园区微电网充电桩类负荷前级PFC电路的控制策略研究

管益涛[1]，郭赵君[2]，王雨奇[1]，沈家祥[3]

（1. 国网江苏省电力有限公司丹阳供电分公司，江苏 镇江 212310；2. 国网江苏省电力有限公司扬中供电分公司，江苏 镇江 212299；3. 江苏振光电力设备制造有限公司，江苏 镇江 212121）

摘要：随着我国新能源电动汽车行业的发展，园区微电网系统中充电桩类负荷快速增长，高品质充电桩前级 PFC 电路拓扑和控制受到广泛关注。针对直流充电桩前级 VIENNA 型整流器的高效控制和中性点电压的不平衡问题展开研究，设计了基于 *dq* 坐标系的电流矢量解耦控制和中性点电压均衡策略。为验证设计的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建了 VIENNA 整流器模型，并开展了相应的仿真研究。最后，完成了样机的设计与实验，仿真和实验结果表明了方案的正确有效性。

关键词：微电网；充电桩；VIENNA 整流器

Research on control strategy of pre stage PFC circuit for microgrid charging pile load in industrial park

GUAN Yitao[1], GUO Zhaojun[2], WANG Yuqi[1], SHEN Jiaxiang[3]

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Danyang Power Supply Branch Company, Zhenjiang 212310, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Yangzhong Power Supply Branch Company, Zhenjiang 212299, China; 3. Jiangsu Zhengguang Electric Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Zhenjiang 212121, China)

Abstract: With the development of my country's new energy electric vehicle industry, the load of charging piles in the park micro-grid system has increased rapidly, and the top-level PFC circuit topology and control of high-quality charging piles have received extensive attention. This dissertation focuses on the research on the high-efficiency control of the front-stage VIENNA rectifier of the DC charging pile and the imbalance of the neutral point voltage, and designs the current vector decoupling control and the neutral point voltage balance strategy based on the d, q coordinate system. In order to verify the effectiveness of the design, a VIENNA rectifier model was built in MATLAB/Simulink, and corresponding simulation research was carried out. Finally, the design and experiment of the prototype are completed, and the simulation and experiment results show that the scheme is correct and effective.

Keywords: microgrid; charging pile; VIENNA rectifier

0 引言

新能源电动汽车作为绿色交通工具的典型代表，其应用越来越多[1]，与此同时，电动汽车对应的充电设备领域也飞速发展。电动汽车充电电路一般分为直流充电电路与交流充电电路，直流充电电路因其适用于快速充电且充电效率高，

大规模应用于公共类充电桩领域。在现代工业园区中，直流充电桩设施的部署数量是非常可观的，充电需求也正逐日递增。对园区微电网来说，充电桩类负荷所带来的电能质量影响值得关注，其前级整流器的拓扑结构和控制是问题的关键[2-3]。三相三电平VIENNA整流器因其高功率因数、谐波含量小和控制简单等优点[4-5]，成为直流充电桩前级功率因数校正（Power Factor Correction，PFC）电路的主流拓扑。

针对VIENNA整流器拓扑及控制技术，国内外学者进行了广泛的研究。在VIENNA整流器控制策略方面，文献[6]提出一种无差拍控制方式，减小了电流畸变，进一步提高了功率因数；文献[7]引入一种自抗扰控制，加入VIENNA整流器的电压外环，提升了系统的抗干扰能力；文献[8]在功率控制环中引入比例积分重复控制，实现了较好的控制效果；文献[9]研究了VIENNA的故障诊断和容错控制，从故障电流角度着手研究，提出基于相电流变化率对故障诊断的方法，提高了VIENNA整流器系统的运行可靠性。

本文以园区微电网中充电桩类负荷前级VIENNA整流器为研究对象，针对VIENNA整流器的控制策略和中性点电压的不平衡问题进行研究，设计了基于dq坐标系的电流矢量解耦控制与电压均衡策略。为验证该设计的有效性，在MATLAB/Simulink中搭建了VIENNA整流器模型，并开展了仿真研究，同时完成了样机的设计与实验验证，最后仿真和实验结果表明了该方案的正确有效性。

1 园区微电网充电桩前级VIENNA整流器工作原理

某园区微电网典型组成如图1所示，其拓扑组成包括分布式电源（如风机、光伏等）、储能系统、充电桩等装置。园区微电网可以通过对并网开关的控制，切换并网运行和孤岛运行两种模式[10-11]。其中，孤岛运行过程中，可以通过对风机和光伏输出电能的转换与存储，为充电桩类负荷提供电能。当充电桩类负荷接入园区微电网时，由于充电桩类负荷汇聚度以及充电行为不同，将产生不定量谐波，并且对园区微电网的电能质量以及安全稳定运行均造成一定影响。

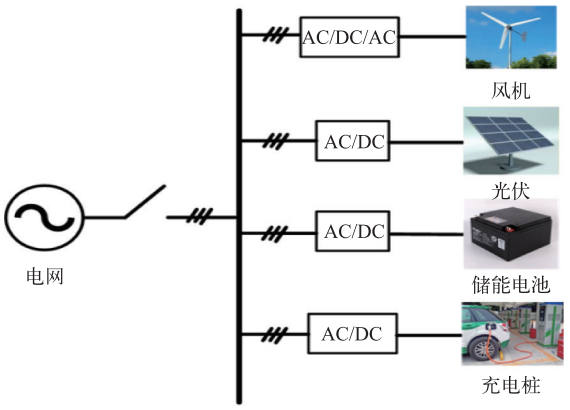

图 1　园区微电网典型组成

Fig. 1 Typical composition diagram of park type microgrid

该园区微电网中，电动汽车充电桩系统采用充电效率高的直流充电桩电路。直流充电桩电路一般采用两级式结构，前级PFC电路将交流电转换为直流电，后级是高频DC/DC电路，主要实现直流电压的宽范围输出，以满足不同充电功率以及不同型号的电动汽车需求。直流充电桩电路中，前级PFC系统电路拓扑的选择是提升充电桩性能和效率的关键，也是能直接影响园区微电网电能质量的重要环节。三相三电平VIENNA整流器拓扑因其功率因数高、总谐波畸变率低和控制简便等优点而广泛应用于前级PFC系统电路[12-15]。

VIENNA整流器由网侧电感（L_a、L_b、L_c）、三相不可控整流桥、直流侧母线电容（C_1、C_2）、等效负荷Z_L和3组由1个MOS管与4个二极管组成的双向开关等部件组成，其拓扑图如图2所示[16-18]。根据其拓扑可知，VIENNA整流器整体控制简便，并且在其运行过程中能量仅能单向流动，可适用于充电桩前级PFC电路拓扑。

VIENNA整流器的工作原理是先将三相交流电压一个工频周期分为6个区间，每个区间间隔60°，如图3所示。VIENNA整流器正常工作时，每相开关管仅有导通和截止两种工作状态，假设

1表示开关管导通，0表示开关管关断，则每相开关管在每个60°区间内都有2^3=8种工作组合[19]。当某相的双向开关导通时，该相将被直接连接到电容中性点，相电流总体呈线性增大趋势，交流侧网侧电感L储能。当双向开关管关断时，电网电流流经网侧电感L和二极管D向电容充电，电感储能释放，相电流总体呈线性下降趋势。通过控制双向开关管的合理通断，可实现对输入电流和直流侧输出电压的实时调节。

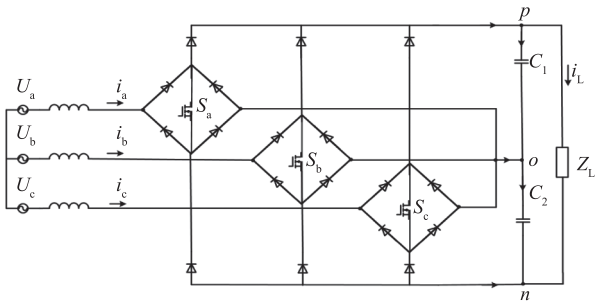

图 2　充电桩前级 PFC 系统 VIENNA 整流器拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of VIENNA rectifier of PFC system in front of charging point

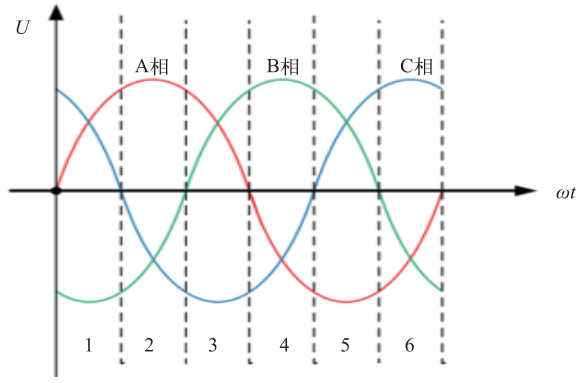

图 3　VIENNA 整流器的工作区间划分

Fig. 3 Division of working zone of VIENNA rectifier

在实际运行过程中，由于某些开关状态导致直流侧串联的两个电容充放电不相等，三电平VIENNA整流器直流侧电容中性点电位将发生偏移，即中性点电位不平衡现象。若其中某个电容电压过高且超过耐压值，将造成该电容的永久性损坏，进而影响VIENNA整流器的正常运行。因此在实际控制过程中，应尽量保证直流侧串联的两个电容端电压相等且不出现大幅波动。

2　VIENNA整流器控制策略研究

本文采用基于dq坐标系的电流矢量解耦控制和考虑中性点电压均衡调节的控制策略，其整体控制策略如图4所示。

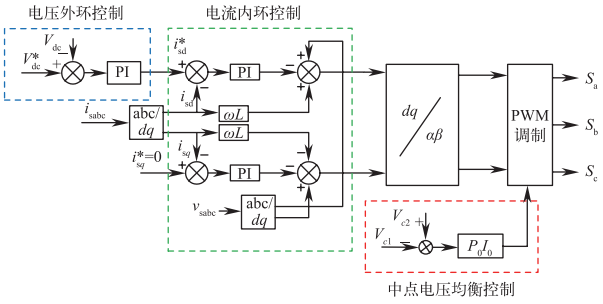

图 4　含中性点电位均衡的 VIENNA 整流器控制策略

Fig. 4 Control strategy of VIENNA rectifier with neutral point potential equalization

2.1　VIENNA整流器的双闭环控制设计

本文采用基于dq坐标系的电流矢量解耦控制策略，实现无功电流与有功电流的dq解耦控制以及无静差跟踪。采用网侧电压V_{sabc}经dq旋转坐标变换得到的d轴和q轴分量作为前馈分量，以克服电网外部扰动。采用双闭环控制，其中电压外环提供内环电流d轴分量参考值i_{sd}^*，其主要作用是快速跟踪调节母线电压变化，维持直流电压稳定。

2.2　中性点电压均衡控制策略

针对VIENNA整流器中性点电位偏移现象，本文利用PI控制对上下电容电压进行整流器中性点电位平衡控制，PI控制包括比例控制和积分控制两个典型环节，具有稳定性强和控制性能良好等特点。

假设两电容电压差ΔV_{dc}为

$$\Delta V_{dc} = V_{C2} - V_{C1} \tag{1}$$

当ΔV_{dc}为负值，即上电容电压V_{C1}大于下电容电压V_{C2}时，ΔV_{dc}经PI控制器处理后叠加于调制波，等价于调制波下移一定量，使得上电容充电时间减少，放电时间增加，而下电容充电时间增加，放电时间减少。在直流侧母线电压不变的情况下，上电容电压V_{C1}减小，下电容电压V_{C2}

增加，上下电容电压差ΔV_{dc}减小，且ΔV_{dc}最终为零，使得中性点电压均衡。反之，当ΔV_{dc}为正值时，亦是如此。

3 VIENNA整流器参数设计和仿真实验研究

为了验证上述控制策略设计的可行性，进一步在MATLAB/Simulink平台上搭建了三相三电平VIENNA整流器的仿真模型。同时，完成了VIENNA整流器实验样机平台搭建。下表给出了三相三电平VIENNA整流器的仿真模型和实验样机参数。

表　三相 VIENNA 整流器系统参数

Tab. System parameters of three phase VIENNA rectifier

参数	数值
输入相电压额定值 /V	220
额定直流电压 /V	800
功率额定值 /kW	15
输入电流 THD 要求（%）	<5
功率因数要求（%）	>99

3.1 主电路参数设计

（1）网侧电感参数设计

考虑交流侧网侧电感在电路中有传递能量和滤波等作用，由此可得L的表达式为

$$L=\frac{\lambda u_{ac}^2\left(V_{dc}-\sqrt{2}u_m\right)}{2f_{ps\omega}V_{dc}P_0} \tag{2}$$

式中，u_m为线电压幅值；V_{dc}为直流侧输出电压；$f_{ps\omega}$为开关频率；P_0为额定功率。

（2）直流电容设计

直流电容参数选取需考虑电容对直流电压纹波的滤除作用，由此可得C的取值范围为

$$C>\frac{\Delta I_{dc}}{2P_0f_\omega\Delta V_{ccm}} \tag{3}$$

式中，ΔI_{dc}为最大允许纹波电流；ΔV_{ccm}为最大允许波动电压范围。

3.2 仿真研究

考虑一定安全裕度后，选取仿真及实验参数为：网侧电感$L_a=L_b=L_c=0.45$mH；直流侧母线参考电压为800 V；直流电容$C_1=C_2=800$ μF。

在MATLAB/Simulink中搭建VIENNA整流器系统仿真模型，直流电容均压控制效果仿真如图5所示。交流输入电压和电流波形如图6所示。由仿真波形可知，电容电压V_{C1}、V_{C2}均控制在400 V左右，中性点电压平衡控制效果良好，且整个系统具有较好的功率因数和波形畸变率，通过仿真验证了VIENNA整流器控制策略和中性点电压平衡算法的准确性与可行性。

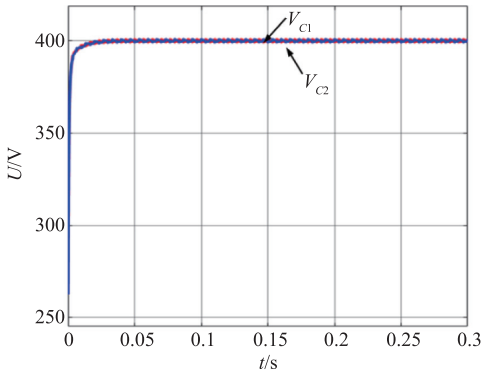

图 5　直流电容均压控制效果仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of DC side capacitor voltage balancing control effect

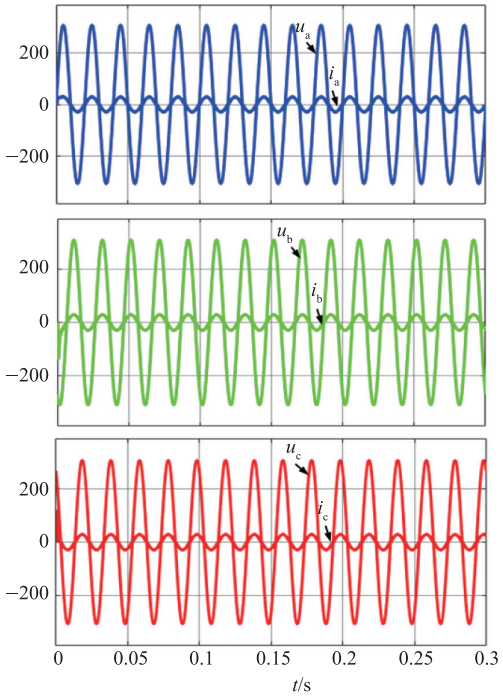

图 6　输入电压和电流仿真波形图

Fig. 6 Simulation waveform of input side voltage and current

3.3 实验验证

本文搭建了VIENNA整流器实验样机，并进行了相关实验研究，直流电容均压控制效果如图7所示。交流输入电压、电流波形如图8所示。

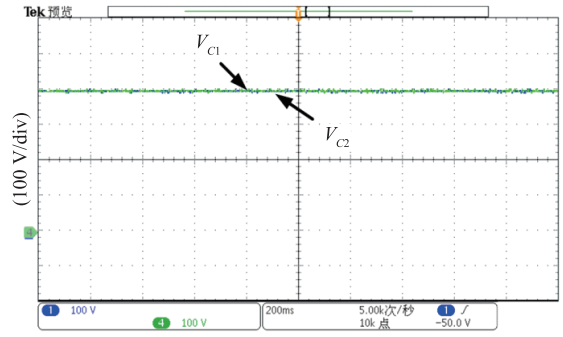

图 7　直流电容均压控制效果实验图

Fig. 7 Experimental diagram of DC side capacitor voltage sharing control effect

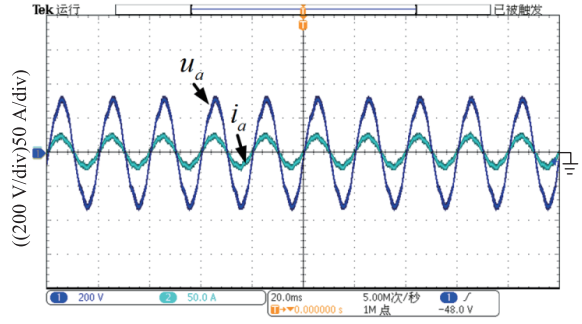

图 8　输入电压和电流实验波形图

Fig. 8 Input side voltage and current experimental waveform

实验所测波形证明VIENNA整流器直流输出电容均压控制效果良好，电容电压V_{C1}、V_{C2}均控制在400 V左右，由此证明中性点电压平衡控制效果良好。以上波形从实验角度进一步验证了VIENNA整流器控制策略和中性点电压平衡算法的准确性和可行性。

综上，由仿真与实验验证结果可知，三相三电平VIENNA整流器在工作过程中具有良好的功率因数和波形畸变率，满足园区微电网充电桩类负荷前级PFC电路拓扑的运行需求。

4　结束语

VIENNA型整流器拓扑因为具有工作效率高和控制简便等特点，广泛应用于电动汽车直流充电桩前级PFC系统电路。本文对VIENNA型整流器的高效控制和中性点电压的不平衡问题展开研究，设计了基于dq坐标系的电流矢量解耦控制和中性点电压均衡策略。最后为验证该策略的有效性，在MATLAB/Simulink中搭建了VIENNA整流器模型并开展了相应的仿真，完成了样机的设计与实验。仿真和实验结果均验证了设计的正确有效性。

参考文献

[1] 郑智威，胡嘉栋，陆晓平．计及中性点电位均衡的VIENNA型整流器简化空间矢量调制方法[J]．电力与能源，2024，45(1)：31-36．

[2] 姜卫东，胡业波，张庆岩，等．基于调制波分解的Vienna整流器的调制方法[J]．电工技术学报，2023，38(16)：4339-4352．

[3] 张爽，曹太强，胡杰，等．单向混合三相电压航空整流电路功率控制[J]．控制工程，2023，30(2)：332-338．

[4] 王金平，季圣植，姜卫东，等．一种实现VIENNA整流器开关损耗降低和中点电压平衡的新型不连续PWM策略[J]．中国电机工程学报，2022，42(11)：4125-4138．

[5] 李萍，王久和，李建国，等．单向混合整流器无源电流控制[J]．电工技术学报，2020，35(21)：4511-4523．

[6] 张娅婷，陈中，段然，等．考虑主动响应的电动汽车充电站-配电网协同规划[J]．电力工程技术，2019，38(5)：71-77．

[7] 冯兴田，崔晓，邵康，等．一种Vienna整流器的线性自抗扰控制策略[J]．电力电子技术，2020，54(7)：103-105．

[8] 黄润才，涂书会，宋小江，等．VIENNA整流器中性点平衡混合控制[J]．电力电子技术，2019，53(1)：19-22．

[9] 郝振洋，徐子梁，陈宇，等．航空Vienna整流器故障诊断与容错控制[J/OL]．电工技术学报：1-12[2021-11-01]．

[10] 黄钰琪，杨苹，刘泽健．家庭小区型多微网典型特征及工程设计[J]．电力工程技术，2019，38(3)：13-20．

[11] 杜健，王德顺，冯鑫振，等．考虑储能SOC的微网接口变流器VSG协同控制[J]．电力工程技术，2020，39(3)：128-135．

[12] 邹宇航，张犁，赵瑞，等．三相Vienna整流器的不连续空间矢量脉宽调制及电压谐波分析方法[J/OL]．中国电机工程学报：1-9[2020-11-02]．

[13] SOOK Y Y，HANG S C，CHEE P T，et al．A lookup table model predictive direct torque control of permanent-magnet synchronous generator based on VIENNA rectifier[J]．IEEE Journal pf Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2020，8(2)：1208-1222．

[14] 孙超，邱颖宁，冯延晖．基于SVPWM区间号的三相变流器开路故障诊断[J]．电力工程技术，2020，39(2)：178-185．

[15] 吴越，杨青松，熊慧，等．一种降低Vienna整流器共模电压的SVPWM方法[J]．电力电子技术，2020，54(6)：128-131．

[16] 李山，贺梧童，郭强，等．电网电压不平衡条件下VIENNA整流器滑模控制策略[J/OL]．电源学报：1-16[2020-11-05]．

[17] 姚芳，王刘浏，唐圣学，等．基于瞬态电流角度的维也纳整流器单管开路故障的在线辨识[J/OL]．高电压技术：1-8[2020-11-05]．

[18] 谢积锦，刘斌，何永玲，等．一种新型的三电平VIENNA整流器调制策略[J]．电气传动，2020，50(4)：45-52．

[19] 贺虎成，王超，辛钟毓．基于PR控制的VIENNA整流器高次谐波抑制[J]．微电机，2020，53(6)：53-57，98．

作者简介

管益涛（1997—），男，硕士，工程师，研究方向为电力系统及其自动化。

（收稿日期：2025-03-07）