

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181317

级联多电平准Z源逆变器的无差拍并网控制策略

游云峰, 李媛, 方番, 杨翔宇

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 以单项级联准Z源逆变器为研究对象, 以提高动态响应速度和减小并网电流总谐波畸变率为研究目标, 提出一种总分式无差拍并网控制策略。首先, 针对级联型准Z源逆变器各模块输入功率有差异的特点, 定义模块功率比例因子并将其应用于模块功率控制, 实现各模块差异化功率分配和最大功率输出, 并实现各模块直流链电压平衡。其次, 建立并网电流与系统反馈状态量模型, 采用无差拍控制策略实现并网电流快速控制。最后, 通过建立仿真模型验证了所提算法的有效性和正确性。

关键词: 准Z源逆变器; 并网; 无差拍控制; 级联多电平

Deadbeat grid-connected control strategy of quasi-Z-source cascaded multilevel inverter

YOU Yunfeng, LI Yuan, FANG Fan, YANG Xiangyu

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to improve the dynamic response speed and reduce the total harmonic distortion of grid-connected current of the single-phase quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter (qZS-CMI), a total fraction deadbeat grid-connected control strategy is proposed. Firstly, for the difference of input power of each module of the cascaded quasi-Z source inverter, the module power scaling factor is defined and applied to the module power control to realize the module differentiated power distribution and maximum power output, and realize DC-link voltage balance of each module. Secondly, the grid-connected current and system feedback state quantity model is established, the deadbeat control strategy is used to realize the grid-connected current fast control. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed algorithm are verified by the simulation model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707126).

Key words: quasi-Z-source inverter; grid-connection; deadbeat control; cascade multilevel

0 引言

随着光伏系统在过去几十年的快速发展, 采用分布式发电方式入网的光伏系统更加普遍^[1-2]。为了保证电力系统的电能质量, 提高电力系统可靠性与稳定性, 增加电网效益, 需要更加安全、可靠、稳定、高效率的光伏系统。而级联H桥逆变器(Cascaded H Bridge Inverter, CHBI)由于其高可靠性、低谐波、畸变率小、易实现等优点, 在分布式发电系统中得到广泛应用^[3-4]。

准Z源逆变器(quasi-Z-Source Inverter, qZSI)是一种单级直流-交流(DC-AC)拓扑逆变器, 通过调制独特的直通占空比 D , 单级即可实现直流链电压的

抬升或下降^[5-7]。因其独特的升压机制, 即使桥臂误导通也不会出现短路而烧毁电路, 反而利用了单桥臂直通实现升压, 采用适当控制方法即可实现高可靠性的功率传输。将其与上述级联H桥逆变器结合可构成准Z源级联多电平逆变器^[8-9](quasi-Z-source Cascaded Multilevel Inverter, qZS-CMI)。qZS-CMI可实现由DC-DC变换器与级联H桥逆变器结合的两级式DC-AC逆变器功能, 即在输入电压大范围变化时保持直流链电压恒定, 从而降低开关应力裕量。且相比于传统两级式结构, qZS-CMI减少了开关使用数量和变流级数^[10-12]。

现有文献中qZSI的控制方法主要有比例积分(PD)控制、滑模控制、模糊控制以及模型预测控制等^[13-16]。对于CHBI模块功率平衡方法主要有多环控制^[17-18]、模型预测控制^[19-21]等。文献[12]采用PI

多环控制实现 qZS-CMI 电压电流控制, 其原理简单, 但需要整定多个 PI、PR 控制器参数, 整定难度较大, 系统复杂度较高。文献[21]给出了多电平模型预测控制法, 通过建立系统状态空间模型, 直接控制开关管动作, 控制效果依赖所建模型的精确度, 且随着电平数增加计算量大幅增加, 输出延时增加。

无差拍控制(Deadbeat Control, DBC)通过建立电路数学模型, 结合系统当前状态精确计算出下一拍的状态, 可加快系统响应速度, 具有计算量小、响应速度快、开关频率稳定等优点, 已被广泛应用于需要高动态性能的电力电子装置^[22]。本文针对 qZS-CMI 模块输出功率有差异的特点提出总分式无差拍控制, 实现模块间功率差异化分配及并网。首先, 定义模块功率比例因子并将其应用于模块功率控制, 实现模块差异化功率分配和最大功率输出与各模块直流链电压平衡。然后, 建立并网电流与系统反馈状态量模型, 采用无差拍控制策略实现并网电流快速控制。最后, 通过仿真模型验证其有效性。

1 qZS-CMI 模型

本文所研究的 qZS-CMI 拓扑结构如图 1 所示, 由 N 个准 Z 源 H 桥逆变模块(quasi-Z-Source H Bridge Inverter, qZS-HBI)组成, 每个模块由一个光伏阵列单独供电, 并通过准 Z 源模块将光伏阵列并入交流电网。

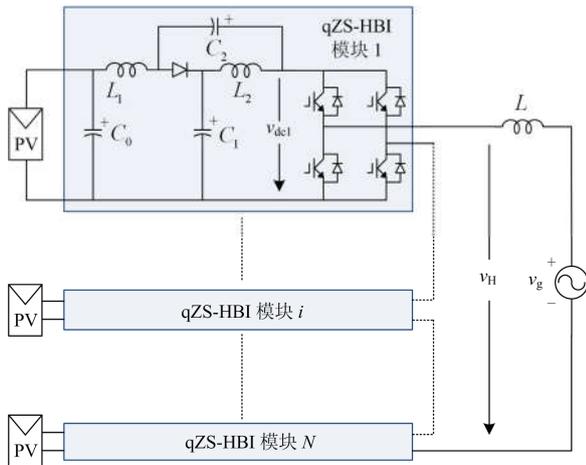


图 1 单相 qZS-CMI 拓扑结构

Fig. 1 Single phase qZS-CMI topology

1.1 单相 qZSI

qZS-HBI 分为直通状态和非直通状态两种运行状态, 通过改变直通状态的直通占空比 D , 实现直流链电压的控制, 并在非直通状态下进行 DC-AC 变

换。qZSI 的升压因子 B 可由一个开关周期内两种不同的工作状态得到, 根据文献[5]可推导出式(1)。

$$\begin{cases} V_{C1} = \frac{1-D}{1-2D} V_{in} \\ V_{C2} = \frac{1-D}{1-2D} V_{in} \\ V_{dc} = V_{C1} + V_{C2} = \frac{1}{1-2D} V_{in} = B V_{in} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{dc} 为 qZSI 在一个开关周期内的平均直流链电压; V_{C1} 和 V_{C2} 分别为 qZSI 电容 C_1 与 C_2 的电压值; V_{in} 为光伏阵列输出电压。

1.2 H 桥逆变电路模型

QZS-CMI 的输出电压 v_H 为单个模块的输出电压之和, 定义第 i 个模块的开关函数 S_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 为

$$S_i \in \{-1, 0, 1\}$$

总输出电压可推导如式(2)所示。

$$v_H = \sum_{i=1}^N v_{dci} \cdot S_i \quad (2)$$

式中, v_{dci} 为第 i 个模块直流链电压。

设每个模块调制比为 M_i , 第 i 个模块的输出电压 v_{oi} 和总输出电压 v_o 的推导公式如下。

$$\begin{cases} v_{oi} = v_{dci} M_i \sin(\omega t + \varphi) \\ v_o = \sum_{i=1}^N v_{oi} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为电网电压角频率; φ 为功率因数角, 因小功率发电系统一般不向电网送无功功率, 即 φ 为零。设交流电网电压和电流有效值分别为 V_g 和 I_g , 电网电压和电网电流瞬时值可表示为

$$\begin{cases} v_g = \sqrt{2} V_g \sin(\omega t) \\ i_g = \sqrt{2} I_g \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

设网侧滤波电感为 L , 网侧电阻为 R 。可得系统网侧等效模型如图 2 所示。

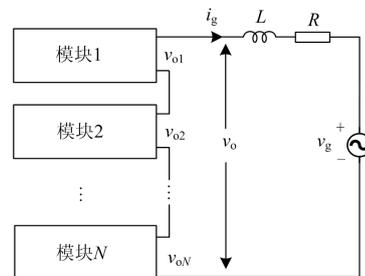


图 2 系统网侧等效模型

Fig. 2 System equivalent mode of grid side

由图2, 可将 qZS-CMI 网侧基尔霍夫电压平衡方程表示为

$$v_o = L \frac{di_g}{dt} + Ri_g + v_g \quad (5)$$

式中, v_g 、 i_g 分别为电网电压、电流瞬时值。

2 控制策略

为实现系统的模块级分布式最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制, 并且向电网稳定供电, 本文提出总分式无差拍控制策略。

2.1 MPPT 控制

对分布式小型光伏阵列分别采用 MPPT 控制, 可有效提高光能利用率。本文采用变步长扰动观察法, 选择适当的变化步长克服定步长扰动观察法在最大功率点来回扰动的缺点, 减小功率损耗。

将光伏阵列输出电流、输出电压送入 MPPT 控制器, 经运算可得输出电压幅值参考 v_{pv}^* , 将其与输出电压 v_{pv} 作差, 将得到的误差送入 PI 控制器, 可得单个准 Z 源模块直通占空比 D 。

2.2 总分式功率平衡控制

每个准 Z 源模块都采用一个独立控制器完成 MPPT 控制和直流链电压控制, 通过总控制器完成功率平衡控制与并网电流内环控制。

为求得系统功率守恒方程, 首先根据式(3)和式(5)可推出系统统一电压回路方程, 如式(6)所示。

$$\sum_{i=1}^N v_{dci} M_i \sin(\omega t) = L \frac{di_g}{dt} + Ri_g + v_g \quad (6)$$

准 Z 源网络直流链电压的变化反映了其输出功率的变化, 故可将 v_{dc} 与参考直流链电压 v_{dc}^* 作差并经 PI 控制器得到单个模块功率参考值 P_i^* 。忽略器件功率损耗, 稳态时输入与输出功率守恒, 可得方程如式(7)。

$$\sum_{i=1}^N P_i^* = \sum_{i=1}^N \frac{V_{dci} M_i I_g}{\sqrt{2}} = P_t^* = V_g I_g \quad (7)$$

因每个模块的输出功率不同, 为求出单个模块调制比 M_i , 实现模块差异化功率分配, 需定义模块功率比例因子 a_i , 用以描述每个模块输出功率占总输出功率的比例, 推导如式(8)。

$$a_i = \frac{P_i^*}{P_t^*} \quad (8)$$

根据总入网功率 P_t^* 、电网电压幅值 V_g 和电网电压相位 θ , 可得到并网电流参考值 i_g^* 为

$$i_g^* = \sqrt{2} \frac{P_t^*}{V_g} \sin(\omega t + \theta) \quad (9)$$

2.3 并网电流无差拍控制

DBC 通过电路状态方程与所求变量参考值预测下一个开关周期输出参考。对比于传统准 PR 控制具有响应速度快、暂态过程短、计算量小和易于实现等优点, 且能极大降低并网电流 THD。

为精确获得并网电流在 t_{k+1} 时刻参考值, 采用前向欧拉逼近公式, 如式(10)所示。

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{f(k+1) - f(k)}{T_s} \quad (10)$$

将式(5)离散如下。

$$i_g(k+1) = (1 - \frac{T_s R}{L}) i_g(k) + \frac{T_s}{L} v_o(k) - \frac{T_s}{L} v_g(k) \quad (11)$$

式中: $i_g(k)$ 为 t_k 时刻网侧电流采样值; $v_g(k)$ 为 t_k 时刻电网电压采样值; $i_g(k+1) = i_g^*(k)$ 为 t_{k+1} 时刻网侧电流期望值; $i_g^*(k)$ 为网侧电流参考值, 由式(9)给出。将其代入式(11)可得到逆变器输出电压预测值 $v_o^*(k)$, 如式(12)所示。

$$v_o^*(k) = v_g(k) + (R - \frac{L}{T_s}) i_g(k) + \frac{L}{T_s} i_g^*(k) \quad (12)$$

结合前文推导的输出电压预测值 $v_o^*(k)$ 、单个模块直流链电压 $v_{dci}(k)$ 和比例因子 $a_i(k)$, 可得各模块 t_k 时刻的调制信号 $m_i(k)$ 为

$$m_i(k) = \frac{a_i(k) v_o^*(k)}{v_{dci}(k)} \quad (13)$$

系统总控制框图如图3所示, 控制系统由分控

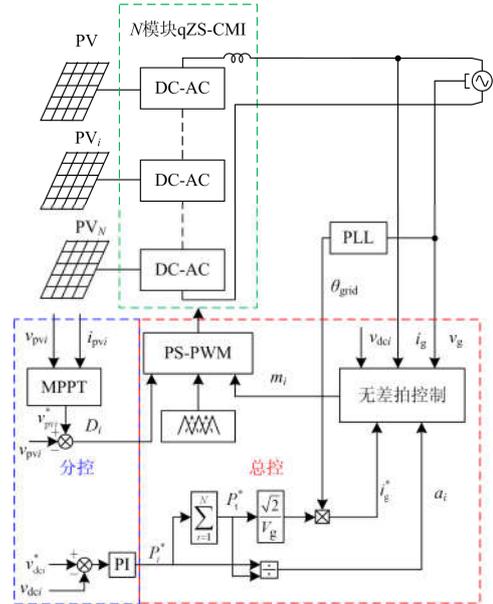


图3 系统总控制框图

Fig. 3 System total control strategy

制器、总控制器和载波移项 PWM(PS-PWM)调制器组成。分控制器通过输出直通信号 D_i 与功率参考信号 P_i^* , 实现各模块 MPPT 控制与直流链电压控制。总控制器通过输出调制信号 m_i 实现交流侧电流无差拍控制与功率平衡控制。载波移项 PWM 调制器将 D_i 与 m_i 耦合, 输出开关管驱动信号控制逆变器工作。

3 仿真

为了验证无差拍控制方法较传统 PR 控制方法^[10]的效果, 在 Matlab/Simulink 平台搭建了三模块 7 电平单相 qZS-CMI 并网系统仿真模型。采用相同仿真参数对比传统 PR 控制和无差拍控制两种不同控制算法, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

电路参数	数值
准 Z 源网络电感 L_1 、 $L_2/\mu\text{H}$	2 000
准 Z 源网络电容 C_1 、 $C_2/\mu\text{F}$	8 000
并网电压 v_g/V	150
滤波电感 $L/\mu\text{H}$	4 000
输入电容 $C_0/\mu\text{F}$	1 000
输入电压 v_{pv}/V	65~75

3.1 稳态阶段仿真

仿真系统使用理想电源串联电阻替代光伏阵列, 图 4 为稳态时逆变器交流输出电压七电平 PWM 波。

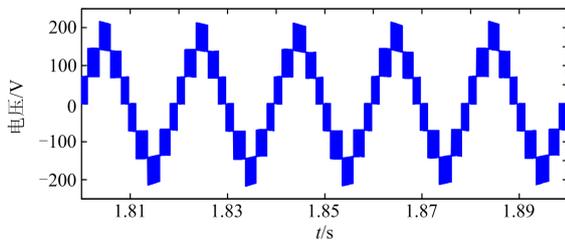


图 4 输出电压

Fig. 4 Output voltage

将三个模块输入电压分别设置为 75 V、70 V、65 V 进行模块输入功率不均衡仿真。图 5 为三个模块输入功率不均衡时输入功率 P_i 与比例因子 a_i 。可见当各模块输入功率不均衡时, 通过所提控制算法可以差异化分配各模块功率, 平衡系统输入与输出功率。

图 6 为当三个模块输入功率不均时, 每个模块直流链电压 v_{dci} 的波形。通过所提控制算法, 当各模块输入功率分别为 350 W、305 W 和 255 W 时, 可有效平衡三模块直流链电压, 将其均控制在 70 V。

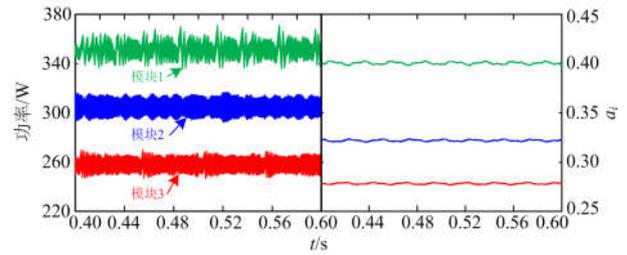


图 5 模块输入功率与比例因子

Fig. 5 Output power of module and a_i

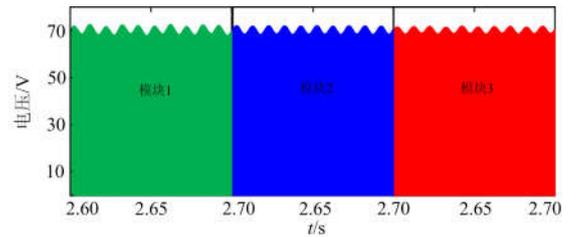


图 6 直流链电压

Fig. 6 Voltage of DC-link

3.2 MPPT 与阶跃仿真

仿真开始 1 s 后, 采用扰动观察法对每个模块进行 MPPT 控制, 1.2 s 后追踪到最大功率点, 如图 7 所示。

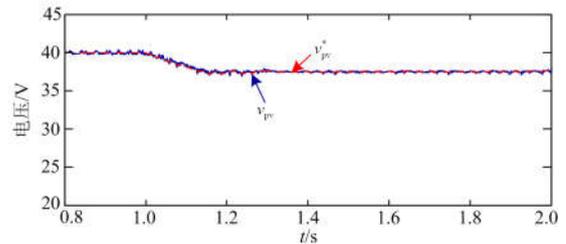
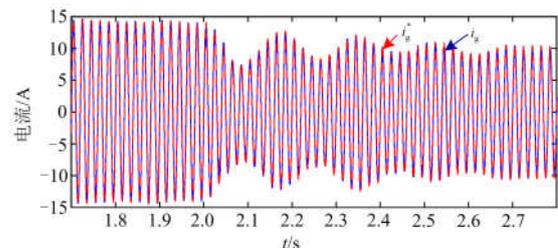


图 7 光伏阵列输入电压

Fig. 7 Input voltage of PV array

为模拟光伏阵列输出功率下降, 在仿真中设定三个模块的电源输入电压均由 75 V 阶跃至 65 V。图 8(a)为传统 PR 控制网侧电流动态响应, 图 8(b)为无差拍控制网侧电流动态响应。由仿真结果可见, 采用无差拍并网控制后其并网电流阶跃动态响应明显优于前者。



(a) 传统PR控制

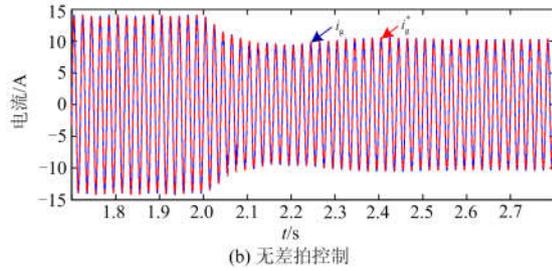


图 8 输出电流阶跃响应

Fig. 8 Output current step response

图 9(a)、图 9(b)分别为使用传统控制算法与使用无差拍控制算法的稳态并网电流 FFT 分析,其 THD 值分别为 1.76%与 0.65%。可见,采用无差拍控制算法,其 THD 相比于前者减小了 1.11%,并满足 IEEE 规定的分布式电源接入电网的并网要求。

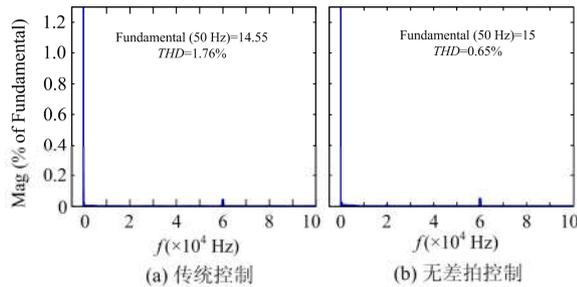


图 9 输出电流 THD

Fig. 9 Output current THD

4 结论

针对分布式光伏并网的最优控制,本文提出了一种有效的并网电流无差拍控制算法,并采用总分式功率平衡策略,在实现 $qZS-CMI$ 模块级 MPPT 控制的同时,实现了各模块功率差异化分配与直流链电压平衡,在提高系统响应速度的同时极大地降低了并网电流 THD 。通过仿真模型验证了采用无差拍控制算法进行并网电流内环控制的有效性。

参考文献

[1] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 90-97.
LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 90-97.

[2] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56.
SU Jian, ZHOU Limei, LI Rui. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation[J].

Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 50-56.

[3] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.

[4] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 新型多端输入光伏并网系统运行控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 43-48.
JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Operation control strategy of novel multi-input grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 43-48.

[5] 杨峰峰, 杨旭红. 基于 LCL 滤波有源阻尼控制的 Z 源逆变器并网研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 38-45.
YANG Fengfeng, YANG Xuhong. Research on Z-source inverter grid-connected system based on LCL filter of active damping control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 38-45.

[6] 漆万碧, 李媛, 方番, 等. 基于储能型准 Z 源逆变器的 VSG 并网控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 124-133.
QI Wanbi, LI Yuan, FANG Fan, et al. Research on VSG grid-controlled strategy based on energy-stored quasi-Z-source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 124-133.

[7] 彭方正, 房绪鹏, 顾斌, 等. Z 源变换器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 47-51.
PENG Fangzheng, FANG Xupeng, GU Bin, et al. Z-source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 47-51.

[8] SUN D, GE B, YAN X, et al. Modeling, impedance design, and efficiency analysis of quasi-Z source module in cascaded multilevel photovoltaic power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6108-6117.

[9] CARRARA G, GARDELLA S, MARCHESONI M, et al. A new multilevel PWM method: a theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 497-505.

[10] MCGRATH B P, HOLMES D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.

[11] SUN D, GE B, PENG F Z, et al. A new grid-connected PV system based on cascaded H-bridge quasi-Z source inverter[C] // 2012 IEEE International Symposium on

- Industrial Electronics, 2012, Hangzhou, China: 951-956.
- [12] 张芮, 李媛. 考虑模块功率差异的准 Z 源级联多电平逆变器系统参数设计与并网控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 48(16): 4836-4845.
ZHANG Rui, LI Yuan. System parameter design and grid-connected control methods for quasi-Z-source cascaded multilevel inverter considering power difference of modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 48(16): 4836-4845.
- [13] 丁新平, 钱照明, 崔彬, 等. 基于模糊 PID 的 Z 源逆变器直流链升压电路控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 31-38.
DING Xinping, QIAN Zhaoming, CUI Bin, et al. Fuzzy PID controller for DC-link boost voltage in Z-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 31-38.
- [14] 陈宗祥, 蒋赢, 潘俊民, 等. 基于滑模控制的 Z 源逆变器在单相光伏系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 33-39.
CHEN Zongxiang, JIANG Ying, PAN Junmin, et al. A Z-source inverter for a single-phase PV system based on sliding-mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 33-39.
- [15] 李媛, 彭方正. Z 源/准 Z 源逆变器在光伏并网系统中的电容电压恒压控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 62-69.
LI Yuan, PENG Fangzheng. Constant capacitor voltage control strategy for Z-source/quasi-Z-source inverter in grid-connected photovoltaic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 62-69.
- [16] 熊兰, 桂园, 柳慧梅, 等. 带超级电容的级联型光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 108-114.
XIONG Lan, GUI Yuan, LIU Huimei, et al. Control strategy of a cascaded inverter for grid-connected photovoltaic system with supercapacitor[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 108-114.
- [17] 王志冰, 于坤山, 周孝信. H 桥级联多电平变流器的直流母线电压平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 56-63.
WANG Zhibing, YU Kunshan, ZHOU Xiaoxin. Control strategy for DC bus voltage balance in cascaded H-bridge multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 56-63.
- [18] 陈仲, 许亚明, 那显龙, 等. 级联型多电平逆变器输出电压循环分配的功率均衡控制及优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1132-1142, 1291.
CHEN Zhong, XU Yaming, NA Xianlong, et al. Power balance control and optimization methods with output voltage rotation for cascaded multilevel inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1132-1142, 1291.
- [19] 梅杨, 李晓晴, 黄伟超. 级联式双向 DC-DC 变换器的模型预测控制[J]. 电气工程学报, 2017, 12(3): 10-15.
MEI Yang, LI Xiaoqing, HUANG Weichao. Model predictive control method for cascaded bi-directional DC-DC converter[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(3): 10-15.
- [20] 韩金刚, 李超, 杨腾飞, 等. 级联多电平并网逆变器简化模型预测控制研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(7): 28-31.
HAN Jingang, LI Chao, YANG Tengfei, et al. Research on simplified model predictive control of a grid-connected multilevel cascaded inverter[J]. Power Electronics, 2016, 50(7): 28-31.
- [21] 何志兴, 罗安, 熊桥坡, 等. 模块化多电平变换器模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1366-1375.
HE Zhixing, LUO An, XIONG Qiaopo, et al. Model predictive control of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1366-1375.
- [22] 荣飞, 龚喜长, 黄守道, 等. 模块化多电平换流器的无差拍控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1753-1764.
RONG Fei, GONG Xichang, HUANG Shoudao, et al. The deadbeat control strategy of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1753-1764.

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2019-03-26

作者简介:

游云峰(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电技术、电力系统电力电子技术; E-mail: 415294413@qq.com

李媛(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源发电技术、分布式电源接入、电力系统电力电子技术。

(编辑 许威)