

DOI: 10.7667/PSPC180069

带超级电容的级联型光伏并网逆变器控制策略

熊兰¹, 桂园¹, 柳慧梅¹, 宫金武²

(1. 湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068;

2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对由光伏电池板参数的分散性、遮挡不均以及光照强度波动等原因造成的发电功率损失及系统不稳定等问题, 提出一种带超级电容储能的混合级联型光伏逆变器。首先, 分析了该逆变器利用超级电容单元补偿光伏发电功率波动的工作原理。然后, 提出了一种基于PI控制和重复控制的控制策略。该控制策略引入占空比修正模块对光伏单元实施分散的MPPT控制, 以提高发电效率, 并对超级电容单元进行功率控制以平滑逆变器输出功率的波动。最后, 通过仿真和实验验证了该逆变器及其控制策略的可行性。

关键词: 混合级联; 光伏发电; 超级电容; 最大功率点跟踪

Control strategy of a cascaded inverter for grid-connected photovoltaic system with supercapacitor

XIONG Lan¹, GUI Yuan¹, LIU Huimei¹, GONG Jinwu²

(1. Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A hybrid cascaded PV inverter with supercapacitor energy storage is proposed to overcome the problems of power generation loss and instability of the PV system caused by dispersion of PV panel parameters, unequal sheltering and irradiation fluctuations. First, the operation principle of the inverter to compensate the PV power fluctuation with a supercapacitor cell is analyzed. Then, a control strategy based on PI control and repetitive control is proposed. It implements distributed MPPT for all PV cells with a duty modifying module to improve the power generation efficiency, and controls the power of the supercapacitor cell to smooth the output power fluctuations of the inverter. Finally, simulation and experimental results verify the feasibility of the proposed inverter and its control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507054) and Open Fund of Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficiency Utilization of Solar Energy (No. HBSKFMS2014035).

Key words: hybrid cascaded; photovoltaic power generation; supercapacitor; maximum power point tracking

0 引言

为了实现光伏系统稳定、高效发电, 多电平级联结构获得了十分迅速的发展。该结构能够实现分散的最大功率跟踪技术, 解决光伏电池板串联造成功率严重损失的问题, 同时该结构采用低压单元合成高压输出, 有输出电平数多、谐波小、输出滤波器体积小等优点。因此, 这种结构在分布式光伏发电中越来越受重视^[1-2]。为了解决光伏系统中常见的

输出不稳定现象, 需要在系统中加入储能元件, 出于成本等方面的考虑, 分布式光伏并网发电系统往往不包含储能元件。但随着这类电源接入电网的数量增多, 电网对其功率波动的容忍度会下降, 因此研究在级联结构中加入储能元件以抑制功率波动是很有意义的^[3]。

级联型光伏并网逆变器采用各单元独立的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制。当某个或几个光伏单元的光照强度发生短时较大突变时, 其直流输出电压也会改变, 导致系统的输出功率产生较大的波动, 影响系统的稳定性^[4-6]。为了解决直流母线电压波动而引起系统输出功率不稳定的问题, 需要引入储能单元以及功率

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51507054); 太阳能高效利用湖北省协同创新中心开放基金项目资助(HBSKFMS2014035)

控制策略使系统始终保持稳定工作^[7]。目前常见的带储能单元结构是将储能单元直接或者经 DC/DC 变换器并联在逆变器直流侧^[8]。而已有的级联型光伏逆变器功率控制策略可以分为三类: 第一类采用各单元的比例因数与总调制比的乘积, 作为其最终调制比信号^[9-12]; 第二类使用一个功率单元提供滤波电感上的无功功率, 其余各级单元只保持有功输出^[13-14]; 第三类是基于占空比有功分量修正的功率控制策略^[15-16]。

本文将超级电容储能单元作为独立的一级与多级光伏单元在逆变器交流侧串联, 组成混合级联光伏并网逆变器, 并采用相应的控制策略, 以实现光伏系统高效稳定并网的目标。

1 系统结构和控制方法

1.1 混合级联光伏逆变器结构

本文带有超级电容储能的混合级联光伏并网逆变器, 将超级电容作为独立的一级与多级光伏单元级联。图 1 是这种逆变器的单相结构图。超级电容和光伏电池板都单独与 H 桥连接, 构成超级电容单元和光伏单元。 $n+1$ 个单元在交流侧串联合成较高的输出电压, 经滤波电感接入电网。

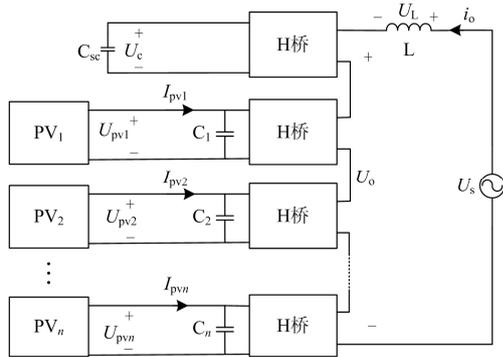


图 1 光伏并网系统结构图

Fig. 1 Grid-connected photovoltaic system structure

图 1 中, C_{sc} 为超级电容, U_c 为超级电容单元直流电压, $PV_k (k=1, 2, \dots, n)$ 代表光伏电池, C_k 是光伏单元的直流侧电容, U_{pvk} 和 I_{pvk} 为光伏电池板的直流电压和输出电流, U_L 为滤波电感 L 两端电压, U_o 、 i_o 、 U_s 分别为逆变器输出电压、输出电流和电网电压。

1.2 系统控制原理

忽略功率器件的损耗, U_{osc} 表示超级电容单元输出电压, $U_{opvk} (k=1, 2, \dots, n)$ 表示第 k 级光伏电池单元输出电压。本文控制思路是在单位功率因数并网的前提下, 令所有光伏单元仅保持有功输出, 而

超级电容单元一方面补偿光伏单元的有功波动, 另一方面要提供滤波电感上的无功功率, 其控制矢量框图如图 2 所示。

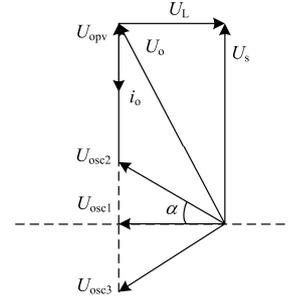


图 2 混合级联型逆变器输出电压合成矢量图

Fig. 2 Vector synthesis of hybrid cascaded inverter's output voltage

图 2 中 U_o 是逆变器的输出电压, 由所有光伏单元输出电压的总和 U_{opv} 与超级电容单元输出电压 U_{osc} 合成。 U_L 代表滤波电感上的压降, i_o 滞后 U_L 90° 。如果 U_L 垂直于电网电压 U_s , 则 i_o 与电网电压 U_s 夹角为 180° , 即逆变器以单位功率因素向电网输出有功功率。由于 U_{opv} 的幅值会随光伏发电功率波动而变化, 为保持输出稳定, 超级电容单元输出电压 U_{osc} 可能处于 U_{osc1} 、 U_{osc2} 和 U_{osc3} 这三种状态中的一种, 分别代表了超级电容单元只输出无功、输出有功和无功以及吸收有功且输出无功的状态, 并对应光伏发电功率稳定、偏小和过大的情况。因此, 调节超级电容单元的输出电压就能够达到抑制系统输出功率波动和稳定输出电压的目的, 这种方案简单易实现, 而且能够高效地利用太阳能。

设 U_{op} 、 U_{oq} 分别表示逆变器输出电压的有功分量和无功分量, α 表示超级电容单元输出电压 U_{osc} 与逆变器输出无功分量 U_{oq} 之间的夹角。则可列出如下数学表达式。

$$U_{oq} = U_{osc} \cos \alpha = -U_L \quad (1)$$

$$U_{op} = \sum_{k=1}^n U_{opvk} + U_{osc} \sin \alpha = U_s \quad (2)$$

将式(1)和式(2)都乘以逆变器输出电流 i_o 可得

$$Q = i_o U_{osc} \cos \alpha = -U_L i_o \quad (3)$$

$$P = \sum_{k=1}^n i_o U_{opvk} + i_o U_{osc} \sin \alpha = U_s i_o \quad (4)$$

式(3)和式(4)分别揭示了光伏系统的无功功率、有功功率的平衡关系。为了实现本文的控制目标, 系统运行中应该始终满足这两个功率平衡关系。

1.3 系统稳定控制约束条件

文献[17]针对级联型光伏逆变器现有的三种功

流控制、PWM 控制信号修正环节和超级电容控制。

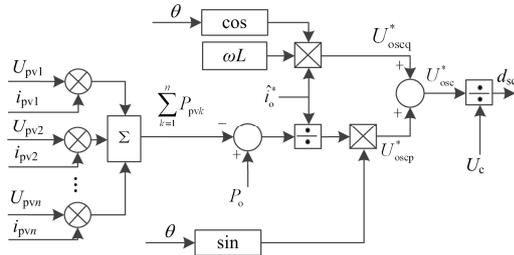


图 5 环境条件(光照)发生突变时超级电容控制框图

Fig. 5 Control diagram under mutational irradiation condition

1.4.2 直流母线电压和逆变器输出电流控制

本文采用电导增量法^[18]实现光伏电池板的 MPPT 控制。图 3 所示的电压电流双控制环中, PI1 是比例积分控制器, 采用临界比例度法可实现对比例积分系数的设置。 i_o^* 和 i_o 分别是逆变器输出电流参考值和实测值, 两者比较所得误差信号, 经过重复控制算法后, 与引入的电压前馈信号求和, 并减去超级电容单元的输出电压指令值 U_{osc}^* , 得到光伏单元输出总的 PWM 控制信号 d_{pwm} 。双环控制中, 电压环采用比例积分控制器快速消除直流母线电压总的波动, 而电流环利用重复控制以及引入电压前馈实现系统无静差控制和抗干扰的能力, 同时利用锁相环使逆变器输出电流实时跟踪电网电压相位, 实现单位功率因数并网。重复控制环中 N_1 和 N_2 的值取决于采样周期以及控制系统的时延^[19-20]。

1.4.3 PWM 控制信号修正

光照的随机性和光伏电池参数的分散性会引起各光伏电池板直流电压的波动和差异。本文采用图 3 中的控制信号修正环节, 实现对每级光伏单元输出的调控。

其具体方法: 将各光伏单元直流电压测量值标幺化之后与标准值 1 比较, 得到输出偏差量, 经比例积分器 PI2 后与电网电压同步因子相乘, 得到每级光伏单元输出控制信号的修正量, 再叠加到总 PWM 控制信号 d_{pwm} 上, 就得到各光伏单元的最终调制信号 d_{pvk} ($k = 1, 2, \dots, n$), 用于载波移相调制。

1.4.4 超级电容控制

图 2 中, 超级电容的输出量中有功分量根据光伏单元发电功率的变化进行控制, 无功分量根据滤波电感所需的无功功率控制。具体控制方法如下。

(1) 在理想条件下, 光照强度稳定且光伏单元输出有功功率满足并网发电额度时, 超级电容只需输出滤波电感上的无功功率, 而不进行有功补偿, 此时其输出电压保持图 2 中的 U_{osc1} 不变。若考虑到单元的内部损耗, 则需对其直流电压进行控制, 增加有功分量, 其控制框图如图 4 所示。超级电容直流

电压的偏差值经过比例积分调节器 PI3 与电网电压相位同步因子相乘, 作为超级电容单元输出电压指令值的有功分量 U_{osc}^* 。而指令值的无功分量 U_{oscq}^* 则是由逆变器输出电流的幅值 \hat{i}_o^* 与滤波电感的感抗 ωL 以及 $\cos\theta$ 相乘所得。然后将 U_{osc}^* 和 U_{oscq}^* 合成得到超级电容单元的输出指令值 U_{osc}^* 。

(2) 当超级电容通过充电或放电来平抑光伏单元输出有功功率的波动时, 其输出电压的有功分量维持逆变器输出电压的稳定, 直至其直流电压超出允许的工作范围, 控制框图如图 5 所示。其输出指令值的无功分量计算方式与前述一致。而其有功分量则通过将逆变器输出功率的指定运行值 P_o 与光伏电池总输出有功功率之差作为需补偿的有功分量, 除以逆变器输出电流参考幅值 \hat{i}_o^* , 乘以电网电压同步因子而得到。

(3) 超级电容单元的输出电压指令值 U_{osc}^* 除以其直流电压得到输出控制信号 d_{sc} 。 d_{sc} 与所有光伏单元的控制信号 d_{pvk} ($k = 1, 2, \dots, n$) 一起用于载波移相调制。

2 仿真结果与分析

为了验证本文的混合级联光伏逆变器的可行性和控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了三个光伏单元和一个超级电容单元混合级联的模型, 系统参数见表 1, 光伏电池仿真模型参数见表 2。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
电网电压 U_g/V	42	直流侧电容 $C_k/\mu F$	5 000
电网频率/Hz	50	超级电容 C_{sc}/F	2
滤波电感 L/mH	1	超级电容电压初始值/V	48
开关频率 f_s/kHz	10		

表 2 光伏电池仿真模型参数

Table 2 Simulation model parameters of photovoltaic cell

参数	数值
开路电压/V	34.8
短路电流/A	7
最大功率点工作电压/V	27.3
最大功率点工作电流/A	6.7

仿真的步骤如下: 第一步, 在 0~1.2 s, 三块光伏电池板的初始光照强度均为 $1\ 000\ W/m^2$, 温度 50° ; 第二步, 在 1.2~3 s, 将第一块光伏电池板的光照强度减小到 $800\ W/m^2$, 第二块的光照强度保持不变, 第三块的光照强度减小到 $600\ W/m^2$, 温度不变。图 6 为各光伏单元的直流电压和输出功率的变化曲线。

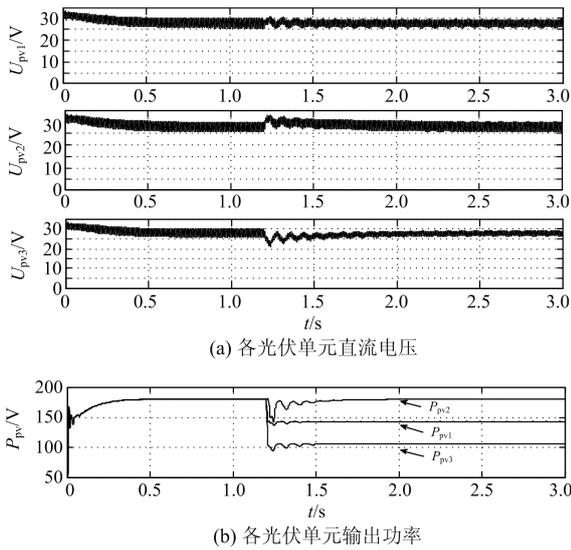


图 6 三个光伏单元直流电压和输出有功功率

Fig. 6 DC voltages and output power of three PV cells

图 6 中, $t < 1.2$ s 时, 由于条件一致, 三块光伏板的直流电压和输出功率曲线保持一致。 $t > 1.2$ s 时, 第 1、3 块光伏板光照强度改变。光照强度的变化, $U_{pv3} < U_{pv1} < U_{pv2}$, 三块光伏电池板的直流电压都经过短时波动后跟踪到最大功率状态并保持稳定, 验证了分散的 MPPT 控制的有效性。

图 7 为超级电容直流电压和输出功率变化曲线。开始时超级电容不输出有功功率, 其直流电压保持 48 V 不变。 $t = 1.2$ s 时, 光照强度的下降导致光伏单元的有功输出减小, 超级电容开始进行有功功率的输出补偿, 数值约 100 W。通过图 6 中可以计算出光伏单元总有功输出由 $180 \text{ W} \times 3 = 540 \text{ W}$ 减小到约 440 W, 可见超级电容单元快速准确地补偿了光伏单元下降的功率。图 8 显示了逆变器的总发电功率。整个过程逆变器始终保持约 540 W 的功率输出, 即在光照强度发生改变时, 光伏系统输出功率没有出现大的波动, 验证了利用超级电容平抑光伏发电功率波动控制方法的有效性。

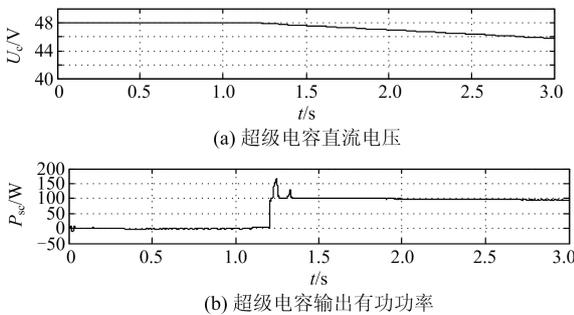


图 7 超级电容直流电压和输出功率

Fig. 7 DC voltage and the output power of supercapacitor

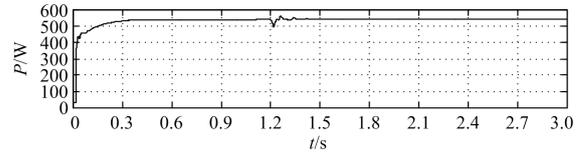


图 8 光伏系统总发电功率

Fig. 8 Active power of the whole PV generation system

图 9 显示了逆变器输出电流和电网电压的相位关系, 表明系统输出电流具有单位功率因数。

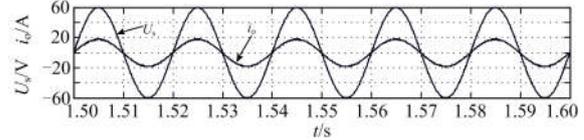


图 9 逆变器输出电流和电网电压波形

Fig. 9 Output current of PV inverter and grid voltage

3 实验

本文搭建了一个四单元的混合级联型逆变器实验平台。该平台采用了 DSP+FPGA(TMS320F2812+EP4CE115)作为控制器; 各单元主回路开关管为 MOS 管 IPB042N10N。

主要技术参数: 三个光伏单元直流电压为 26~36 V, 采用光伏模拟电源 CHROMA62100H-600S 模拟光伏电池特性; 一个储能单元直流侧为 2.5 F/32 V 超级电容(12 个 30 F/2.7 V 电容串联而成), 工作于 24 V 下; 逆变器的交流输出经变比为 60/311 的隔离升压变压器与 220 V 的电网连接; 开关频率为 1 kHz。

实验中, 光伏电池 1 光照强度先减小后增强, 光伏电池 2、3 的光照强度保持不变。

图 10 记录了超级电容和光伏电池 1、2 和 3 的直流电压变化情况。当电池 1 光照强度下降时, 其直流输出电压也下降, 升高时也会相应地提高, 对应着超级电容的放电和充电状态, 超级电容直流电压的变化说明了超级电容的控制策略快速有效。光伏电池 2 和 3 的电压在电池 1 的光照变化的两个节

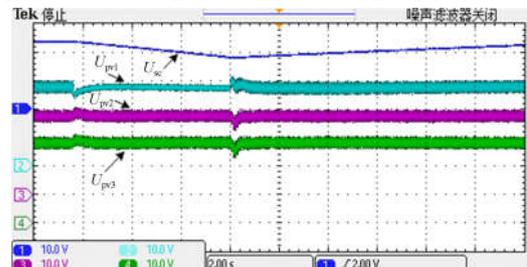


图 10 光伏单元和超级电容直流电压实验波形

Fig. 10 DC voltage waveforms of PV cells and supercapacitor cell

点处会有短暂的波动,但在 MPPT 控制策略以及功率控制的调节下,都能快速地恢复稳定输出状态,说明了控制策略的有效性。

图 11 分别显示了电网电压、逆变器输出电流、超级电容电压和光伏电池 1 的直流电压。使用图 11 记录电网电压和逆变器输出电流的数据,绘制出逆变器输出有功功率曲线如图 12 所示。当光伏电池 1 功率下降且在电容补偿能力范围内时,超级电容放电补偿,此时逆变器输出功率基本不变,逆变器输出电流保持稳定。约 8.2 s 时,光伏电池 1 光照强度增强,超级电容退出补偿状态并开始充电,逆变器输出功率略小于额定值,因此输出电流略微减小。但该充电过程是可控的,不影响整个光伏系统保持稳定、高效地并网发电,再次验证了超级电容单元控制策略的有效性。

图 13 显示了电网电压和逆变器输出电流的相位关系,表明该并网系统输出电流具有单位功率因数。

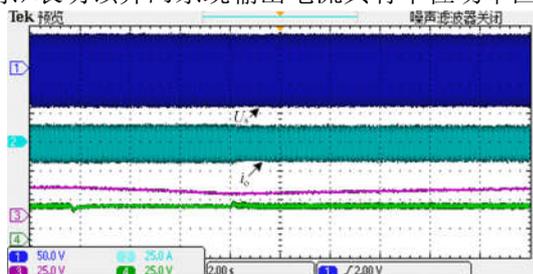


图 11 电网电压和逆变器输出电流实验波形

Fig. 11 Waveforms of grid voltage and inverter's output current

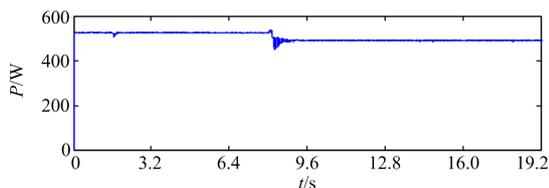


图 12 光伏系统输出的有功功率

Fig. 12 Active power of the PV system

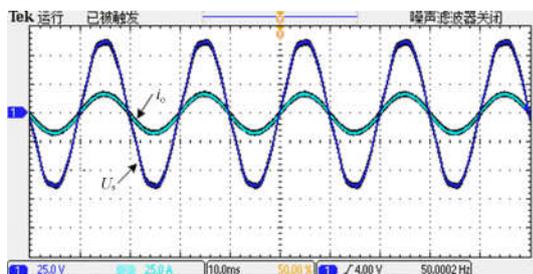


图 13 电网电压和逆变器输出电流波形

Fig. 13 Waveforms of grid voltage and inverter output current

4 结论

本文设计了带超级电容储能的分布式光伏发

电系统结构,阐述了其工作原理和稳定工作条件,在电压电流双环控制的基础上,采用分散的 MPPT 控制和调制比修正策略,提出了在光照等条件稳定或变化两种情况下超级电容单元和光伏单元的输出控制策略。

实验结果表明,设计的系统结构及其控制策略有效地实现了光伏逆变器稳定、高效并网的目标。超级电容储能单元既可以平抑有功功率波动,又可以通过输出无功功率来扩大光伏单元的输出电压调节范围,有利于系统的稳定运行和提高供电可靠性。

参考文献

- [1] 刘文亚,姚钢,何雯,等. 基于级联多电平有源滤波器直流侧电压平衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 94-101.
LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, et al. Research of DC voltage balance control based on multilevel cascaded APF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 94-101.
- [2] XIAO Bailu, HANG Lijun, MEI Jun, et al. Modular cascaded H-bridge multilevel PV inverter with distributed MPPT for grid-connected applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 51(2): 1722-1731.
- [3] 韩雅帅,徐永海,曹炜,等. 带储能系统的级联多电平逆变器的研究进展[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 25-31.
HAN Yashuai, XU Yonghai, CAO Wei, et al. Research progress on the applications of CMC with energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 25-31.
- [4] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.
- [5] 罗宇强,谭建成,董国庆. 级联式光伏电站直流并网拓扑及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 14-19.
LUO Yuqiang, TAN Jiancheng, DONG Guoqing. Topology of direct-current connecting cascaded photo-voltaic power station to power grid and its control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 14-19.
- [6] 王付胜,张德辉,戴之强,等. 级联 H 桥光伏并网逆变器混合调制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 137-145.
WANG Fusheng, ZHANG Dehui, DAI Zhiqiang, et al. A hybrid control scheme of cascaded H-bridge inverters for

- grid-connection photovoltaic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 137-145.
- [7] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [8] 韩洲, 任永峰, 胡宏彬, 等. 基于直流侧带储能单元的光储并网协调控制[J]. 电源技术, 2015, 139(8): 1739-1741.
HAN Zhou, REN Yongfeng, HU Hongbin, et al. Control of PV storage grid-connection based on DC side with energy storage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 139(8): 1739-1741.
- [9] CHAUARRIA J, BIEL D, GUINJOAN F, et al. Energy balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted PWMs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 98-111.
- [10] NEGRONI J, GUINJOAN F, MEZA C, et al. Energy-sampled data modeling of a cascade H-bridge multilevel converter for grid-connected PV systems[C] // 10th IEEE International Power Electronics Congress, October 16-18, 2006, Puebla, Mexico: 1-6.
- [11] KOURO S, WU BIN, VILLANUEVA E, et al. Control of a cascaded H-bridge multilevel converter for grid connection of photovoltaic systems[C] // 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal: 3976-3982.
- [12] 胡超, 张兴. 级联多电平光伏并网逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 17-19.
HU Chao, ZHANG Xing. Research on cascaded multilevel photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 17-19.
- [13] VILLANUEVA E, CORREA P, RODRIGUEZ J, et al. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4399-4406.
- [14] LIU Yushan, GE Baoming, ABU-RUB H, et al. An effective control method for quasi-Z-source cascade multilevel inverter-based grid-tie single-phase photovoltaic power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 399-407.
- [15] ZHAO Tiefu, WANG Gangyao, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.
- [16] 王书征, 赵剑锋, 姚晓君, 等. 级联型光伏并网逆变器在光照不均匀条件下的功率平衡控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 251-261.
WANG Shuzheng, ZHAO Jianfeng, YAO Xiaojun, et al. Power balanced controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under unequal irradiance conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 251-261.
- [17] 张承慧, 周江伟, 杜春水, 等. 单相级联多电平光伏并网逆变器控制策略综述[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 1-8.
ZHANG Chenghui, ZHOU Jiangwei, DU Chunshui, et al. Review of control strategies of single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1): 1-8.
- [18] 盛四清, 陈玉良. 基于功率预测的新型变步长电导增量法最大功率点跟踪策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 42-48.
SHENG Siqing, CHEN Yuliang. Maximum power point tracking strategy based on power prediction for a novel variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 42-48.
- [19] 刘飞, 邹云屏, 李辉. 基于重复控制的电压源型逆变器输出电流波形控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 58-63.
LIU Fei, ZOU Yunping, LI Hui. The repetitive control algorithm based current waveform correction for voltage source inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 58-63.
- [20] 卢闻州, 周克亮, 程明, 等. PWM 并网变换器多内模并联结构重复控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 39-47.
LU Wenzhou, ZHOU Keliang, CHENG Ming, et al. Parallel structure repetitive controller for PWM grid-connected converters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 39-47.

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-04-27

作者简介:

熊 兰(1978—), 女, 硕士生导师, 通信作者, 主要研究方向为多电平逆变器的控制; E-mail: xusbl@hotmail.com

桂 园(1992—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力电子技术、太阳能发电控制。E-mail: 793121336@qq.com

(编辑 许 威)