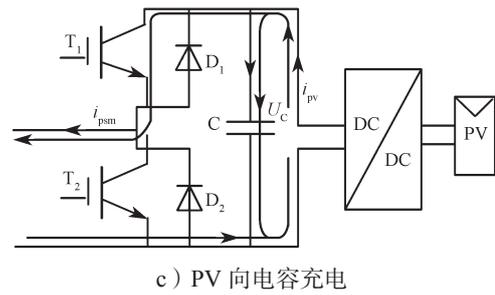
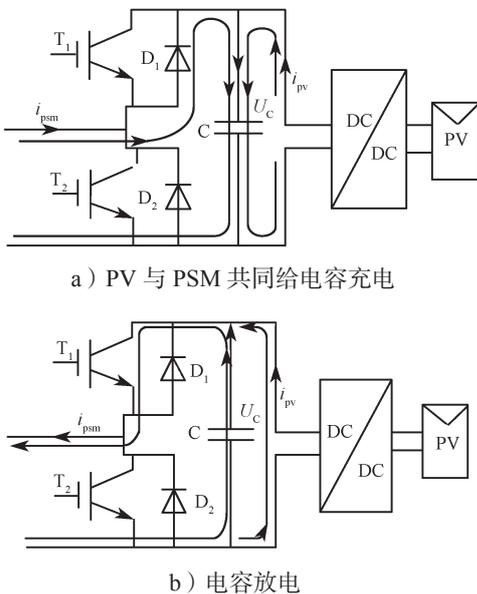


图 4 投入状态时子模块的工作情况

Fig. 4 Working condition of PSM in the input state

3) 切出状态

切出状态下, 子模块 PSM 的工作情况如图 5 所示。电流  $i_{psm}$  正向流入时, 经  $T_2$  流出, 由 PV 向电容 C 充电; 当  $i_{psm}$  为流出状态时,  $i_{psm}$  通过反向二极管  $D_2$  流出, 也是由 PV 向电容 C 充电, 但投入工作的子模块数量减少。

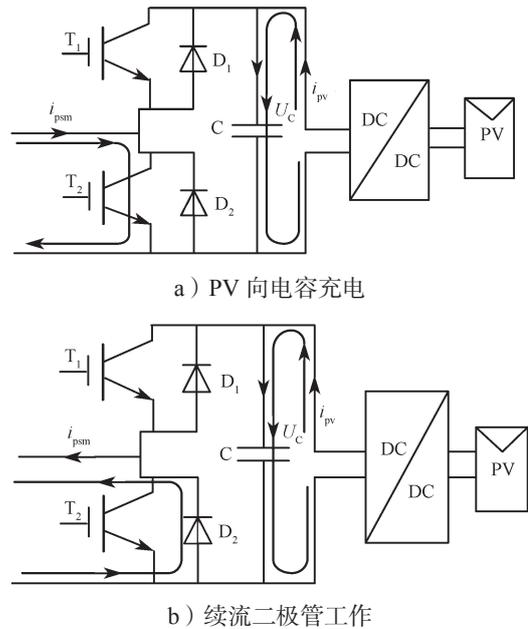


图 5 切出状态时子模块的工作情况

Fig. 5 Working condition of PSM in the cut-out state

综合以上分析结果可以得知, 只需要根据模块电流  $i_{psm}$  制定合理的控制方案, 控制 PSM 中全控器件的开通及关断, 即可使输出电压为最大功率点电压, 从而实现光伏阵列的最大功率输出, 控制功率的输入输出平衡。

2 控制策略

本文对 MMC 控制系统进行改进, 设计了基于 MMC 光伏并网的控制策略。控制策略包括启停控制、最大功率点跟踪控制、并网控制。

## 2.1 启停控制

MMC 装置的启动过程可以分为不可控阶段和可控阶段<sup>[11]</sup>。不可控阶段中,所有的子模块 PSM 都处于闭锁状态,模块化多电平结构近似的等效于三相六脉波的不可控电路。光伏阵列给电容充电,电流  $i_{pv}$  达到最大值时,电容电压  $U_c$  能达到  $U_s$  ( $U_s$  为交流输出端线电压的有效值)。进入可控阶段后,在光伏阵列和电流  $i_{psm}$  共同作用下继续向电容充电,充电电流  $i=i_{pv}+i_{psm}$ 。当  $U_c$  达到额定值时,MMC 进入正常工作状态。

MMC 装置的停机一般分为正常检修停机和故障紧急停机。本文仅对正常检修停机进行分析。该过程可以分为能量反馈阶段和电容放电阶段。

能量反馈阶段,MMC 与交流系统之间交换的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P = \frac{U_s U_b \sin \theta}{X}, \\ Q = \frac{U_s (U_s - U_b \cos \theta)}{X}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_b$  为交流输出端基波有效值,

$$U_b = \frac{0.866}{\sqrt{2}} U_{dc} = 0.612 U_{dc}; \quad (2)$$

$X$  为与交流系统连接的等效连接阻抗;

$\theta$  为功率因素角。

因此,在能量反馈阶段,采用直流电压控制策略控制光伏阵列的直流电压  $U_{dc}$ ,使其不断下降,当  $U_{dc}$  下降至  $1.633 U_s$  时,整个能量反馈过程完成。

电容放电阶段,本文采用三相同时放电策略。以其中一相进行说明:控制器接收到放电指令后,首先断开交流侧断路器,封锁触发脉冲;然后先将上桥臂的 PSM<sub>1</sub> 进行放电,使传输的有功功率和无功功率逐步降低至零,再对 PSM<sub>2</sub> 进行放电,以此类推,待所有子模块都放电完毕时闭锁 MMC,从而实现 MMC 的停机控制。

## 2.2 最大功率点跟踪控制

目前,光伏阵列的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法有电导增量法和扰动观测法<sup>[13]</sup>。电导增量法虽然响应较快,但其存在控制精度要求较高、噪声大、测量误差较大等问题。而扰动观测法更易于硬件实现,控制算法简单。因此本文采用扰动观测法实现最大功率点跟踪。

根据图 1 分析可知,最大功率点的跟踪受电容电压的影响,电容电压由子模块电流  $i_{psm}$  和光伏阵列电流  $i_{pv}$  共同作用,通过控制子模块 IGBT 的开通与关

断实现功率控制。因此,本文选取某桥臂的第  $i$  个模块的电压增量  $\Delta U_i$  作为扰动步长,其是控制 IGBT 的开通与关断的依据。

控制流程设置为:当  $\Delta U_i > 0$  时,子模块电容电压  $U_c$  在下一时刻应该增大,子模块的电容进入充电状态,若此时  $i_{psm} > 0$ ,则  $T_1$  导通,  $T_2$  关断;若  $i_{psm} < 0$ ,则  $T_1$  关断,  $T_2$  导通。同理,当  $\Delta U_i < 0$  时,则电容电压  $U_c$  下降,电容处于放电状态,若  $i_{psm} > 0$ ,则  $T_1$  关断,  $T_2$  导通;若  $i_{psm} < 0$ ,则  $T_1$  导通,  $T_2$  关断。

最大功率点跟踪控制器如图 6 所示。图中  $U$  为最大功率点跟踪控制器的输入量,  $i_{p,ref}$  为桥臂电流参考值。

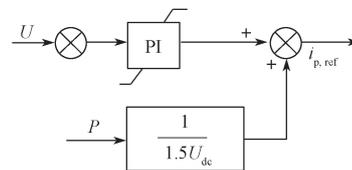


图 6 光伏阵列的最大功率点跟踪控制  
Fig. 6 Diagram of maximum power point tracking control of PV arrays

## 2.3 并网控制

光伏并网系统达到稳定时,MMC 的数学模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_d = U_{s,d} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q, \\ U_q = U_{s,q} - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R$  为逆变侧的等效电阻;

$L$  为桥臂上串联电抗器的电抗;

$U_d, U_q$  分别为 MMC 交流侧电压的  $d-q$  轴分量;

$U_{s,d}, U_{s,q}$  分别为交流电网电压的  $d-q$  轴分量。

从式(3)可以看出:MMC 交流侧电流的  $d-q$  轴分量  $i_d, i_q$  会受到交流侧电压  $U_d, U_q$  以及交流电网电压  $U_{s,d}, U_{s,q}$  的影响,同时还具有一定的耦合效应。为了去耦合,令

$$\begin{cases} U_{d1} = Ri_d + L \frac{di_d}{dt}, \\ U_{q1} = Ri_q + L \frac{di_q}{dt}, \\ \Delta U_d = \omega Li_q, \\ \Delta U_q = \omega Li_d. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为工频;

$\Delta U_d, \Delta U_q$  分别为  $d-q$  轴耦合因子。

通过加入耦合因子  $\omega Li_q, \omega Li_d$ , 实现了  $d-q$  轴的解耦。通过比例积分控制器得到  $U_d, i_d, U_q$  和  $i_q$ , 整理



由图9可以看出,正常光照下,系统启动时,单个光伏阵列的输出功率从7.0 kW快速达到9.5 kW,并处于稳定状态;0.5 s后,局部阴影(光照强度为800 W/m<sup>2</sup>)条件下,单个光伏阵列的输出功率降低,并迅速稳定在7.6 kW。因此,基于MMC的光伏并网系统采用扰动观测法跟踪最大功率点,在正常光照和局部阴影条件下都能稳定运行。

图10为基于MMC光伏并网逆变侧的输出有功功率波形。由图可以看出,在正常光照强度下达到稳态时,有功功率为456 kW;0.5 s,局部阴影条件下,有功功率有所下降,稳态时有功功率为364.8 kW。而由光伏参数及系统参数所计算的理论值为:正常光照强度下,有功功率为460.8 kW;局部阴影条件下,有功功率为369.6 kW。可知,仿真结果与理论值较接近。这证明了本文提出的基于MMC的光伏并网系统,除去自身消耗的有功功率外,几乎把所有的有功功率都输出到逆变侧。

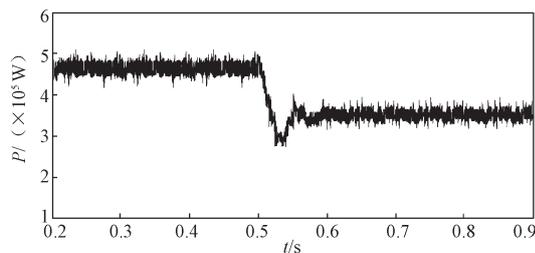


图10 有功功率波形图

Fig. 10 Active power waveform

图11为基于MMC光伏并网的无功功率波形。

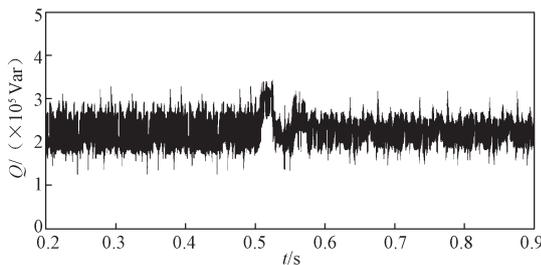


图11 无功功率波形图

Fig. 11 Reactive power waveform

由图11可以看出,系统的无功功率为 $2.3 \times 10^5$  Var;0.5 s后局部阴影条件下,无功功率经过短暂的震荡后,又恢复正常。

根据功率因数公式

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (6)$$

可得功率因数 $\cos \varphi = 1$ 。这证明全控器件IGBT能使系统实现有功功率和无功功率的单独控制,从而实现输出电压的稳定调节以及有功功率和无功功率的平

衡控制。因此本文提出的基于MMC的光伏并网系统无需额外加装无功功率补偿装置。

图12为MMC逆变侧输出的三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 波形。由图可以看出,正常光照时,三相电流的幅值为700 A左右,并且输出波形非常接近正弦波,谐波含量较少;0.5 s光照变为800 W/m<sup>2</sup>后,输出功率降低,输出电流也随之减小,三相电流的幅值在550 A左右,波形仍然非常接近正弦波,该波形没有因光照的变化而失真。由MMC的输出功率和三相电流可知,三相电压也接近正弦波,且谐波含量较少。因此基于MMC的光伏并网系统输出的谐波含量较少,对电网的冲击较小。

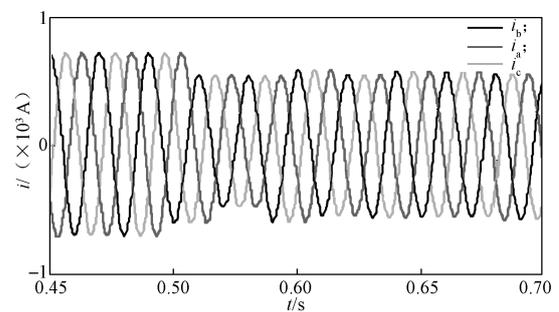


图12 三相电流波形图

Fig. 12 Current waveform

## 4 结语

光伏发电是解决能源短缺、改善我国能源结构的重要途径<sup>[12]</sup>。针对光伏并网系统存在光伏阵列功率受光照影响以及并网要求较高等问题,本文设计了模块化多电平的拓扑结构,介绍了其子模块的运行状态、数学模型、控制方法,并通过Matlab/Simulink进行仿真分析。仿真结果表明,基于MMC的光伏并网系统在正常光照及局部阴影条件下都能实现最大功率点跟踪,逆变输出为多电平输出,同时控制全控器件的开通与关断还可以实现有功功率和无功功率的单独控制,从而无需加装无功功率补偿设备。模块化多电平结构在光伏并网中的使用,能提升光伏并网的电能质量,具有较高的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 贾雪梅. 光伏电站经MMC-HVDC系统并网的启动控制策略研究[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(1): 65-69. JIA Xuemei. Research on Startup Strategy of PV Power Plants in Integrated into Grid Using MMC-HVDC[J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 37(1): 65-69.
- [2] 荣飞, 刘诚, 黄守道. 一种新型模块化多电平光伏并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23):

- 5976-5984.  
RONG Fei, LIU Cheng, HUANG Shoudao. A Novel Grid-Connected PV System Based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 5976-5984.
- [3] SCHAEF C, KESARWANI K, STAUTH J T. A Coupled-Inductor Multi-Level Ladder Converter for Sub-Module PV Power Management[C]//2013 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Long Beach: IEEE, 2013: 732-737.
- [4] 贾林壮, 冯琳, 李国杰, 等. 基于 MMC 技术的光伏并网逆变器原理及仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 78-85.  
JIA Linzhuang, FENG Lin, LI Guojie, et al. Research on the Principle and Simulation of Grid-Connected PV Inverter Based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 78-85.
- [5] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48.  
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of PSO Algorithm in Global MPPT for PV Array[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 42-48.
- [6] RAMLI M Z, SALAM Z. A Simple Energy Recovery Scheme to Harvest the Energy from Shaded Photovoltaic Modules During Partial Shading[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6458-6471.
- [7] EL-DEIN M Z S, KAZERANI M, SALAMA M M A. An Optimal Total Cross Tied Interconnection for Reducing Mismatch Losses in Photovoltaic Arrays[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 99-107.
- [8] 聂晓华, 赖家俊. 局部阴影下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制方法综述 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3279-3285.  
NIE Xiaohua, LAI Jiajun. A Survey on Tracking and Control Approaches for Global Maximum Power Point of Photovoltaic Arrays in Partially Shaded Environment[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3279-3285.
- [9] SUNDARESWARAN K, SANKAR P, NAYAK P S R, et al. Enhanced Energy Output from a PV System Under Partial Shaded Conditions Through Artificial Bee Colony[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 198-209.
- [10] 姚致清, 赵倩, 于飞, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, YU Fei, et al. Research on Large-Scale PV Grid-Connected System Based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [11] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制 [J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.  
ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Start/Stop Control of Modular Multilevel Converter Based HVDC Transmission System[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 204-209.
- [12] RIVERA S, WU B, LIZANA R, et al. Modular Multilevel Converter for Large-Scale Multistring Photovoltaic Energy Conversion System[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Denver: IEEE, 2013: 1941-1946.
- [13] 邱丽, 朱晓青, 郭百顺. 改进的爬山算法在风电最大功率跟踪中的应用 [J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(4): 57-60.  
QIU Li, ZHU Xiaqing, GUO Baishun. Application of Improved Hill-Climbing Algorithm in Maximum Wind Energy Tracing[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(4): 57-60.

(责任编辑: 邓彬)