

VIENNA 整流器控制策略综述

陈亚爱, 李子璇, 周京华, 吴杰伟

(北方工业大学 北京市变频技术工程技术研究中心, 北京 100144)

摘要: VIENNA 整流器作为一种能量单向流动的三电平升压型 AC/DC 变换器, 广泛应用于电动汽车充电系统等场合。其控制策略的好坏是提升电能质量、增加系统可靠性的关键, 因此 VIENNA 整流器控制策略成为学者们研究的热点, 主要分为电流控制、直流电压控制、中点电位平衡控制 3 个方面, 根据这 3 个方面对 VIENNA 整流器控制策略进行了分类、归纳和总结, 分析了各类控制策略的原理和优缺点, 为 VIENNA 整流器的研究与工程应用提供参考。

关键词: VIENNA 整流器; 电流控制; 直流电压控制; 中点电位平衡控制

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21156

Summary of Control Strategies for VIENNA Rectifier

CHEN Yaai, LI Zixuan, ZHOU Jinghua, WU Jiewei

(Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: As a three-level Boost AC/DC converter with unidirectional energy flow, the VIENNA rectifier is widely used in electric vehicle charging systems and other occasions. The key to improve the power quality and the system reliability is the quality of control strategy. Therefore, the control strategy of the VIENNA rectifier has become a hot topic for scholars. The VIENNA rectifier are mainly divided into three aspects: the current control, the DC voltage control, and the midpoint potential balance control. And the control strategies of VIENNA rectifiers were classified and summarized based on the three aspects. The principles, advantages and disadvantages of the various control strategies were analyzed to provide reference for the research and engineering application of VIENNA rectifiers.

Key words: VIENNA rectifier; current control; DC voltage control; midpoint potential balance control

随着负载设备对电网的谐波污染越来越大, 以及三相大功率装置在电网中的应用比例越来越高, VIENNA 整流器功率校正技术成为国内外电力电子研究领域的热点问题^[1]。与其它三电平整流器相比, VIENNA 整流器具有开关器件少、功率器件承受电压应力小和无桥臂直通问题等优点, 目前在 UPS、充电桩等不需要能量双向流动的行业中, 其产品设计已经采用 VIENNA 整流技术进行功率因数校正^[2]。

然而 VIENNA 整流器是一个多输入、多输出、强耦合的时变系统, 使得控制系统的设计相对复杂, 控制策略的好坏影响着系统的功率密度和效

率。本文以 VIENNA 整流器为主要研究对象, 基于国内外多年研究成果, 对 VIENNA 整流器控制策略进行分类、归纳和总结。

1 VIENNA 拓扑结构及控制策略分类

1.1 VIENNA 拓扑结构及工作原理

VIENNA 整流器主要由 3 个滤波电感、3 个四端开关组合和 2 个直流均压电容等器件组成, 如图 1 所示。根据 VIENNA 整流器四端开关中有源功率开关管的数量不同, 可将其拓扑结构主要分为 2 类: 单管四端开关类和双管四端开关类。但

基金项目: 国家自然科学基金(51777002); 北京市高水平创新团队建设计划资助项目(IDHT20180502)

作者简介: 陈亚爱(1961—), 女, 硕士, 教授, Email: eya@ncut.edu.cn

对于 VIENNA 整流器的不同拓扑结构,其基本控制原理均是相同的,且双管四端开关类的每个双向开关具有 2 个控制端子^[3],控制起来更加灵活,为此本文主要针对图 2 所示的双管四端开关实现的三电平 VIENNA 整流器控制策略展开分析。

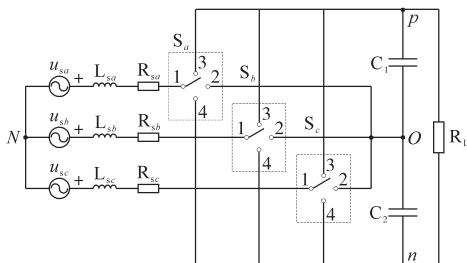


图1 VIENNA 整流器拓扑结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of VIENNA rectifier topology structure

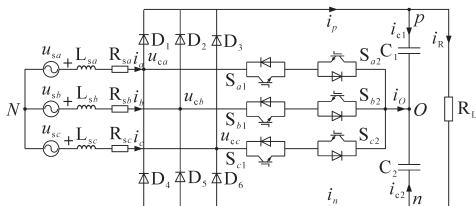


图2 三相三开关VIENNA 整流器拓扑结构

Fig.2 Topology of three-phase three-switch VIENNA rectifier

图 2 中, u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为三相输入电网电压; L_s 为三相滤波电感,作用是滤除电流谐波; C_1, C_2 为直流滤波电容,用于稳定直流侧输出电压,减小输出电压纹波^[4];每相桥臂由 2 个功率器件反向串联来等效为一个双向开关,则每个功率器件承受直流母线电压的 50%,通过控制双向开关的导通与关断,从而达到输入电流、直流输出电压和直流侧 2 个电容均压的控制。

1.2 VIENNA 整流器控制策略分类

VIENNA 整流器常用的控制系统如图 3 所示。通过锁相环得到电网电压相位角以实现电网电压定向控制,直流外环以输出电压为反馈量,与直流电压设定值的误差经过控制器得到电流内环给定值,电流内环以交流侧电感电流为反馈量实现控制,其输出量叠加中点电位平衡控制策略得到三相调制波,经调制得到开关管的驱动信号。VIENNA 整流器主要包含以下几个控制目标^[5]:1)保证交流电流为单位功率因数运行且实现正弦化;2)使直流侧输出电压稳定;3)达到中点电位平衡。对于锁相环技术,常采用传统的单同步坐标系软件锁相环,该锁相环技术可有效并准确地检测三相平衡时电网电压的频率、幅值和相位,在此不再赘述。

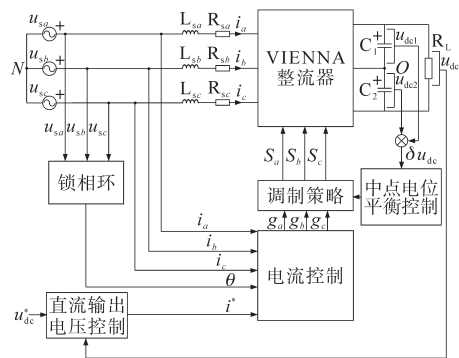


图3 VIENNA 整流器控制系统框图

Fig.3 Schematic diagram of VIENNA rectifier control system

根据控制目标,VIENNA 整流器控制策略分为电流控制、直流电压控制、中点电位平衡控制 3 大部分,控制策略分类如图 4 所示。

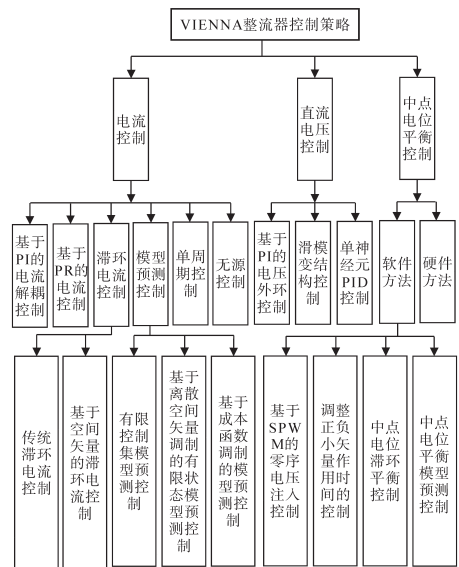


图4 VIENNA 整流器控制策略分类图

Fig.4 Schematic diagram of VIENNA rectifier control strategy classification

2 电流控制

电力电子装置的广泛应用对电网造成了谐波污染,因此如何提升 VIENNA 整流器的功率因数、降低电流谐波畸变率、进而改善电能质量是保障系统运行性能的关键,因此需要对其交流电流进行控制^[6]。

2.1 基于 PI 控制器的电流解耦控制策略

基于 PI 控制器的电流解耦控制策略应用广泛,技术成熟。首先对交流侧输入电压和电流进行采样,其次经过坐标变换得到其在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的直流量,并加入前馈解耦控制使 d, q 两轴相互独立,从而分别控制 VIENNA 整流器的有功分量和无功分量。基于 PI 控制器的解

耦控制方程表达式为

$$\begin{cases} u_d^* = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + u_d \\ u_q^* = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d^*, u_q^* 分别为 $d-q$ 同步旋转坐标系下调制电压期望值; K_{ip}, K_{il} 分别为 PI 控制器的比例增益和积分增益; i_d^*, i_q^* 分别为 $d-q$ 同步旋转坐标系下电流指令值; u_d, u_q 分别为 $d-q$ 同步旋转坐标系下电网电压直流量。

文献[7]采用该控制策略,电流前馈解耦控制如图5所示,在该控制策略下,VIENNA整流器可实现单位功率因数运行,但计算量较大,且PI控制器无法实现零误差跟踪正弦信号,存在受系统参数变化影响大和控制延迟等问题,从而导致直流侧动态响应较差。

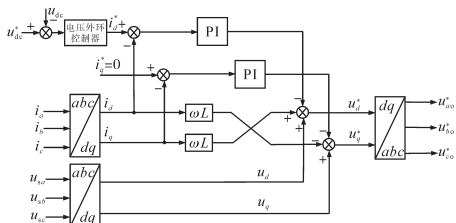


图5 基于PI控制器的电流解耦控制框图

Fig.5 Current decoupling control based on PI controller

2.2 基于PR控制器的电流控制策略

比例谐振(proportional resonant, PR)控制器由比例环节和谐振环节组成,可实现对正弦量的无静差跟踪。文献[8]采用基于PR控制器的控制策略,该控制策略基于 α - β 两相静止坐标系,采样值与给定值的误差经过PR控制器,从而可实现系统对给定信号无稳态误差的跟踪,基于PR控制器的电流控制框图如图6所示。

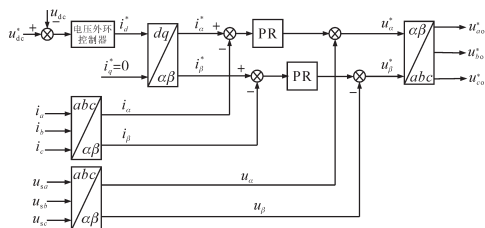


图6 基于PR控制器的电流控制框图

Fig.6 Current control block diagram based on PR controller

该控制策略计算量较小,可实现系统对直流量的无静差跟踪,但PR控制器易导致系统临近频率发生串扰并引起谐振问题,且发生负载突变时,传统的PR控制算法存在控制延迟的问题,在电动汽车充电模块等对动态性能要求较高的场

合,传统的PR控制无法满足需求。

为解决传统直流侧单一闭环动态性能差的问题,文献[9]将负载电流前馈环节引入到VIENNA整流器控制系统中,原理是检测负载电流 i_{dc} 的变化,根据瞬时功率理论,当直流侧负载变大时,负载电流 i_{dc} 变大,电压随之跌落,从而前馈环节的作用使得 d 轴给定电流增大,电容电流增大,则直流侧电压回升。因此通过对前馈系数的合理设计,从而提升VIENNA整流器抗负载扰动的能力。为减少源侧电流THD,文献[10]将用于VIENNA整流器的PR控制器进行改进,传统的PR控制器在很大程度上不能降低低次谐波,因此通过额外加入并联补偿器来消除低次谐波。该控制策略在 abc 三相静止坐标系下进行,避免使用坐标系变换和锁相环,计算量减少,可选择性地从源侧电流中消除不同的低次谐波,该控制策略适用于大范围的电网电压不平衡、电网谐波污染等情况下的电流控制。

2.3 滞环电流控制策略

滞环控制是将误差信号输送到滞环比较器从而产生控制信号。文献[11]采用传统滞环电流控制 (conventional hysteresis current control, C-HCC) 策略, 其电流控制结构采用一个非线性滞环比较器来代替传统电流控制器, 电压外环输出作为电流给定值, 与采样三相电流值的偏差经过滞环比较器, 控制框图如图 7 所示。从开关频率、电流畸变等方面考虑来选取合适的环宽 h , 当电流偏差 Δi 超越 $+h$ 或 $-h$ 时, 开关管通过相应的逻辑切换来减小与给定电流的偏差, 以 a 相为例, 开关管工作状态为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } i_a \geq 0, S_a = \begin{cases} 1 & i_a < i_a^* - h \\ 0 & i_a > i_a^* + h \end{cases} \\ \text{if } i_a < 0, S_a = \begin{cases} 1 & i_a > i_a^* + h \\ 0 & i_a < i_a^* - h \end{cases} \end{array} \right. \quad (2)$$

该控制策略结构简单,鲁棒性强,在负载突变情况下仍具备良好动态响应性能,但其存在的不足之处是开关频率不固定,导致网侧滤波电感的滤波效果下降,进而影响到网侧电流质量。

针对传统滞环控制策略开关频率波动大的问题,文献[12-13]采用基于空间矢量的滞环电流控制策略,原理是某相电流在一个方向穿越滞环带时,通过选择合适的电压矢量使其向反方向变化,控制框图如图8所示。该控制策略基于 α - β 两相静止坐标系, α 轴和 β 轴输出的电流误差分

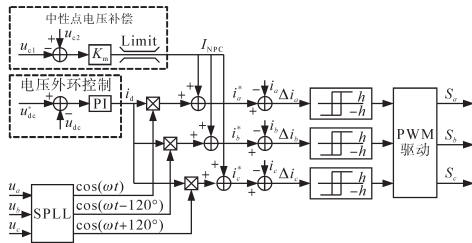


图7 传统滞环电流控制框图

Fig.7 Traditional hysteresis current control block diagram

别经过4阶和3阶滞环比较器,利用输出量 D_α 和 D_β 去查表,从而选择合适的电压矢量,获得驱动脉冲。该控制策略有效解决了开关频率波动问题,同时也具备动态响应速度快的特点。基于空间矢量的变环宽控制策略可推广到其它三相三电平变换器电流控制中,但实现过程较为繁琐,且扇区判断误差造成电流低次谐波变大问题有待进一步解决。

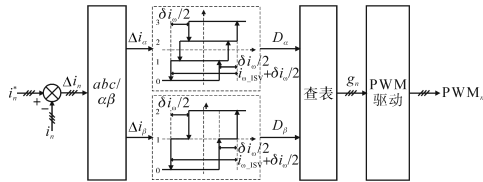


图8 基于空间矢量的滞环电流控制框图

Fig.8 Hysteresis current control block diagram based on space vector

2.4 模型预测控制

模型预测控制实际是求解最优控制问题。文献[14]采用有限控制集-模型预测控制(finite control set model predictive control, FCS-MPC)策略,该控制策略将传统的PI控制器和PWM模块替换成了MPC控制器,采集VIENNA整流器当前状态变量,经预测模型计算得到下一时刻预测电流值;通过电压外环和电网电压相角,得到参考电流值,最后根据以电流误差最小为目标的价值函数,在1个开关周期内对多个电压矢量遍历寻优,从而输出满足目标的最优电压矢量,控制框图如图9所示。

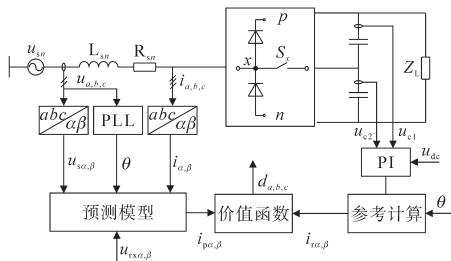


图9 模型预测控制框图

Fig.9 Block diagram of model predictive control

该控制策略具有动态响应快、可同时对多个

目标进行约束等优点,应用广泛,但开关频率不固定,输入电流对采样频率依赖较高。

文献[15]提出一种基于离散空间矢量调制(discrete space vector modulation, DSVM)的VIENNA整流器模型预测控制(DSVM-MPC)策略,通过引入虚拟矢量,构成更多数量的有限控制集来减少预测电压误差,从而提高电流预测控制精度,每个开关周期内可输出多个实矢量,开关频率波动减小。相较于传统模型预测控制,该控制策略降低了电流低频谐波含量,但其依赖于系统模型,对系统参数变化较为敏感。

针对传统FCS-MPC具有开关频率可变、电流纹波大、计算量大等特点,文献[16]提出了一种基于成本函数调制(cost function-based modulation, CFM)的模型预测控制(CFM-MPC)策略。根据无差拍控制原理,给出系统数学模型和电压矢量,然后根据电压矢量参考点的位置选取不同电压矢量,通过与所选电压矢量的代价函数值成反比来计算其开关动作时间。在不增加计算量的情况下,传统的模型预测控制和空间矢量脉宽调制方案都有跟踪最佳电压矢量的优点。与文献[14]采用传统模型预测方法相比,该控制策略具有较低的功率脉动、固定的开关频率和较低的总谐波失真等优点。

2.5 单周期控制策略

单周期控制(one cycle control, OCC)是一种非线性控制策略,通过控制每个开关周期内开关管的占空比 d 来跟踪控制参考量,从而实现电流控制。单周期控制策略在VIENNA整流器中的应用主要分为3种^[17],分类如图10所示。

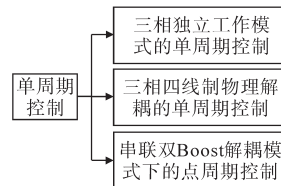


图10 单周期控制策略分类图

Fig.10 Classification diagram of single cycle control strategy

第1种控制策略是对三相电流分别采用单周期控制,相当于控制三路单相VIENNA电路;第2种控制策略是将三相电源的中性点与直流侧电容中点相连接,把电路物理解耦成3路Boost进行并联控制;这2种控制策略与第3种相比,开关损耗较大,实际工程中很少采用,因此下面将对第3种控制策略进行分析。

文献[18]采用第3种控制策略,即串联双Boost解耦模式下的单周期控制,控制框图如图11所示。在开关周期开始阶段,触发器置位,根据三相电网电压的区间划分,将三相电流解耦成电流 i_p 和 i_n ,再经过全波整流电路后连接到比较器,同时输出电压相对于参考电压的偏移量经过误差放大器,得到的电压误差信号 U_m 和其通过积分器输出的 U_m 叠加到加法器,从而输出基准值信号 U_c 。每个开关周期的开始阶段,开关管被触发导通,这时电感储存能量,经过电感的电流上升,采样值达到基准值时,比较器进行翻转,开关管被控制关断,则流经电感的电流下降,从而控制电流。该控制策略在VIENNA整流器中的应用无需电流基准,实现简单,鲁棒性强,但该控制策略基于模拟方式实现,参数设计复杂,灵活性较低,应用场合受限。

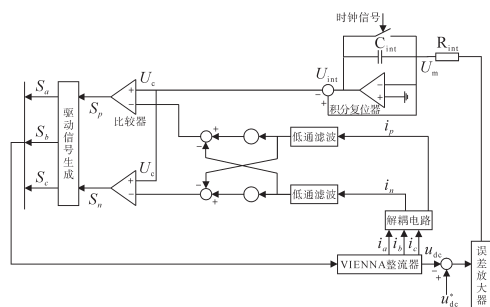


图11 串联双Boost解耦模式下VIENNA整流器的单周期控制原理图

Fig.11 Single cycle control principle diagram of VIENNA rectifier in series dual Boost decoupling mode

2.6 无源控制策略

无源控制(passivity-based control, PBC)是一种非线性控制策略^[19],是基于系统与外部能量进行储存、供给、耗散的控制理论。文献[20]采用无源控制策略,通过建立欧拉-拉格朗日(EL)模型和端口受控哈密顿(PCHD)模型,并设计PBC控制器,来实现交流侧电流对期望值的跟踪。该控制策略可实现系统全局稳定性,对参数变化及外部扰动均有较强抗干扰性,但PBC控制器的设计过程较为繁琐,计算量大。

除以上控制策略外,还有许多其它控制策略应用于电流控制中。文献[21]将模糊比例谐振控制策略应用到VIENNA整流器中,模糊控制器的自调整结构使得PR控制器参数可实时调整修改,从而可实现对电流的无静差跟踪。文献[22]在VIENNA整流器中采用精确线性化方法,并推导VIENNA整流器基于反馈线性化理论的状态方

程。该控制策略使得电流波动小,但反馈线性化控制策略的数学模型建立过程和控制器的设计过程较为复杂。文献[23]基于数学模型和瞬时功率理论,推导出输入有功、无功和空间矢量关系,将直接功率控制(DPC)策略用于三电平PWM整流器中。该控制策略可直接控制系统的有功、无功,并且可有效控制中点电位平衡。这些控制策略也均取得了良好控制效果,表1列出了各种电流控制策略的优缺点,以便对比。

表1 各种电流控制策略对比表

Tab.1 Comparative table of current control strategies

电流控制策略	特点
基于PI控制器的电流解耦控制策略	结构简单;技术成熟;应用广泛;系统阶数降低;PI控制器对系统参数敏感;动态响应性能差
基于PR控制器的电流控制策略	无静差跟踪;计算量适中;不易调节参数;易引起系统谐振
传统滞环电流控制策略	实现简单;动态性能好;鲁棒性强;开关频率不固定,影响网侧电流质量
基于空间矢量的滞环电流控制策略	动态响应速度快;开关频率波动小;实现过程繁琐;电流低次谐波变大
模型预测控制策略	易于实现;动态响应速度快;可同时对多个目标进行约束;开关频率不固定;不能保证控制精度;对采样频率依赖较高
单周期控制策略	实现简单;频率固定;鲁棒性好;灵活性较低,应用受限;参数设计与调整过程繁琐
无源控制策略	鲁棒性好;抗干扰能力强;PBC控制器设计繁琐;计算量大
模糊比例谐振控制策略	无静差跟踪;可实时调整控制器参数;控制器设计难度大
反馈线性化控制	动态性能较好;建模过程和控制器的设计较为复杂
直接功率控制	实现简单;单位功率因数控制;电流谐波小;依赖采样频率;计算误差大

3 直流电压控制

在多级系统中,VIENNA整流器一般作为前级AC/DC环节,因此VIENNA整流器直流侧输出电压的稳定性与抗干扰性是保障系统性能的基础。VIENNA整流器电压外环设计的关键是保证负载电压 u_{dc} 跟踪指定电压 u_{dc}^* ,且不受负载电流变化的影响,为电流内环提供指令电流值。

3.1 基于PI控制器的电压外环控制策略

文献[24]采用传统PI控制器作为电压外环,但装置进行启动或者负载发生突变时,PI控制器的参数就会受到直流电压和电流变化率的影响,因此传统固定参数的PI控制器难以满足动态响应要求。针对以上问题,文献[25]对外环控制器零点和环路增益进行优化,保证系统在负载波动下保持输出电压稳定的特性。

3.2 滑模变结构控制策略

针对PI控制器动态响应差的问题,文献[26-27]将滑模变结构控制应用于VIENNA 整流器电压外环的设计中,滑模控制器的设计主要包括:首先选取合适的滑动面,满足系统动态响应要求;设计控制率,使滑动模态达到稳定。滑模变结构控制相对于其它非线性控制策略最大的特点是当系统处于滑模状态时,原定参数变化或外部变控量改变不会对系统状态造成影响,鲁棒性较强。

3.3 基于单神经元PID控制器电压外环控制策略

传统PID控制器实现简单,鲁棒性好,但应对工况变化时动态性能较差,而单神经元具备自适应调整能力,将单神经元与传统PID控制器相结合,形成的单神经元PID控制器在应对非线性问题时有很大的优势^[28]。文献[29]采用单神经元PID控制器来控制直流侧电压,当负载受到扰动时,权系数根据模糊规则进行自适应调整,直流侧电压可迅速恢复到稳态。该控制策略使得直流侧输出电压具有较好的稳定性,控制简单,鲁棒性强,同时可摆脱传统神经网络控制算法带来的大量编码。

4 中点电位平衡控制

中点电位平衡问题是三电平VIENNA 整流器控制的一个重点,本质原因是流过直流侧电容中点电流对两均压电容充放电时间不同,造成两电容电压不等,而中点电位不平衡会造成器件损坏,电流质量下降,影响VIENNA 整流器系统性能,因此研究中点电位平衡控制对VIENNA 整流器的工程应用有重要意义。国内外学者们做了大量的研究来抑制中点电位的不平衡,包括硬件方法和软件方法。对于硬件方法,大多数通过增加电容容值来补偿中点电流,从而达到中点电位平衡控制,在工程应用中,该方法会增加成本,灵活性较差,局限性较强,实际中很少采用^[30];目前中点电位平衡控制主要采用软件方法进行控制,包括基于SPWM 零序电压注入控制、调整正负小矢量作用时间控制、中点电位滞环平衡控制策略和中点电位平衡模型预测控制策略。

中点电位平衡控制对VIENNA 整流器性能有至关重要的作用,表2列出了上述几种采用软件方法的中点电位平衡控制策略的优缺点,以便对比。

表2 各种中点电位平衡控制策略对比表

Tab.2 Comparative table of midpoint potential balance control strategies

中点电位平衡控制策略	特点
基于SPWM 零序电压注入控制策略	易于实现;有不同方法得到零序电压;控制精度较差;三相电流谐波含量较大
传统调整正、负小矢量作用时间控制策略	方法简单;有较强的中点电位平衡控制能力;对于调制度较大时无法达到中点电位平衡控制
调整正、负虚拟小矢量作用时间控制策略	理论上可完全调整至中点电位平衡;开关损耗大;系统效率较低
中点电位滞环平衡控制策略	实现简单;鲁棒性强;存在控制盲区
中点电位平衡模型预测控制策略	计算量少;实现简单;控制精度较低

4.1 基于SPWM 零序电压注入控制策略

基于SPWM 零序电压注入控制策略的基本原理是通过直流侧两电容电压差值计算出零序电压分量,再作用到三相调制波,从而控制中点电位平衡。根据文献[31]可知有3种不同算法得到零序电压分量,分别为:利用PI控制器计算零序电压分量、根据交流电流方向计算零序电压分量和根据交流电流和直流电压及电容值计算零序电压分量。

第1种方法是采用PI控制器计算零序电压分量,其原理是将两电容电压差值作用到PI控制器^[32],将其输出的零序电压分量作用到三相调制波来达到中点电位平衡控制,该控制策略动态调节能力强,但PI控制器参数是针对系统某一状态而设定,因此当系统运行状态发生变化时,对于固定参数的PI控制器来说难以达到最优中点电位平衡控制效果。

第2种方法是根据交流电流方向计算零序电压分量,如下式:

$$u_{zsv} = \text{sgn}(u_{n0}^*) \text{sgn}(i_n) \Delta u_{dc} \quad (3)$$

式中: Δu_{dc} 为两电容电压差值。

由式(3)可见,零序电压分量 u_{zsv} 的极性受到三相调制波 u_{n0}^* 和电流 i_n 的影响,因此零序电压 u_{zsv} 的变化为不连续,从而造成其无法在三相调制波正、负半周期内平滑过渡的问题。

第3种方法是根据交流电流值、直流母线电压值及电容值计算零序电压分量,如下式:

$$u_{zsv} = \frac{\text{sgn}(u_{n0}^*) \Delta u_{dc} C}{i_n} u_{dc} \quad (4)$$

式中: C 为电容量。

由式(4)可见,零序电压分量 u_{z0} 的极性受到三相调制波 u_{n0}^* 的影响, u_{z0} 为非连续变化,但是其极性变化与三相调制波极性变化同步,因此零序电压分量可以在三相调制波正、负半周期内平滑过渡,该控制策略中点电位平衡能力较强,但控制精度较差。

以上 3 种零序电压分量注入法均能达到中点电位平衡控制的效果,针对于不同应用场景下的需求,选取不同的中点电位平衡控制策略。

4.2 调整正、负小矢量作用时间控制策略

4.2.1 传统调整正、负小矢量作用时间控制策略

文献[33-34]采用调整正、负小矢量作用时间的控制策略,根据三电平空间电压矢量分布可知,正、负小矢量对中点电位影响相反,忽略中矢量对中点电位的影响,引入调整系数重新分配正、负小矢量作用时间,从而达到中点电位平衡控制。该控制策略有较强的中点电位平衡控制能力,但根据中点电位偏移情况来频繁调整正、负小矢量分别作用时间,这使得直流电压谐波含量变大,并且当调制度较大时,中矢量对中点电位的影响不容忽视。

4.2.2 调整正、负虚拟小矢量作用时间控制策略

针对传统调整正、负小矢量作用时间控制策略无法完全调节至中点电位平衡的问题,文献[35]采用一种基于空间虚拟矢量调制的控制策略,通过调整正、负虚拟小矢量作用时间来调节中点电位偏差,理论上能完全达到中点电位平衡,但该控制策略存在开关损耗大的问题。

4.3 中点电位滞环平衡控制策略

文献[36]采用中点电位滞环平衡控制策略,其原理是在中点电位设定一个滞环宽度,当中点电位偏差超越该宽度时,根据中点电位偏离方向来相应选择使趋于平衡点的小矢量作用,从而达到中点电位平衡控制的目的。该控制策略实现简单,鲁棒性强,但 VIENNA 整流器运行在低功率因数时,中点电位平衡控制效果较差,且存在控制盲区。针对此问题,该文献又提出一种将准确补偿控制与滞环控制相结合的控制策略,中点电位平衡控制效果较好。

4.4 中点电位平衡模型预测控制策略

文献[37]将一种基于离散空间矢量调制的中点电位平衡模型预测控制策略用于 VIENNA 整流器中,在可行的预测电压矢量中加入虚拟电压矢量,可选择更多冗余的小矢量来平衡输出电压,与常规 FCS-MPC 平衡法计算预测电压的方法相

比,该控制策略计算量少,实现简单,具有良好的输出中点电位平衡和输入电流性能。文献[38]将基于离散空间矢量调制的模型预测控制方法用于连接风力发电系统永磁同步发电机(PMSG)的 VIENNA 整流电路中。中点电压通过 VIENNA 整流器中点电压模型计算得到的偏置电压作为平衡控制,可实现低电流纹波和快速动态响应的高性能,为 VIENNA 整流器在永磁同步电动机中的应用提供了指导作用。

5 结论

本文对现有的 VIENNA 整流器控制策略进行了全面介绍与总结,根据 VIENNA 整流器应用现状及场景需求可从以下方面进行深入研究:

1) 实际工程应用中,电网中负荷分布不均衡会导致电网电压不平衡,从而造成 VIENNA 整流器交流侧电流不平衡,则电流幅值较大的一相会出现过流损坏;另外负序电流的存在会导致直流电压出现二倍工频波动,对后续充电系统产生不良影响。基于理想电网的控制策略,无法解决上述问题,因此亟需研究电网电压不平衡情况下的控制策略。

2) 基于宽禁带材料的碳化硅(SiC)等新器件具有导通压降小、耐高温高压、开关频率高等优点,目前英飞凌工业半导体公司将 1 200 V 第 5 代 SiC 肖特基二极管代替传统硅材料应用于 VIENNA 整流器中,设计方案效率高达 98%。因此 VIENNA 整流器可通过 SiC 等新型器件来满足高压大功率场合应用需求。

参考文献

- [1] Kolar J W, Zach F C. A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 456-467.
- [2] 陈新, 王赞程, 宋卫平, 等. 高压直流通信电源中高频开关整流模块[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 152-159.
- [3] Hang L, Zhang M, Tolbert L M, et al. Digitized feedforward compensation method for high power density three-phase Vienna PFC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1512-1519.
- [4] Kedjar B, Kanaan H Y, Al-Haddad K. Vienna rectifier with power quality added function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3847-3856.
- [5] Maswood A I, Al-Ammar E, Liu F. Average and hysteresis current-controlled three-phase three-level unity power factor recti-

- fier operation and performance[J]. IET Power Electronics, 2011, 4(7):752-758.
- [6] 何礼高,陈鑫兵. 变电感参数三电平不可逆PWM整流器的电流PI优化控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7):203-209.
- [7] 李胜,程浩. 高功率因数VIENNA整流器的研究与设计[J]. 电力电子技术, 2018, 52(10):84-89.
- [8] 党超亮,同向前,王倩,等. 采用占空比前馈的VIENNA整流器平均电流PR控制[J]. 电力电子技术, 2016, 50(3):67-70.
- [9] 宋卫章,余丰,戴智豪,等. 带负载电流前馈的VIENNA整流器PR控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5):76-83.
- [10] Adhikari J, Prasanna IV, Panda S K. Reduction of input current harmonic distortions and balancing of output voltages of the Vienna rectifier under supply voltage disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7):5802-5812.
- [11] 张东升,韩波,张东来,等. VIENNA整流器的滞环电流控制研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(6):1-2, 5.
- [12] Mohseni M, Islam S M. A new vector-based hysteresis current control scheme for three-phase PWM voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9):2299-2309.
- [13] 杨仁增,张光先,赵学良. 空间矢量变环宽滞环电流控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3):843-849.
- [14] 张锦,於锋,高磊,等. Vienna整流器模型预测电流控制优化方案研究[J]. 电源学报, 2020, 18(5):110-117.
- [15] 朱文杰,陈昌松,段善旭. 一种基于离散空间矢量调制的Vienna整流器模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20):6008-6016.
- [16] Dang C, Tong X, Song W, *et al.* Cost function-based modulation scheme of model predictive control for VIENNA rectifier[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(14):3646-3655.
- [17] 高燃. 单周期控制VIENNA整流器研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [18] 高燃,张维戈,牛利勇,等. 基于解耦模式单周控制的VIENNA整流器研究[J]. 电源技术, 2012, 36(3):392-395.
- [19] 翟丹丹,王久和,库冬瑾. 基于EL模型的VIENNA整流器无源混合控制[J]. 电气应用, 2015, 34(12):69-74.
- [20] 陆翔,谢运祥,桂存兵,等. 基于无源性与时滞变结构控制相结合的VIENNA整流器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):110-115.
- [21] 马辉. 三相VIENNA整流器调制技术及非线性控制策略研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- [22] Ansari R, Feyzi M R, Hamed K Akbari, *et al.* Input-output linearisation of a forth-order input-affine system describing the evolution of a three-phase/switch/level(Vienna)rectifier[J]. IET Power Electronics, 2011, 4(8):867-883.
- [23] 张颖超,赵争鸣,袁立强,等. 三电平PWM整流器直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5):62-68.
- [24] Tong Dan, Ren Xiaoyong, Chen Yu, *et al.* A nonlinear control strategy to reduce DC bus capacitance in Vienna rectifier [C]// 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2019.
- [25] 汪鹏,李山,郭强,等. 三相VIENNA整流器双闭环控制策略及其参数研究[J]. 电源学报, 2018, 16(5):16-24.
- [26] 陆翔,谢运祥,桂存兵,等. 基于无源性与滑模变结构控制相结合的VIENNA整流器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):110-115.
- [27] 窦海学,余赵林. 三相电压型PWM整流器滑模控制算法研究[J]. 电工技术, 2019(8):26-28.
- [28] Huang Lin, Yu Lijuan, Quan Shuhai, *et al.* Design of voltage loop for three-phase PWM rectifier based on single neuron adaptive PID control[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), He-fei; IEEE, 2017:171-175.
- [29] Xie. Yangxu, Zhang. Danhong, Zhang. Huaiun, *et al.* Neural network-fuzzy adaptive PID controller based on VIENNA Rectifier[C]//2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China; IEEE, 2018:583-588.
- [30] Yazdani A, Iravani R. A generalized state-space averaged model of the three-level NPC converter for systematic DC-voltage-balancer and current-controller design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):1105-1114.
- [31] 姜卫东,杨柏旺,黄静,等. 不同零序电压注入的NPC三电平逆变器中点电位平衡算法的比较[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33):17-25.
- [32] Ding Wenlong, Zhang Chenghui, Gao Feng, *et al.* A zero-sequence component injection modulation method with compensation for current harmonic mitigation of a Vienna rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):801-814.
- [33] 姜海鹏,刘永强. 带中点电位平衡控制的VIENNA整流器简化SVPWM双闭环控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2):35-41.
- [34] 肖梁乐,陈昌松,王涛,等. 基于三电平SVPWM调制的Vienna整流器中点电压均衡控制[J]. 电源学报, 2017, 15(5):80-86, 107.
- [35] Monge S B, Somavilla S, Bordonau J, *et al.* Capacitor voltage balance for the neutral-point-clamped converter using the virtual space vector concept with optimized spectral performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4):1128-1135.
- [36] 陆翔. VIENNA整流器关键技术问题研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [37] Zhu Wenjie, Chen Changsong, He Jian, *et al.* A novel model predictive control method with discrete space vector modulation for neutral-point voltage balancing of Vienna-type rectifier [C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR; IEEE, 2018:4051-4055.
- [38] Lee J, Lee K, Blaabjerg F. Predictive control with discrete space-vector modulation of Vienna rectifier for driving PMSG of wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12):12368-12383.

收稿日期:2019-11-22

修改稿日期:2020-01-10