

Output Capacitor Voltage Balance Control Method of Three-Level Boost DC-DC Converter Using Fuzzy Controller

Lu Huang¹, Yu Fang², Songyin Cao²

¹Yangzhou Haitong Electronic Technology Co. Ltd., Yangzhou Jiangsu

²College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Email: hlyzht@163.com, yfang@yzu.edu.cn, sycao@yzu.edu.cn

Received: Aug. 27th, 2019; accepted: Sep. 9th, 2019; published: Sep. 16th, 2019

Abstract

Aiming at the neutral-point (NP) imbalance and the influence of the modulation strategy of the post-stage inverters on the neutral-point potential when the three-level Boost DC converter is used in the three-phase non-isolated grid-connected PV power generation inverters to start the voltage-building process, a fuzzy control strategy is proposed to realize the neutral-point potential balance at the power level of the three-level Boost DC converter. The duty cycle ratio of the switch of three-level Boost DC converter can be adaptively changed by using the fuzzy controller. Not only in the start-up process (when the DC bus is voltage-building), but also in the stable operation of grid-connected inverters, the voltages across output capacitors can be equalized and good dynamic and static performance is obtained. In this paper, a fuzzy controller is designed for three-level Boost DC converter, and the control rules are given. Finally, the feasibility and reliability of the method are verified by simulation and experiment.

Keywords

Three-Level Boost Converter, Neutral-Point Potential Balance, Fuzzy Control

基于模糊控制三电平Boost直流变换器输出电容均压方法

黄鹭¹, 方宇², 曹松银²

¹扬州海通电子科技有限公司, 江苏 扬州

²扬州大学信息工程学院, 江苏 扬州

Email: hlyzht@163.com, yfang@yzu.edu.cn, sycao@yzu.edu.cn

收稿日期：2019年8月27日；录用日期：2019年9月9日；发布日期：2019年9月16日

摘要

本文针对应用于三相非隔离光伏并网发电逆变器中三电平Boost直流变换器启动建压过程时，可能出现的中点(Neutral-Point, NP)电位不平衡问题和后级逆变电路调制策略对中点电位的影响，在三电平Boost直流变换器功率级提出了一种实现中点电位平衡的模糊控制策略。采用模糊控制器可自适应地改变三电平Boost直流变换器开关管的占空比大小，不仅在启动过程中(直流母线建压时)，而且在并网逆变器稳定工作时，都能实现直流侧输出电容的均压，并获得良好的动态和静态性能。论文中为三电平Boost直流变换器设计了模糊控制器，给出了控制规则。最后通过仿真和实验验证了该方法的可行性和可靠性。

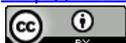
关键词

三电平Boost直流变换器，中点电位平衡，模糊控制

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在两级式三相非隔离光伏并网逆变系统中，通常采用三电平 Boost 直流变换器作为前级升压电路，并实现 PV 电池的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。在三电平 Boost 直流变换器中，直流输出侧两电容电压需保持平衡，即实现中点电位平衡，以提高系统的可靠性和入网电流质量。

文献[1] [2] [3] [4]通过改进逆变器调制策略和相应的控制方法以实现中点电位平衡。但在三电平 Boost 直流变换器启动过程中直流母线建压时，后级逆变电路还没有工作，故无法通过文献[1] [2] [3] [4]中的方法解决启动过程中出现的中点电位不平衡问题。文献[5] [6]通过检测三电平 Boost 直流变换器输出两电容的电压偏差值和变化，并采用 PI 调节器来调节三电平 Boost 直流变换器中两个主开关管的占空比的大小，从而实现了中点电位平衡，但是由于实际电路中存在大量的寄生参数，以及电容参数不对称和功率突变等因素，从而导致 PI 调节器的参数难以整定，且一组调整好的 PI 参数难以适应功率突变情况。

为此，本文针对三相非隔离光伏并网逆变器的前级三电平 Boost 电路，研究了一种实现其输出电容中点电位平衡的模糊控制算法，这种方法是根据三电平 Boost 电路的直流输出侧两电容均压程度来智能调节占空比大小，以实现两电容的均压控制，从而确保三相并网逆变器在启动和稳态运行时直流母线电容电压的平衡，系统具有良好的静、动态性能。该模糊控制方法无需额外的硬件开销，只需软件编程实现。

2. 中点电位不平衡原因分析

三电平 Boost 直流变换器在三相非隔离型光伏并网逆变系统中的应用如图 1 所示。为了减小系统中共模漏电流的大小，通常对前级 Boost 直流变换器中的两只开关管采用同步调制策略，对后级逆变器则采用改进型的空间矢量调制策略[7] [8]。

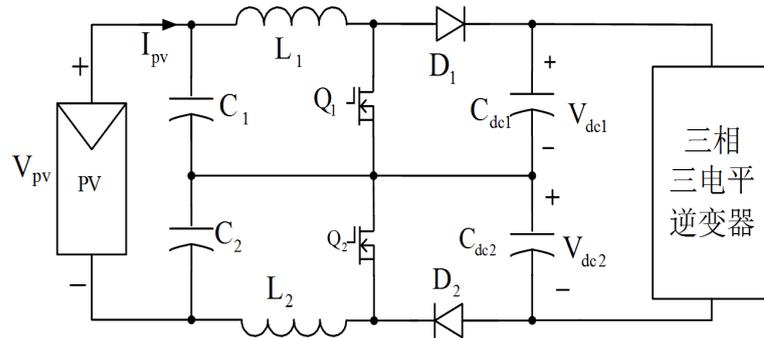


Figure 1. Three-phase non-isolated photovoltaic grid-connected inverter system
图 1. 三相非隔离光伏并网逆变器系统

如图 1 所示，开关管 Q_1 、 Q_2 采用同步调制方式，即同时导通和关断。但是，由于开关管本身参数、驱动延时等因素不一致的影响，开关管 Q_1 、 Q_2 的导通时间并不完全相等。一个开关周期后，Boost 直流变换器输出侧两电容 C_{dc1} 、 C_{dc2} 会产生电压差，引起中点电位不平衡。另外，由于后级逆变电路采用改进型的空间矢量调制策略，在减小共模漏电流的同时，并不能兼顾中点电位的平衡。

中点电位的偏移会使 Boost 直流变换器和逆变器中的开关管都承受不平衡的电压，因而会降低器件的寿命，同时中点电位的波动会使逆变输出的波形出现低次谐波，从而降低了电能的质量，严重时 will 影响系统并网发电的正常运行

3. 模糊控制器的原理及设计

3.1. 模糊控制器的原理

本文研究的模糊控制方法，其系统结构框图如 2 所示。三电平 Boost 直流变换器中，若开关管 Q_1 的占空比 d_1 大于开关管 Q_2 的占空比 d_2 ，则 $V_{dc1} < V_{dc2}$ ；若 Q_1 的占空比 d_1 小于 Q_2 的占空比 d_2 ，则 $V_{dc1} > V_{dc2}$ ；

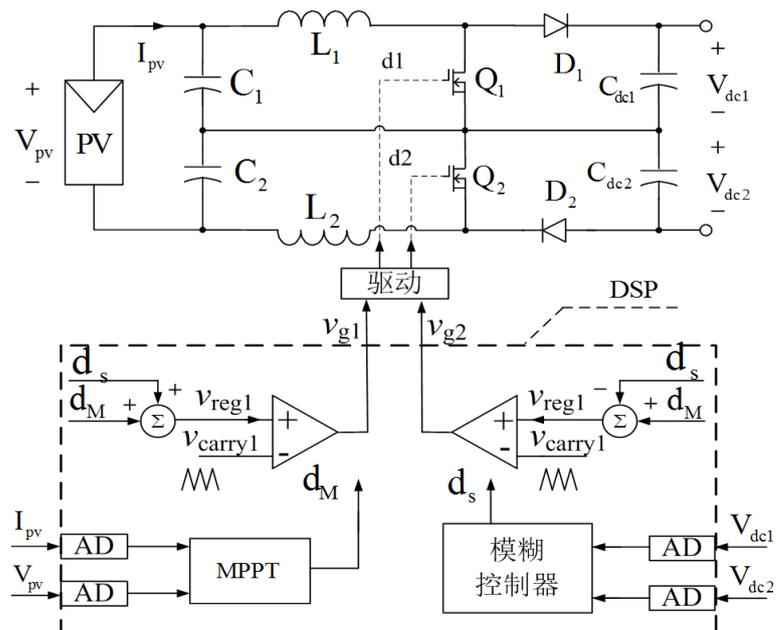


Figure 2. The system schematic diagram based on fuzzy controller
图 2. 基于模糊控制器的系统构成框图

因此, 可对这两个开关管的占空比 d_1 和 d_2 进行调节, 以实现三电平 Boost 直流变换器直流输出电容电压的平衡。

d_1 与 d_2 的形成如图 2 所示, 模糊控制器输出 d_s , MPPT 控制器输出 d_M 。将 d_M 和 d_s 分别相加减得到调制波信号 v_{reg1} 和 v_{reg2} , v_{reg1} 和 v_{reg2} 分别与载波信号 v_{carry1} 和 v_{carry2} 进行比较(v_{carry1} 和 v_{carry2} 具有相同的周期和相位), 得到 PWM 脉冲控制信号 v_{g1} 和 v_{g2} , 再经驱动电路控制开关管 Q_1 和 Q_2 的导通与关断。基于这种模糊控制器的控制系统能在跟踪光伏组件最大功率点的同时, 实现直流输出两电容的均压控制。

图 2 中模糊控制器的具体逻辑结构如图 3 所示。e, Δe 分别是电容电压误差及误差变化量, 量化后得到 e' , $\Delta e'$, 再经模糊化得 E, ΔE , 则 E, ΔE 分别是 e' , $\Delta e'$ 的模糊子集, D_s 是经模糊推理后的输出模糊量, 经解模糊化后得 d_s' , 最后经比例因子得精确控制量 d_s 。

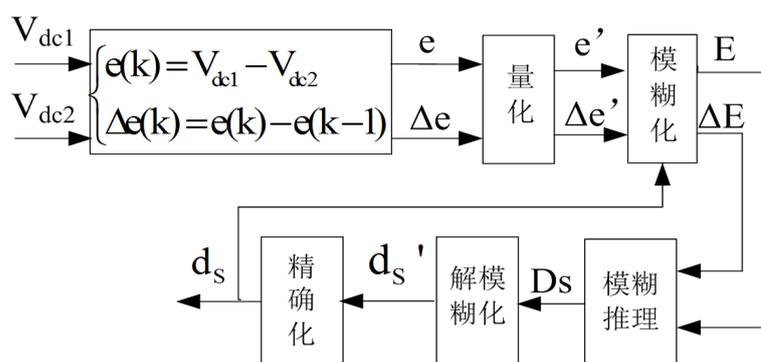


Figure 3. The logic structure of fuzzy controller
图 3. 模糊控制器逻辑结构

3.2. 精确量的确定及量化

1) e 区间的确定和量化

假设在中点电位平衡时, 偏差 e 的最大值为 5 V, 从而选取精确值 e 的区间为 $[-5, +5]$, 量化值 e' 的区间为 $[-6, +6]$, 则偏差 e 的量化表如表 1, 量化因子 $K_e = 6/5 = 1.12$ 。

Table 1. The quantization table of e

表 1. e 的量化表

精确值 e	0	± 0.83	± 1.67	± 2.5	± 3.33	± 4.17	± 5
量化值 e'	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6

2) Δe 区间的确定和量化

取 $(\Delta e)_{\max} = 1V$, 从而选取精确值 Δe 的区间为 $[-1, +1]$, 量化值 $\Delta e'$ 的区间为 $[-4, +4]$, 则偏差 Δe 的量化表如表 2, 量化因子 $K_{ec} = 4/1 = 4$ 。

Table 2. The quantization table of Δe

表 2. Δe 的量化表

精确值 Δe	0	± 0.25	± 0.5	± 0.75	± 1
量化值 $\Delta e'$	0	± 1	± 2	± 3	± 4

3) d_s 区间的确定和量化

取精确值 d_s 的区间为 $[-0.3, +0.3]$ ，量化值 d'_s 的区间为 $[-6, +6]$ ，则输出量 d_s 的量化表如表 3，比例因子 $K_u = 0.3/6 = 0.05$ 。

Table 3. The quantization table of d_s

表 3. d_s 的量化表

精确值 d_s	0	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.25	± 0.3
量化值 d'_s	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6

3.3. 偏差、偏差变化率和输出量的模糊化

1) 偏差 e 的模糊化

区间 $[-6, +6]$ 分为 7 档，分别对应 7 个模糊子集： $\{PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB\}$ ，且各模糊子集的隶属度函数为常用的三角形和梯形，则 e 的隶属度函数如图 4 所示。

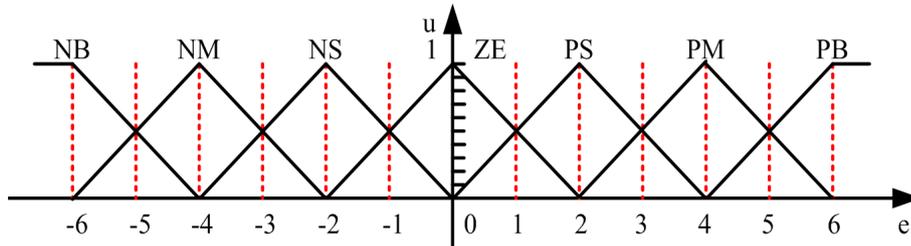


Figure 4. The membership function of e

图 4. e 的隶属度函数

2) 偏差变化率 Δe 的模糊化

区间 $[-4, +4]$ 分为 5 档，分别对应 5 个模糊子集： $\{PB, PS, Z, NS, NB\}$ ，且各模糊子集的隶属度函数为常用的三角形和梯形，则偏差 Δe 的隶属度函数如图 5 所示。

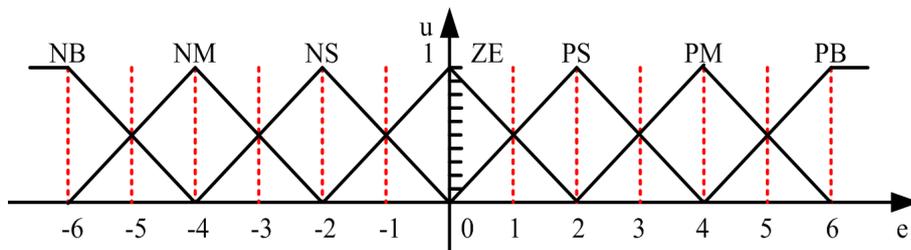


Figure 5. The membership function of Δe

图 5. 偏差 Δe 的隶属度函数

3) 输出量 d_s 的模糊化

由于输出量 d_s 和偏差 e 为比例控制，选取输出量 d_s 的隶属度函数和模糊化表与偏差 e 的隶属度函数相同，如图 4 所示。

3.4. 模糊控制规则的确定

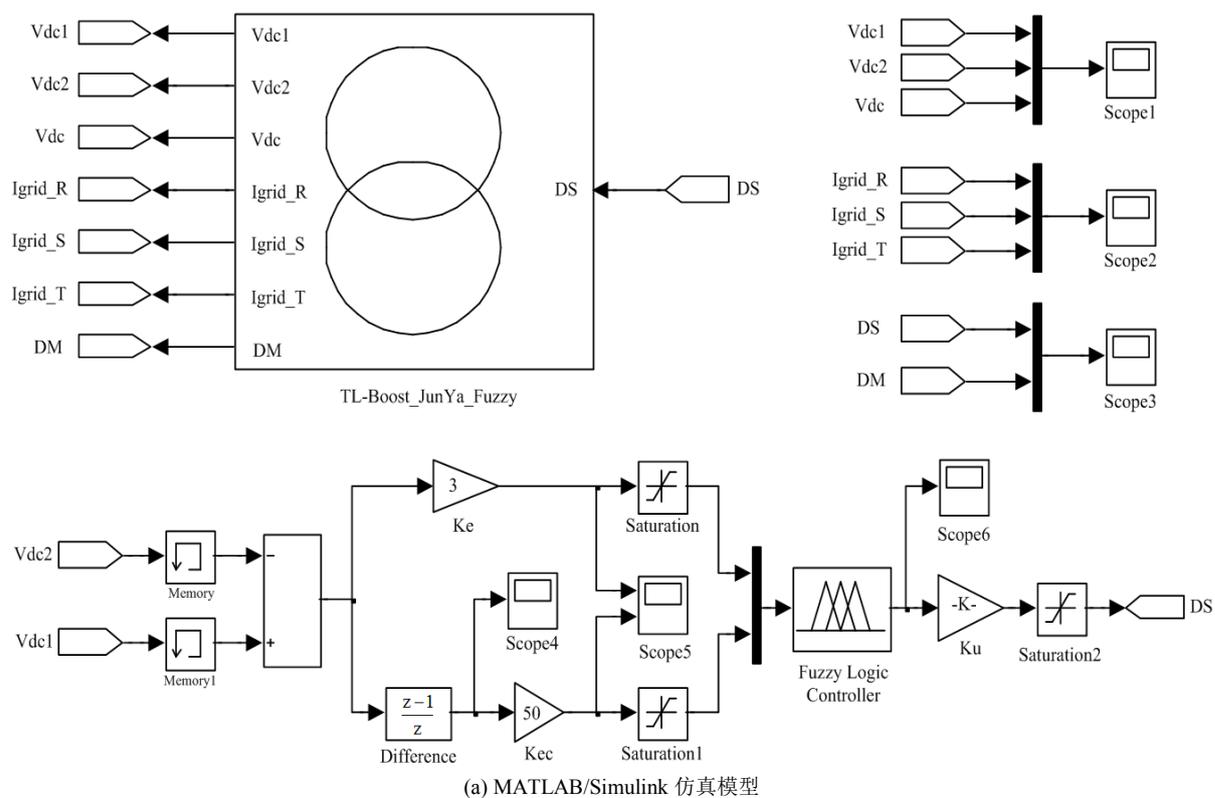
采取“if e and Δe then d_s ”的模糊控制规则，模糊控制规则如表 4 所示。

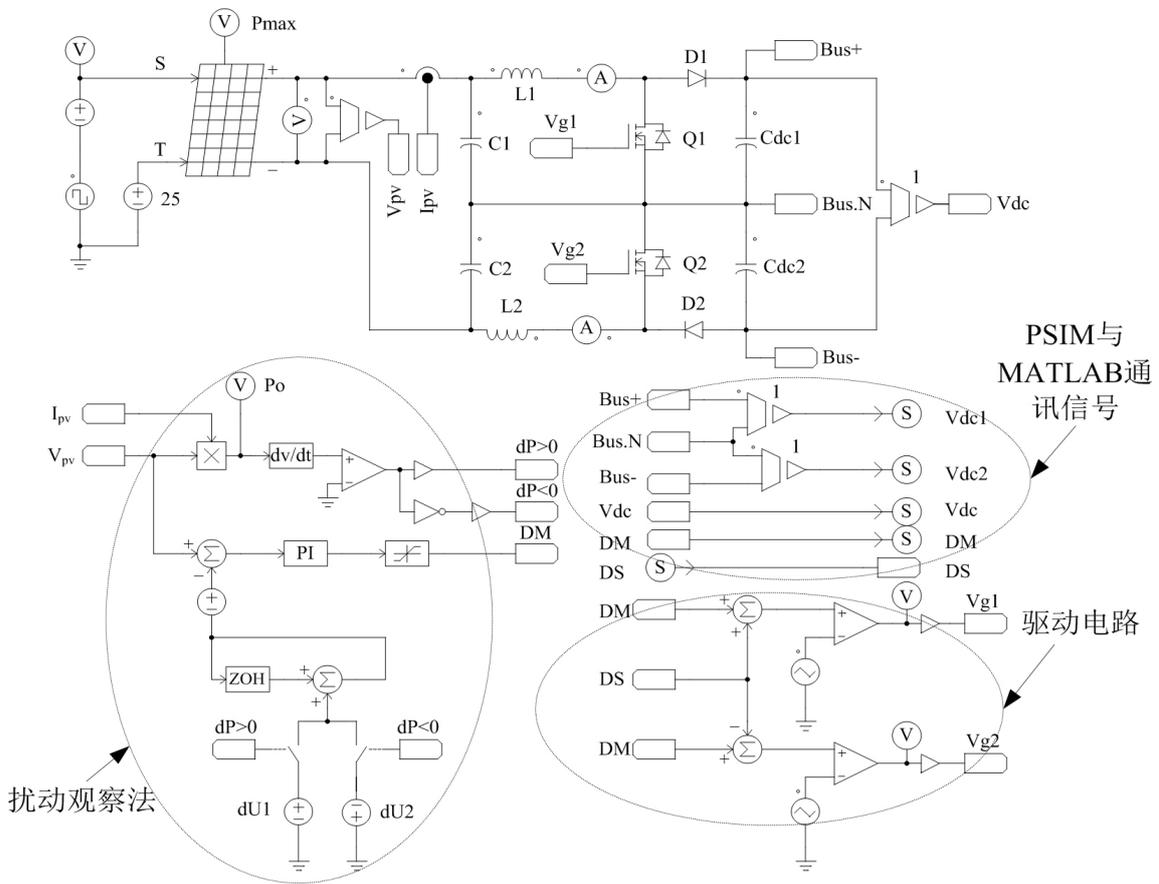
Table 4. The fuzzy control rules table
表 4. 模糊控制规则

	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NM
PS	PB	PB	PM	PS	ZE	NM	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
NS	PM	PM	ZE	NS	NM	NB	NB
NB	PM	ZE	NS	NM	NB	NB	NB

4. 仿真和实验结果

本文通过 PSIM 和 MATLAB/Simulink 建立了联合仿真模型,如图 6 所示,图 6(a)是 Matlab/Simulink 模型,用以实现模糊控制策略的仿真,图 6(b)采用 Psim 搭建了三电平 Boost 功率电路,用以实现应用于光伏发电前级电路升压的仿真。并制作了由两个 8.5 KW 的三电平 Boost 功率电路实验样机,并应用在 17kW 两级式非隔离三相并网发电装置中,作为前级 MPPT 控制器如图 7 所示: PV 输入最大功率跟踪电压范围是 430~600 V, Boost 直流变换器输出电压 650 V, 开关频率 f_s 为 40 kHz, 直流输入薄膜电容 $C_1 = C_2 = 100 \mu\text{F}$, 直流输出薄膜电容 $C_{dc1} = C_{dc2} = 400 \mu\text{F}$, $L_1 = L_2 = 0.9 \text{ mH}$, 开关管选用 Vincotech 公司的 FZ06NBA045FH (45 A/600 V), 后级逆变器采用改进型空间矢量调制策略以抑制共模漏电流, 数字控制芯片选用 TI 公司的 DSP, 型号为 TMS320F28335。





(b) PSIM 中 Boost 电路仿真模型

Figure 6. Simulation model of fuzzy control
图 6. 模糊控制仿真模型

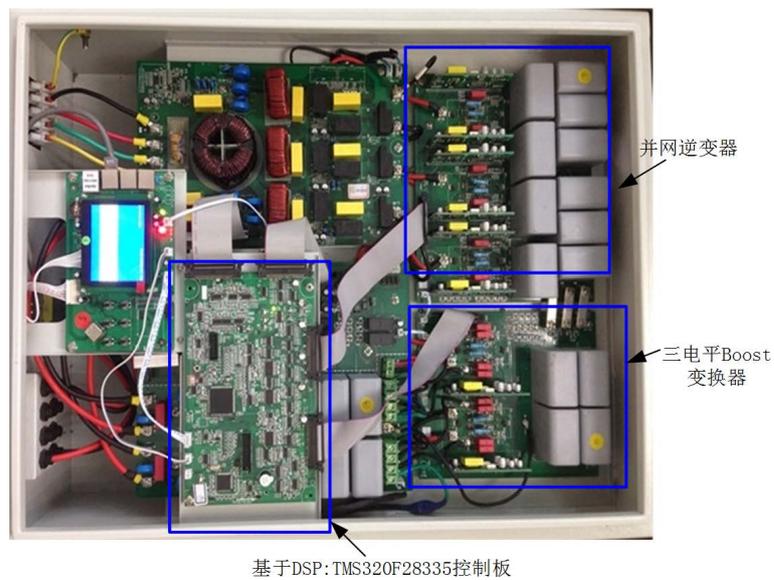


Figure 7. 17 kW two-stage non-isolated three-phase grid-connected prototype based on three-level Boost converter
图 7. 基于三电平 Boost 变换器的 17 kW 两级式非隔离三相并网发电装置样机

图 8 和图 9 分别对应初始电压相同和不同的仿真结果, V_{dc1} 和 V_{dc2} 分别为三电平 Boost 直流输出端电容 C_{d1} 和 C_{d2} 上的电压, 可见无论输出两电容上初始电压相同还是不同, 通过文中提出的模糊控制方法均能实现均压。仿真在 0.07 秒时分别突加负载(由 850 W 到 8.5 kW)和突减负载(由 8.5 kW 到 850 W), 电容上电压 V_{dc1} 和 V_{dc2} 的仿真波形如图 10 和图 11, 可见采用文中的模糊均压控制方法实现了三电平 Boost 电路输出两电容的动态均压。图 12 和图 13 分别为未加入和加入模糊控制器时的缓启动实验波形, 图 14 是加入模糊控制器时的稳态运行实验波形, 图 12、图 13 和图 14 中的通道 1 和通道 2 分别对应三电平 Boost 电路输出侧上、下电容的电压波形, 通道 4 是三电平 Boost 电路的后级并网逆变器的并网电流 i_a 波形。

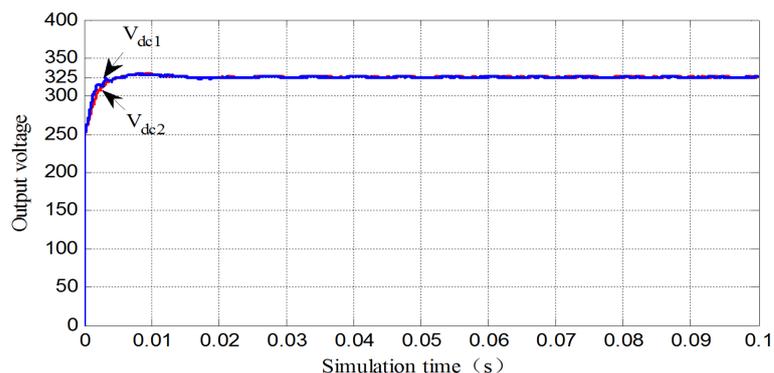


Figure 8. Simulation waveforms with the same initial voltages across capacitors

图 8. 初始电压相同时仿真图

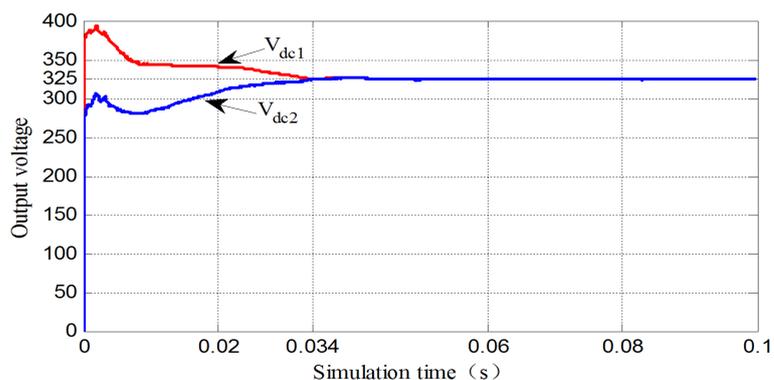


Figure 9. Simulation waveforms with different initial voltages across capacitors

图 9. 初始电压不同时的仿真图

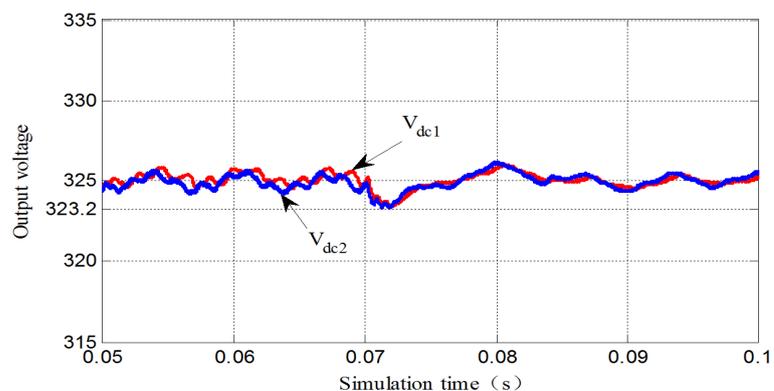


Figure 10. Simulation waveforms when suddenly increasing load

图 10. 负载突加时的仿真图

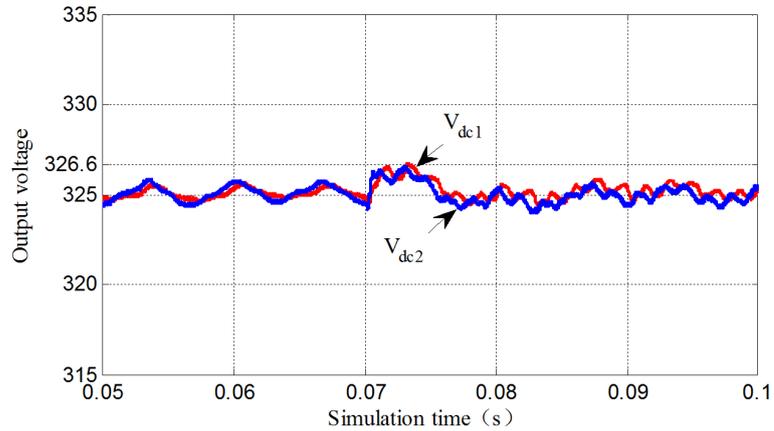


Figure 11. Simulation waveforms when sudden decreasing load
图 11. 负载突减时的仿真图

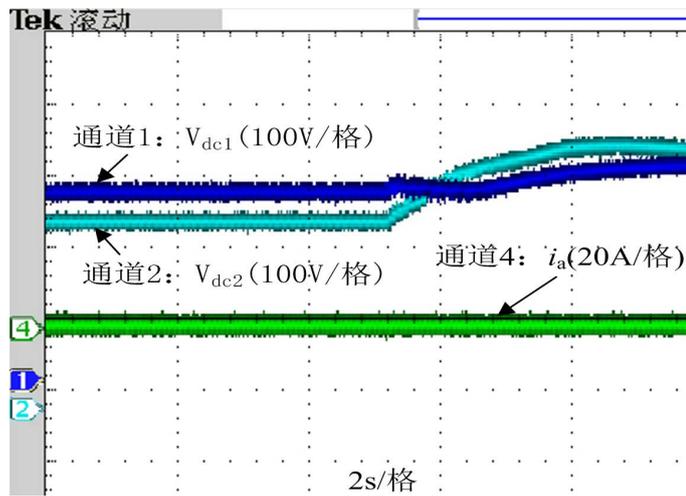


Figure 12. Experimental waveforms of soft start without fuzzy controller
图 12. 未加入模糊控制器的缓启动实验波形

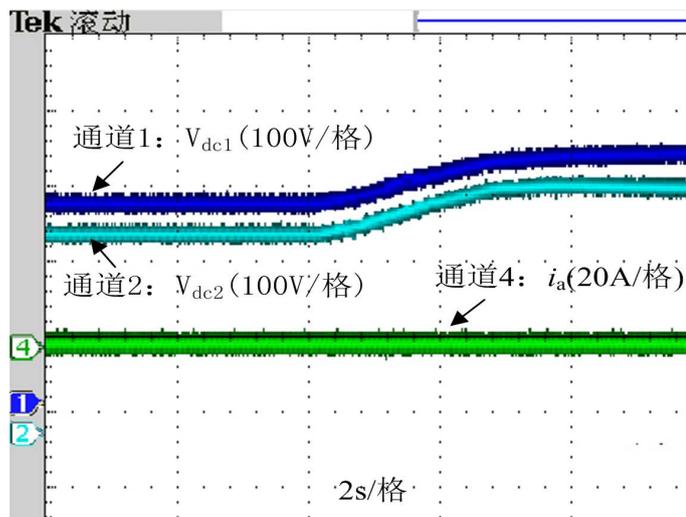


Figure 13. Experimental waveforms of soft start with fuzzy controller
图 13. 加入模糊控制器的缓启动实验波形

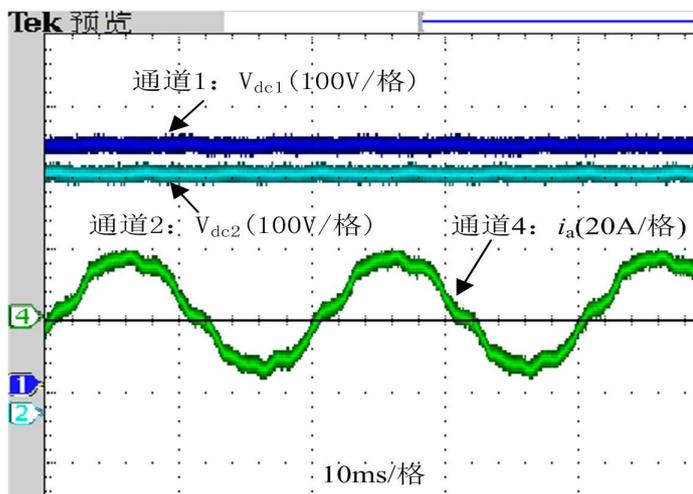


Figure 14. Experimental waveforms in steady state with fuzzy controller
图 14. 加入模糊控制器稳态时的实验波形

仿真和实验结果表明：采用本文设计的模糊控制器，无论是在动态运行，还是在静态运行状态下，都能实现三电平 Boost 直流变换器直流输出两电容电压的平衡，从而确保了网侧的电能质量和变换器的可靠运行。

5. 结论

本文提出的三电平 Boost 直流变换器输出电容均压模糊控制方法，应用在三相三电平非隔离并网发电系统中，解决了启动过程中直流母线建压时输出中点电位不易平衡的问题，同时还可抑制来自后级逆变器对中点电位的影响。仿真和实验结果表明该模糊控制器能根据直流输出侧两电容的均压程度，自动调节两开关管占空比的大小，最终实现输出电容电压的平衡。基于三电平 Boost 直流变换器输出电容均压模糊控制方法构成的三相并网发电装置将应用在光储充电站中，以实现电动汽车应用的节能减排，可促进智能电网的建设。

基金项目

国家自然科学基金(61873346)；国家电网扬州供电公司互联网研究院基金(SGTYHT/17-JS-202)；扬州大学江都高端装备工程技术研究院开放课题基金(YDJD201902)。

参考文献

- [1] 臧壮, 潘朝峰, 陈宁, 邱广庭. 游艇燃料电池混合动力系统的模糊逻辑控制策略研究[J]. 船舶, 2017, 28(2): 65-70.
- [2] 苗敬利, 郑大伟, 周重霞. 基于新型趋近律的永磁同步电机模糊滑模控制[J]. 电气传动, 2019, 49(3): 3-7.
- [3] 郑玉强, 张航星, 任文, 涛张潮, 李涛. 基于 Simulink 的主动悬架模糊控制策略分析[J]. 机械工程与自动化, 2019(2): 89-91.
- [4] 高夏翔, 张艳兵, 王水. 试件轴角位置跟踪控制技术的改进及仿真[J]. 电气传动, 2019, 49(3): 83-86.
- [5] Yaramasu, V. and Wu, B. (2011) Three-Level Boost Converter Based Medium Voltage Megawatt PMSG Wind Energy Conversion Systems. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix, 17-22 September 2011, 561-567. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6063819>
- [6] Xia, C.L., Gu, X., Shi, T.N. and Yan, Y. (2010) Neutral-Point Potential Balancing of Three-Level Inverters in Di-

rect-Driven Wind Energy Conversion System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **26**, 18-27.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2060487>

- [7] 张勤进, 刘彦呈, 王川. NPC 光伏并网逆变器共模电流抑制方法研究[J]. 电机与控制, 2013, 17(8): 15-21.
- [8] 童鸣庭, 苏建徽, 徐宏. 三电平中点电钳流位逆变器共模电压和电流抑制算法[J]. 低压电器, 2013(16): 32-37.