DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.67　　**中图分类号**：TM461　　**文献标志码**：A

融合过零畸变抑制及无功补偿的VIENNA整流器研究

苏　雄(中国电源学会会员)，崔志成(中国电源学会会员)，宋浩楠(中国电源学会会员)，
刘姿如(中国电源学会会员)，程　红(中国电源学会会员)，王　聪(中国电源学会会员)
(中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院，北京 100083)

摘要：VIENNA整流器作为1种性能优异的供电电源前级整流器，被广泛应用于电动汽车充电桩、风力发电系统等中高压大功率场合。然而，由于其拓扑能量单向流动的工作特性，传统控制方式下会存在电流过零畸变的现象，进而导致无功补偿能力较弱的问题。因此，在分析电流过零畸变的基础上，采用了1种融合过零畸变抑制及无功补偿的控制方案，重点分析了VIENNA整流器提供最大无功补偿能力时所受的约束条件，并对VIENNA整流器向负载输送不同有功功率时，提供额外无功补偿的能力进行了研究。仿真结果验证了所采用的控制方案能有效抑制VIENNA整流器输入电流过零畸变，进而增强其无功补偿能力。

关键词：VIENNA整流器；输入电流过零畸变；无功补偿；功率等级

Research on VIENNA Rectifier Integrating Zero-crossing Distortion Suppression and Reactive Power Compensation

SU Xiong, *Member*, *CPSS*, CUI Zhicheng, *Member*, *CPSS*, SONG Haonan, *Member*, *CPSS*,
LIU Ziru, *Member*, *CPSS*, CHENG Hong, *Member*, *CPSS*, WANG Cong, *Member*, *CPSS*
(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: As an excellent front-end rectifier for power supply, the VIENNA rectifier is widely used in medium-to-high voltage and high-power scenarios such as electric vehicle charging piles and wind power generation systems. However, due to the unidirectional flow of its topological energy, there may be current zero-crossing distortion under traditional control methods, resulting in weak reactive power compensation capability. Therefore, based on the analysis of current zero-crossing distortion, a control scheme integrating zero-crossing distortion suppression and reactive power compensation was adopted, with a focus on analyzing the constraints faced by the VIENNA rectifier when providing maximum reactive power compensation capability, as well as the capability of the VIENNA rectifier to provide additional reactive power compensation when delivering different active power to load. Simulation results verify that the adopted control scheme can effectively suppress the zero-crossing distortion of input current of the VIENNA rectifier and thus enhance its reactive power compensation capability.

Keywords: VIENNA rectifier; input current zero-crossing distortion; reactive power compensation; power level

随着各式各样的电力电子装置接入电网，非线性负荷在电力系统中占比增加，电能质量问题日趋严重。在这种情况下，提高电能变换设备的效率及电能质量具有重要意义[1-2]。传统的解决方案中，如静止无功补偿器SVC(static var compensator)、静止无功发生器SVG(static var generator)、有源电力滤波器APF(active power filter)和统一电能质量调节器UPQC(unified power quality controller)等电能

收稿日期：2023-09-14；**修回日期**：2023-10-30；**录用日期**：2023-11-21；**网络首发日期**：2024-05-14
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51577187)；中央高校基本科研业务费资助项目(2021YJSJD15)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51577187; Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant 2021YJSJD15

质量治理装置得到广泛应用，在无功补偿 RPC (reactive power compensation)与谐波电流补偿 HCC(harmonic current compensation)方面取得了良好的效果[3]，不过由于空间和安装相关的资金和运行成本较高，以及长距离传输带来的无功和谐波电流损耗问题，导致其不能作为改善电能质量的最佳解决方案[4-5]。随着分布式发电系统的日益普及，越来越多研究人员认为，将 RPC 和 HCC 功能集成到现有常用的双向或单向功率变换器中，可能是一种更合适、更具成本效益的改善电能质量解决方案[6-7]。

与双向功率变换器相比，以 VIENNA 整流器为代表的单向功率变换器，凭借其开关器件数量少、电压应力低、控制简单及可靠性高等优点备受关注，目前已广泛应用于电动汽车直流充电桩、风力发电系统、通信电源系统等中高压大功率场合[8-10]，在实现原有的整流功能外，将 RPC 与 HCC 功能集成到 VIENNA 整流器中，实现无功就地补偿及谐波抑制，这对提高电网的电能质量具有重要意义。文献[7]最先提出了将 RPC 与 HCC 功能集成到 VIENNA 整流器的控制算法，但由于其固有的输入电流过零畸变问题，整流器的 RPC 能力微乎其微，其无功容量仅占有功容量的 12%。此处需指明，单台 VIENNA 整流器的无功补偿容量有限，可能无法完全补偿大电网中的无功谐波，但是多台通过设计具备 RPC 功能的整流器在各自功率范围内，通过“较小无功容量”的累加，可以有效增强就地无功补偿能力，对改善局域内电网电能质量具有重要意义。

VIENNA 整流器存在固有的输入电流过零畸变问题是导致其 RPC 能力弱的主要原因，通过抑制输入电流过零畸变来提升 VIENNA 整流器的 RPC 能力引起广泛关注与研究[11-15]。文献[11]从调制策略上分析了过零畸变产生原因，并采用注入零序分量来抑制电流过零畸变；文献[12]提出 1 种适用于 VIENNA 整流器的无电压传感器电流定向控制策略，有效抑制了端电压矢量滞后所引起的线电流过零畸变，提高了线电流质量和变换器效率；文献[13]提出基于自适应超螺旋滑模观测器的三相 VIENNA 整流器无模型预测电流控制策略，为复杂工况下的畸变抑制提供了新的控制思路；文献[14]采用并联 LCL 滤波支路注入 3 次谐波，从而抑制电流过零畸变，此方法具有一定的畸变抑制效果，不过增加了成本；文献[15]提出含负载前馈补偿的电流型 PWM 整流器改进无差拍控制方法，其控制思想对 VIENNA 整流器的无功补偿控制具有重要借鉴意义；文献[16]提出的电压-电流级联闭环控制方案，在提高虚拟同步机电流质量的同时，为整流器无功补偿能力优化提供了参考；文献[17]从电流过零失真的本质出发，采用注入无功分量的方式改变调制电压相位，从而降低电流过零畸变；文献[18]从端电压矢量滞后的角度分析 VIENNA 整流器电流过零畸变现象，提出通过补偿一定的无功电流，使输入端电压矢量与电流矢量同相位达到抑制电流过零畸变的目的。上述文献均从不同角度分析了 VIENNA 整流器输入电流过零畸变现象，所提方法也均有效抑制了输入电流过零畸变，但并未对如何将 RPC 集成到 VIENNA 整流器的方法进行讨论。

本文采用了 1 种融合过零畸变抑制与无功补偿的控制策略，可在抑制 VIENNA 整流器输入电流过零畸变的同时实现无功补偿集成。分析了整流器最大无功补偿能力的约束条件及其与不同有功传输功率的关系，给出最大无功补偿范围计算方法与控制策略实现方案[19]；最后通过仿真结果验证了所采用控制方案的有效性和可行性，为未来调度已有的单向能量流动整流器提供了理论基础。

1 VIENNA 整流器传统双闭环控制

三相三开关 VIENNA 整流器如图 1 所示。图中：u_a、u_b、u_c 为三相交流侧输入电压源；i_a、i_b、i_c 为三相交流侧输入电流；L_a、L_b、L_c 为交流侧电感且 $L_a=L_b=L_c=L$；C_1 和 C_2 为等值的直流侧电容；U_{C_1} 和 U_{C_2} 分别为 2 个直流电容的电压；U_{dc} 为直流侧输出电压；R_L 为直流输出侧负载；D_1~D_6 为 6 个二极管；S_a、S_b、S_c 为由 1 个功率开关器件和 4 个二

极管组成的双向开关管。

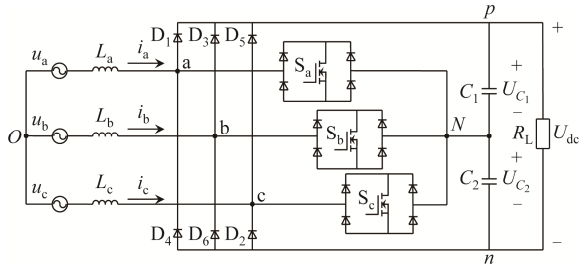


图 1　VIENNA 整流器电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of VIENNA rectifier

整个三相 VIENNA 整流器控制策略中，电流内环控制器的设计起到跟踪给定电流的作用；电压外环控制器的设计目的是使直流侧的电压输出稳定，整体控制框图如图 2 所示。图中：U_{dcref} 为直流电压给定值；i_d 和 i_q 分别为 dq 旋转坐标系下 d、q 轴电流；i_d^* 和 i_q^* 分别为电压外环输出的有功电流参考值和无功电流参考值；ω 为电网的角频率；u_d 和 u_q 为 dq 旋转坐标系下的网侧电压源；u_{dN} 和 u_{qN} 为中性点电压在 dq 旋转坐标系下的分解值；u_{aN}^*、u_{bN}^*、u_{cN}^* 为三相交流侧各相相对于电源中点的给定电压指令值。

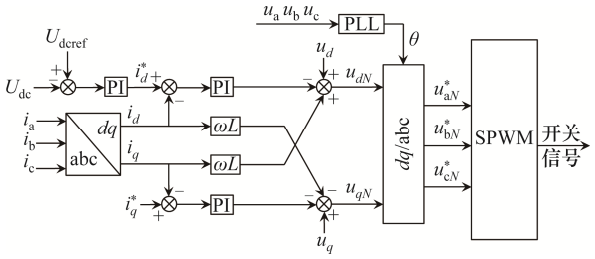


图 2　无功补偿控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of reactive power compensation control strategy

由图 2 可见，该控制策略中，电压外环输出的有功电流参考值 i_d^* 作为电流内环的输入；通过设定不同无功电流参考值 i_q^*，可实现输入电流超前或滞后输入电压，向电网提供容性或感性无功功率，从而实现无功补偿功能。此时，VIENNA 整流器的控制方程为

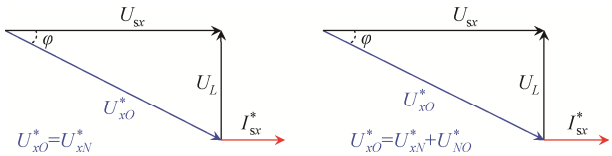
$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}+Ri_d=\left(K_{\mathrm{ip}}+\dfrac{K_{\mathrm{ii}}}{s}\right)(i_d^*-i_d) \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}+Ri_q=\left(K_{\mathrm{ip}}+\dfrac{K_{\mathrm{ii}}}{s}\right)(i_q^*-i_q) \end{cases} \tag{1}$$

式中：R 为交流侧等效电阻；K_{ip} 和 K_{ii} 分别为电流内环比例调节增益和积分调节增益。

2　VIENNA 整流器输入电流过零畸变抑制策略

2.1　输入电流过零畸变原理分析

三相 VIENNA 整流器 x 相输入电流产生过零畸变现象是由于整流器 x 相交流侧相对于电源中点 O 的给定电压 U_{xO}^* 与 x 相输入电流 i_{sx}(x=a, b, c)的极性不一致，进而导致出现输入电流过零畸变现象。在单位功率因数下运行时，VIENNA 整流器拓扑交流侧电压电流基波分量相量如图 3 所示。图中，U_L 为交流侧滤波电感 L 两端电压。



(a) 单相VIENNA　　(b) 三相VIENNA

图 3　VIENNA 整流器单位功率因数下运行时交流侧基波分量相量

Fig. 3 Phasor of fundamental component on AC side of VIENNA rectifier operating at unit power factor

观察图 3(a)和(b)可知，相较于单相 VIENNA 整流器，三相 VIENNA 整流器多了 1 个可控量 U_{NO}^*，即整流桥中点 N 与电源中点 O 之间的电压，以下简称为中性点电压。采用传统控制方式，三相 VIENNA 整流器的中性点电压 U_{NO}^* 虽然能够在一定程度上缓解输入电流瞬时的畸变程度，但从整个工频周期来考虑，中性点电压的存在将加重输入电流的畸变程度。因此，为保证整流器稳定、安全运行，必须采取有效措施来抑制该畸变。

2.2　输入电流过零畸变抑制策略

输入电流畸变抑制策略主要包含 2 个部分：整流器 a、b、c 三相输入电流均未进入电流过零畸变区时的整流器控制方法，以及整流器某一相输入电流进入过零畸变区时的整流器控制方法。

因此，可以采用此逻辑来判断输入电流是否进入过零畸变区，稳态时在控制中可以采用其参考值

来表示，定义三相 VIENNA 整流器 x 相输入电流过零点畸变区判断依据为

$$\begin{cases} i_{sx}^{*}u_{xO}^{*} \leqslant 0 & \text{sign } x=1 \\ i_{sx}^{*}u_{xO}^{*} > 0 & \text{sign } x=0 \end{cases} \quad x=\text{a, b, c} \tag{2}$$

式中：sign x=1 表示整流器 x 相输入电流进入过零畸变区；sign x=0 表示整流器 x 相输入电流未进入过零畸变区。

当 VIENNA 整流器 a、b、c 三相输入电流均未进入过零畸变区时，整流器不存在输入电流过零畸变问题，因此无需再对 VIENNA 整流器中性点电压 u_{NO}^{*} 进行控制并默认其为 0，即

$$\begin{cases} u_{xN}^{*}=u_{xO}^{*} \\ u_{NO}^{*}=0 \end{cases} \quad x=\text{a, b, c} \tag{3}$$

为满足三相 VIENNA 整流器各整流桥接入点 a、b、c 与三相电源中点 O 之间的电压 u_{aO}、u_{bO}、u_{cO} 的基波分量仍能够按照其给定参考值 u_{aO}^{*}、u_{bO}^{*}、u_{cO}^{*} 变化，即

$$\begin{cases} u_{aO}^{*}=u_{aN}^{*}+u_{NO}^{*} \\ u_{bO}^{*}=u_{bN}^{*}+u_{NO}^{*} \\ u_{cO}^{*}=u_{cN}^{*}+u_{NO}^{*} \end{cases} \tag{4}$$

当 x 相输入电流进入过零畸变区，u_{xN} 将被钳位为 0，为使该相输入电流不发生过零畸变，令其给定值也为 0，即

$$u_{xN}^{*}=0 \quad x=\text{a, b, c} \tag{5}$$

将式(6)代入式(5)中，可得

$$\begin{cases} u_{xN}^{*}=0 & x=\text{a, b, c} \\ u_{NO}^{*}=u_{xO}^{*} & \\ u_{yN}^{*}=u_{yO}^{*}-u_{xO}^{*} & y=\text{a, b, c}\text{且}y\neq x \end{cases} \tag{6}$$

将式(3)与式(6)结合，并引入式(2)中定义的输入电流进入过零畸变区判据 sign x，整体控制方法定义为

$$\begin{cases} u_{NO}^{*}=\sum\limits_{x=\text{a,b,c}} u_{xO}^{*}\cdot\text{sign } x \\ u_{xN}^{*}=u_{xO}^{*}-u_{NO}^{*} \end{cases} \quad x=\text{a, b, c} \tag{7}$$

在无功补偿控制策略框图基础上，输入电流过零畸变抑制策略控制框图如图 4 所示。

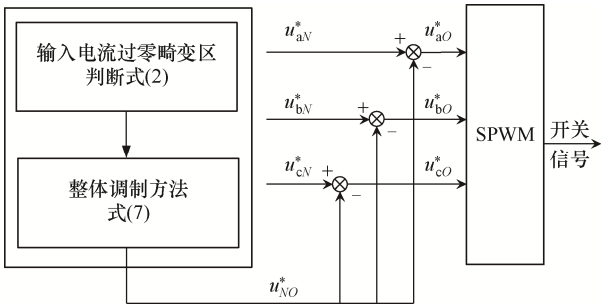


图 4 输入电流过零畸变抑制策略框图

Fig. 4 Block diagram of input current zero-crossing distortion suppression strategy

3 VIENNA 整流器无功功率补偿能力分析

VIENNA 整流器向负载侧输送不同有功功率时，提供额外无功功率补偿能力受到 2 个限制条件如下。

(1)VIENNA 向负载侧输送的有功功率及额外提供的无功功率的总容量不能超过额定视在功率容量。

(2)在总功率容量不超过额定视在功率容量的前提下，VIENNA 整流器输入电流总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)需满足国家标准[20]，即 THD≤5%。

因此，首先需要分析 VIENNA 整流器在额定功率范围内的最大功率因数角。VIENNA 整流器的视在功率 S 与有功功率 P 和功率因数角 θ 有关，可表示为

$$S=\sqrt{(1+\tan^{2}\theta)P^{2}} \tag{8}$$

假设额定视在功率 S_{N}=15 kVA 时，VIENNA 整流器的最大功率因数角 $\theta_{\max}$ 随 P 的变化曲线如图 5 所示。

基于 VIENNA 整流器能够运行的最大功率因数角，研究 VIENNA 整流器向负载侧输送有功功率 P、提供额外无功功率补偿容量 Q 及输入电流 THD 三者之间的关系。首先，分析当输送有功功率 P 一定时，输入电流 THD 与无功功率补偿容量 Q 的关系。以有功功率 P=5 kW 为例，搭建主参数

U_s=220 V、L=5 mH、C=2 200 μF、开关频率为 10 kHz 的 VIENNA 整流器仿真模型，该模型采用图 2 所示无功补偿控制策略，通过设定不同无功电流参考值 i_q^*，可实现输入电流超前或滞后输入电压，向电网提供容性或感性无功功率，从而实现无功补偿功能，并通过快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析记录 VIENNA 整流器提供不同无功补偿容量下，输入电流的 THD。最后通过采集的 24 组数据，绘制 VIENNA 整流器输送有功功率一定的情况下，输入电流 THD 与其提供无功功率容量 Q 的关系，如图 6 所示。

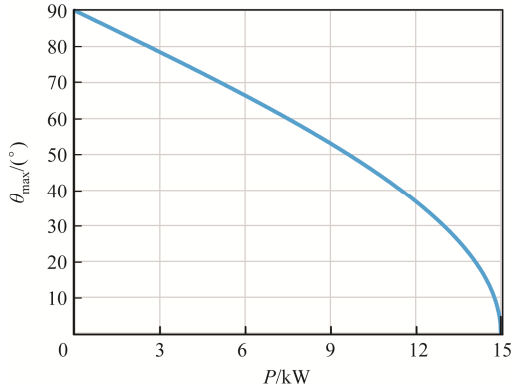


图 5　最大功率因数角 θ_{max} 与 VIENNA 整流器的有功功率 P 的关系

Fig. 5 Maximum power factor angle θ_{max} versus active power P of VIENNA rectifier

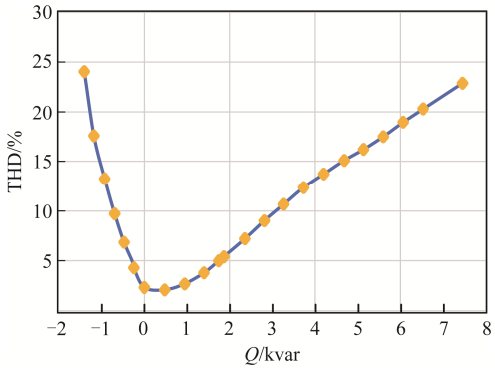
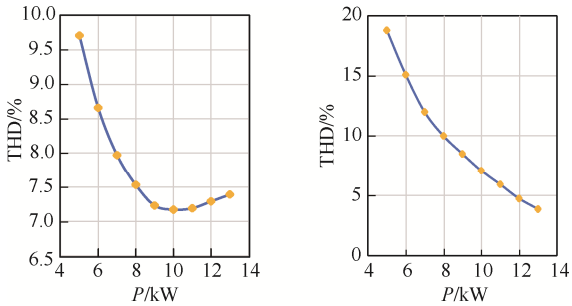


图 6　P=5 kW 时 THD 与 Q 的关系

Fig. 6 Relationship between THD and Q at P=5 kW

观察图 6 可知，当 VIENNA 整流器输出有功功率一定时，VIENNA 整流器提供额外无功功率补偿时，补偿能力越强，输入电流 THD 越大；且在 THD 不超过 5%的情况下，VIENNA 整流器提供感性无功功率补偿能力远大于提供容性无功功率补偿能力。

其次，分析当 VIENNA 整流器提供额外无功功率补偿容量 Q 一定时，VIENNA 整流器输出不同有功功率 P 与输入电流 THD 的关系。由图 7(a)可见，VIENNA 整流器提供容性无功功率容量 Q=−0.7 kvar 时，输入电流 THD 随着有功功率 P 的增大呈先减后增趋势；由图 7(b)可见，VIENNA 整流器提供容性无功功率容量 Q=6 kvar 时，输入电流 THD 随着有功功率 P 的增大而减小。

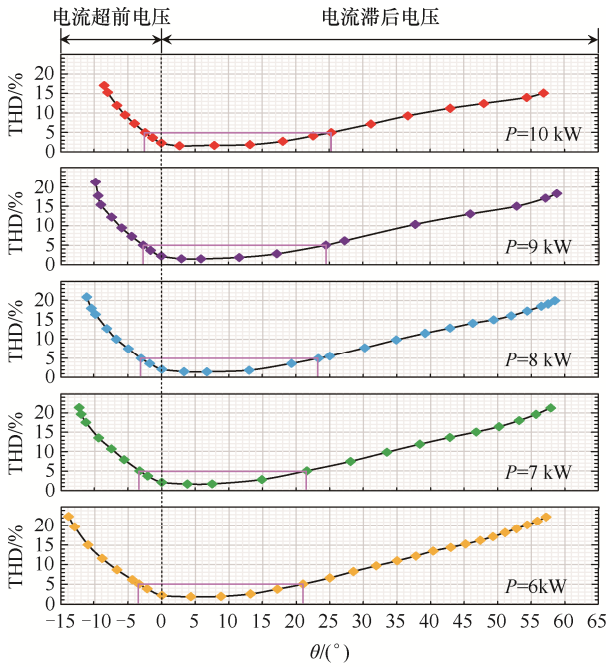


(a) Q=−0.7 kvar　　(b) Q=6 kvar

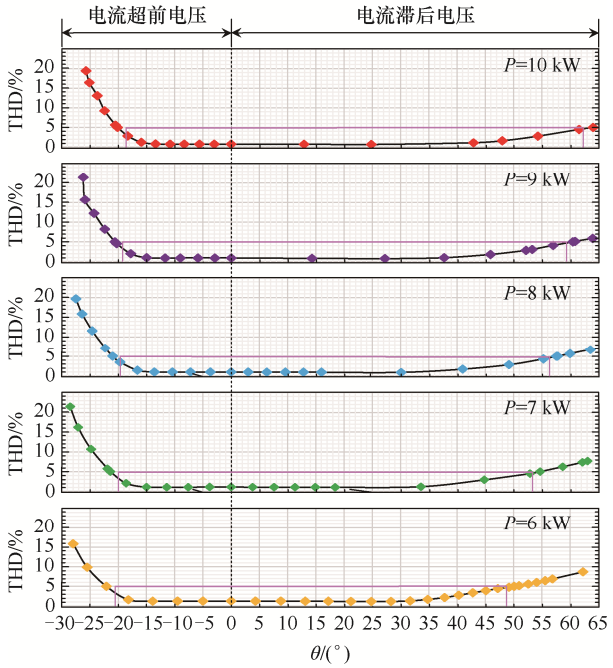
图 7　Q 一定时 THD 与 P 的关系

Fig. 7 Relationship between THD and P at a certain value of Q

图 8 分别给出了 VIENNA 整流器采用过零畸变抑制前后，在不同直流输出功率下，输入电流 THD 随功率因数角 θ 的变化曲线。以实际视在功



(a) 过零畸变抑制前



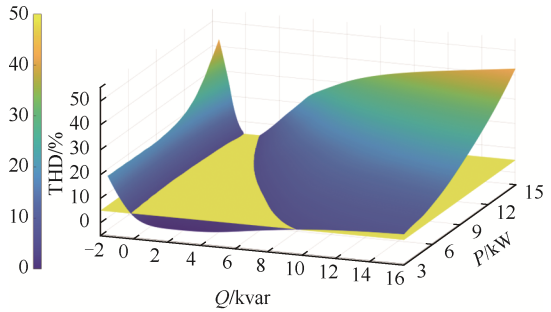
(b) 过零畸变抑制后

图 8 不同直流输出功率下输入电流 THD 随功率因数角 θ 的变化关系

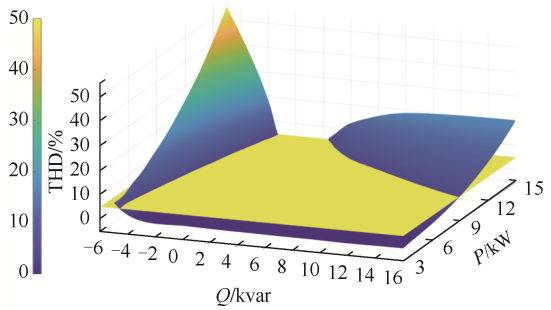
Fig. 8 Relationship between input current THD and power factor angle θ under different values of DC output power

率小于额定功率容量、输入电流 THD＜5%为限制条件，VIENNA 整流器提供无功功率补偿范围在矩形框定的区域内。随着直流输出功率等级的提升，VIENNA 整流器功率因数角的可调范围有所增大，不过超前功率因数可调范围非常有限。对比图 8(a)和(b)，通过观察图中矩形框定的区域范围可以看出，VIENNA 整流器采用过零畸变抑制后的功率因数角的可调范围远大于采用过零畸变抑制前，VIENNA 整流器在采用过零畸变抑制后可提高其额外无功功率补偿能力。

为了进一步表明输入电流过零畸变抑制对 VIENNA 整流器向负载侧输送不同有功功率时，提供额外无功功率补偿能力的影响，通过仿真采集 VIENNA 整流器提供额外无功功率补偿时 323 组数据(过零畸变抑制前)及 317 组数据(过零畸变抑制后)，绘制 VIENNA 整流器 *P*-*Q*-THD 关系三维图如图 9 所示，以及 THD=5%与额定视在功率限制下的 *Q* 与 *P* 关系(图 9 俯视图)如图 10 所示。



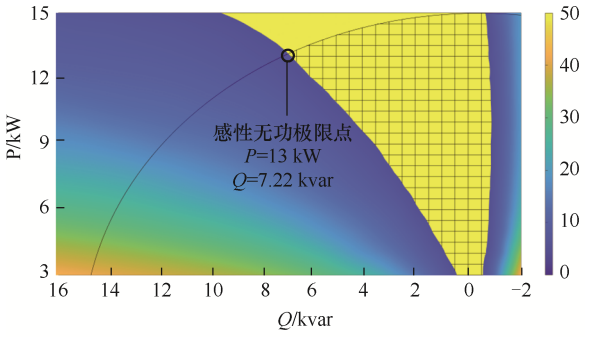
(a) 过零畸变抑制前



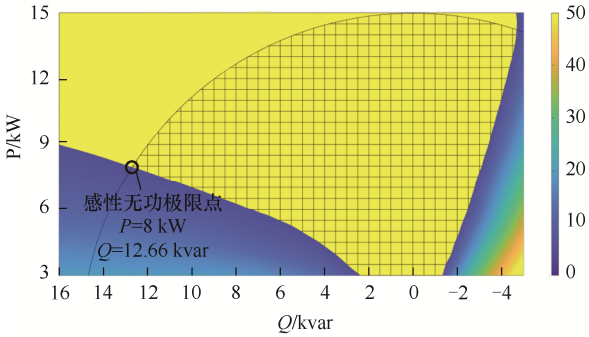
(b) 过零畸变抑制后

图 9 VIENNA 整流器 *P*-*Q*-THD 关系三维图

Fig. 9 3D diagram of *P*-*Q*-THD relationship of VIENNA rectifier



(a) 过零畸变抑制前



(b) 过零畸变抑制后

图 10 THD=5%与额定功率限制下的 *Q* 与 *P* 关系

Fig. 10 Relationship between *Q* and *P* under THD=5% and rated power limit

观察图 9 可知，x 轴为 VIENNA 整流器向负载侧输送的有功功率 P；y 轴为整流器提供的无功功率补偿容量 Q；z 轴为输入电流 THD；以 THD=5%为阈值的等值面与 P-Q-THD 三维关系曲面相交。可以清楚地观察到，VIENNA 整流器过零畸变抑制后的输入电流 THD 小于 5%的工作区域(阈值等值面以下)明显大于抑制前，进一步证明了本文所采用的控制方案有效抑制了 VIENNA 整流器的输入电流过零畸变，进而增强额外无功补偿能力。

由图 10 可见，黑色弧线是输入电流 THD=5%时，VIENNA 整流器额定视在功率 S_N=15 kVA 的曲线，由黑色弧线、THD=5%阈值等值面与 P-Q-THD 曲面的 2 条交线所围成的网格阴影区域，即表示 VIENNA 整流器向负载侧输送不同有功功率的同时能够提供额外无功功率范围。观察图 10(a)和(b)可知，当输入电流 THD 一定时，随着 VIENNA 整流器输送的有功功率 P 的增大，整流器提供的感性无功增大，容性无功功率呈先增大后减小的趋势，最后通过对比图 10(a)和(b)中的网格面积，再次表明本文所采用控制方案的有效性与可行性。

4　仿真验证

为了验证 VIENNA 整流器所采用输入电流过零畸变抑制策略的有效性与可行性，在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型与 VIENNA 整流器未采用输入电流过零畸变抑制进行对比研究，仿真模型的主要参数见表 1。

表 1　仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
交流侧电压有效值 U_s/V	220
电网基波频率 f_g/Hz	50
开关频率 f_s /kHz	10
交流侧输入电感 L/mH	5
直流侧稳压电容 C_1/μF	2 200
直流侧稳压电容 C_2/μF	2 200
直流侧参考电压 U^*_{dc}/V	800
额定视在功率 S/kVA	15

搭建输出有功功率 P=5 kW 的三相 VIENNA 整流器仿真实验平台如图 11 所示，主要包含主电路、控制模块及仿真结果展示模块。其中，控制模

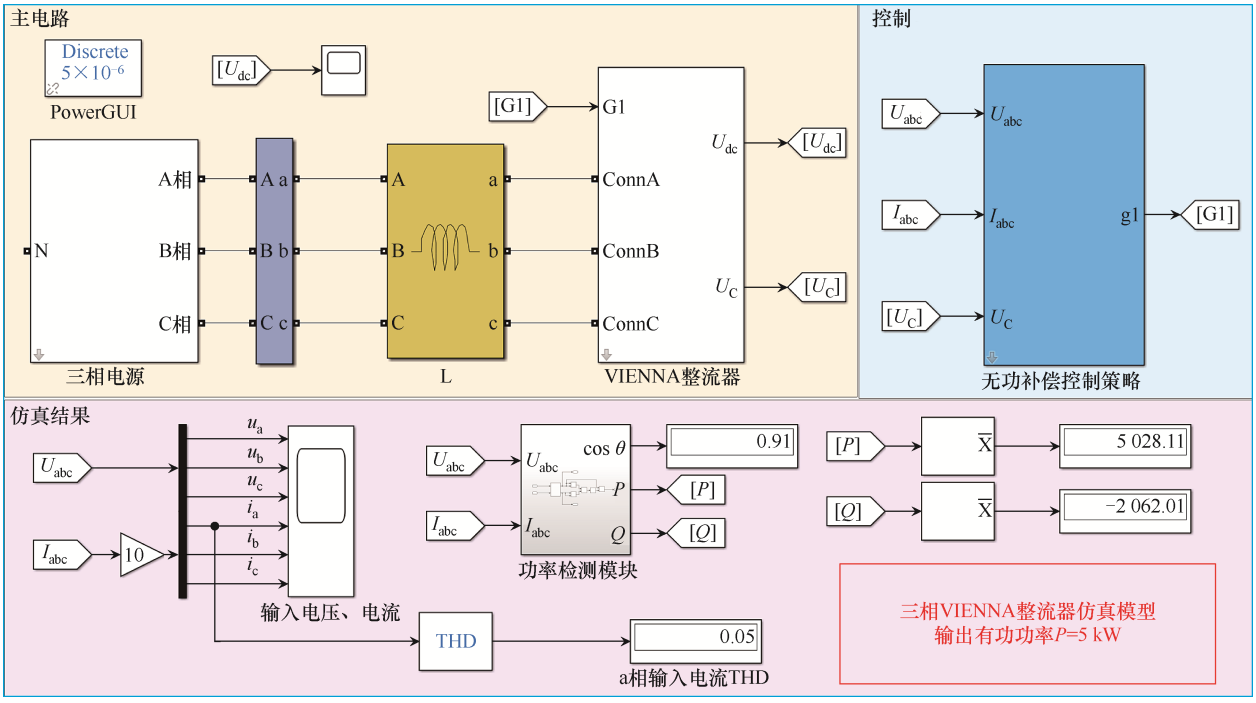


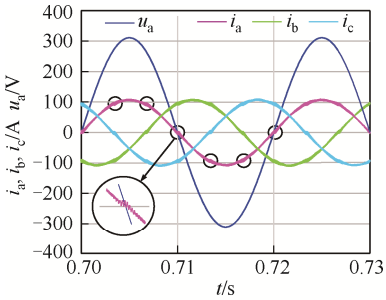
图 11　VIENNA 整流器仿真实验

Fig. 11 Simulation experiment of VIENNA rectifier

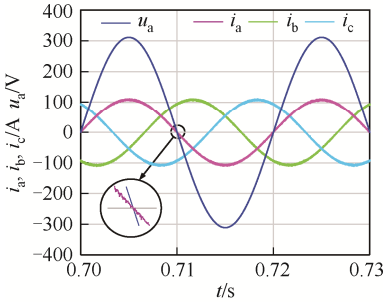
块主要起到无功补偿及输入电流过零畸变抑制作用；仿真结果展示中包含三相输入电压电流波形、a 相输入电流 THD，以及输出有功功率、提供额外无功功率。

仿真结果如图 12~图 15 所示。图 12~图 14 主要展示 VIENNA 整流器输入电流过零畸变抑制前后的输入电流波形对比及相对应的 THD 数值变化，从图 12(a)和(b)波形对比可以看出，三相 VIENNA 整流器以单位功率因数运行的 1 个周期内，过零畸变抑制前的 a 相输入电流存在 6 处过零畸变；过零畸变抑制后的 a 相输入电流展现出很好的过零畸变抑制效果。

观察图 13(a)与图 14(a)可知，三相 VIENNA 整流器在非单位功率因数下运行时，整流器提供无功补偿功能，过零畸变抑制前的电流波形存在明显畸



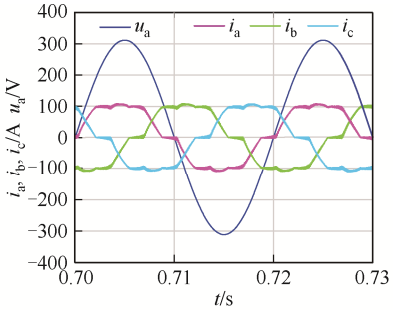
(a) 过零畸变抑制前



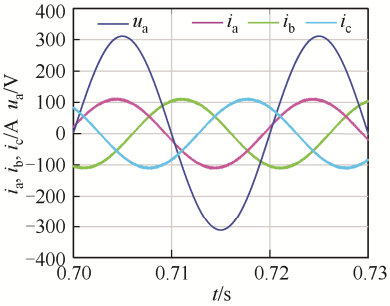
(b) 过零畸变抑制后

图 12 单位功率因数下运行

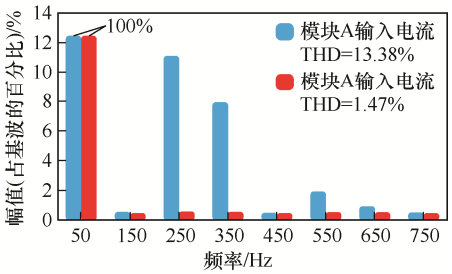
Fig. 12 Operation at unit power factor



(a) 过零畸变抑制前



(b) 过零畸变抑制后



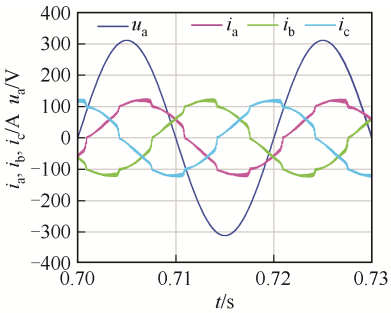
(c) 输入电流THD对比

图 13 超前功率因数下运行(提供容性无功功率)

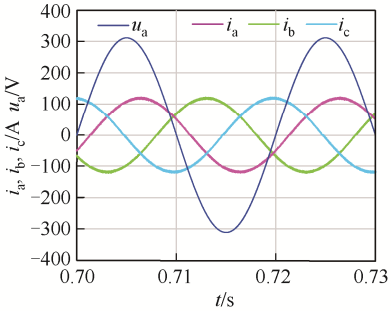
Fig. 13 Operation at advanced power factor

(providing capacitive reactive power)

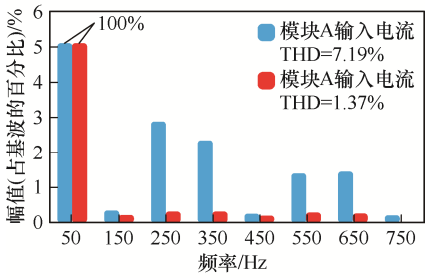
变，且此时电流 THD 分别达到 13.18%和 7.19%，超出国家标准；由图 13(b)与图 14(b)可见，过零畸变抑制后的电流波形得到了有效的畸变抑制，且 THD 分别降至 1.47%和 1.37%，均符合国家标准。过零畸变抑制前后的 a 相输入电流 THD 对比如图 13(c)与图 14(c)所示，图中 100%表示工频频率



(a) 过零畸变抑制前



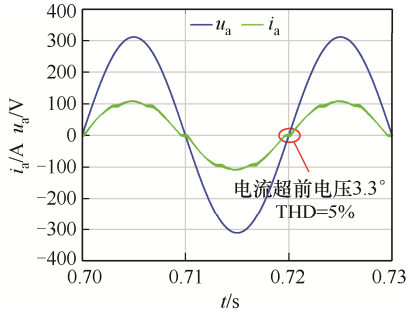
(b) 过零畸变抑制后



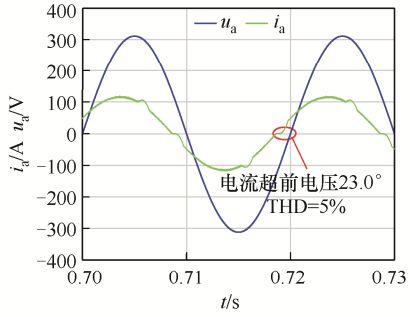
(c) 输入电流THD对比

图 14　滞后功率因数下运行(提供感性无功功率)

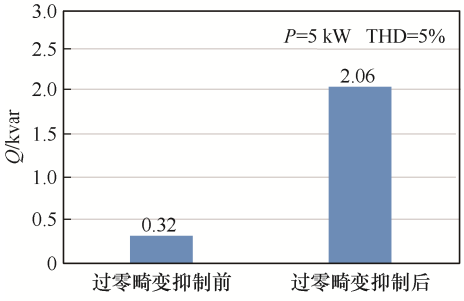
Fig. 14 Operation at lagging power factor (providing inductive reactive power)



(a) 过零畸变抑制前



(b) 过零畸变抑制后



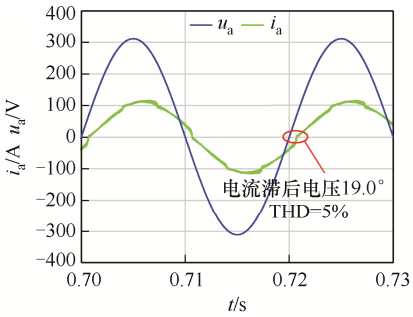
(c) 输出容性无功功率Q容量对比

图 15　P=5 kW、THD=5%下 VIENNA 整流器过零畸变抑制前后的电流波形及容性无功对比

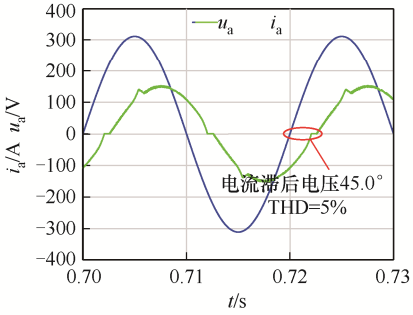
Fig. 15 Comparison of current waveform and capacitive reactive power of VIENNA rectifier before and after zero-crossing distortion suppression at P=5 kW and THD=5%

下，输入电流基波的含量为 100%。

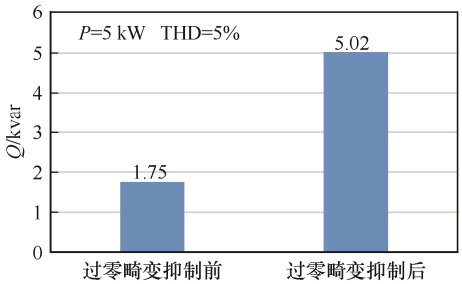
图 15 和图 16 主要展示输出有功功率 P=5 kW、输入电流 THD=5%下，在输入电流过零畸变抑制前后 VIENNA 整流器 a 相输入电压与输出电流波形及能够提供额外无功功率容量的对比。由图 15 可见，输入电流过零畸变抑制后，输入电流基波分量与输入电压的相角由 3.3° 扩大到 23.0°，提供容性无功功率容量由之前的 0.32 kvar 增加至 2.06 kvar；由图 16 可见，输入电流基波分量与输入电压的相角由 19.0° 扩大到 45.0°，提供感性无功功率容量



(a) 过零畸变抑制前



(b) 过零畸变抑制后



(c) 输出感性无功功率Q容量对比

图 16　P=5 kW、THD=5%下 VIENNA 整流器过零畸变抑制前后的电流波形及感性无功对比

Fig. 16 Comparison of current waveform and inductive reactive power of VIENNA rectifier before and after zero-crossing distortion suppression at P=5 kW and THD=5%

由之前的 1.75 kvar 增加至 5.02 kvar；验证了 VIENNA 整流器采用融合过零畸变抑制及无功补偿控制方法后，无功补偿能力极限有明显提升的有效性与可行性。

通过设定不同 VIENNA 整流器仿真实验平台参数，观察统计得到在输入电流 THD=5%的条件下，VIENNA 整流器提供额外无功功率 Q 随着有功功率 P 容量关系，见表 2。由表 2 数据可知，VIENNA 整流器提供额外感性无功容量 Q 随有功功率 P 增加而增加；提供容性无功容量 Q 随有功功率 P 增加先增后减。进一步验证了采用融合过零畸变抑制及无功补偿控制方法后，VIENNA 整流器向负载输送不同有功功率时，无功功率补偿能力有显著增加。

表 2 THD=5%下 VIENNA 整流器过零畸变抑制前后有功功率 *P* 与无功功率 *Q* 的容量关系

Tab. 2 Capacity relationship between active power *P* and reactive power *Q* before and after zero-crossing distortion suppression of VIENNA rectifier with THD=5%

有功功率 P/kW	容性无功功率 Q/kvar		感性无功功率 Q/kvar	
	过零畸变抑制前	过零畸变抑制后	过零畸变抑制前	过零畸变抑制后
5	0.32	2.06	1.75	5.02
6	0.36	2.45	2.30	7.21
7	0.40	2.75	2.78	9.92
8	0.43	3.08	3.44	12.75
9	0.43	3.39	4.11	15.97
10	0.42	3.67	4.74	20.67

5 结论

VIENNA 整流器作为应用广泛的单向能量流动整流器，存在固有的输入电流过零畸变现象，这是导致其提供额外无功功率补偿能力弱的主要原因。本研究采用了 1 种融合过零畸变抑制及无功补偿的控制方案，使得 VIENNA 整流器向负载侧输送有功功率的同时集成调节电能质量功能，并显著提升其额外无功功率补偿能力，得到如下结论。

(1)VIENNA 整流器具备提供无功功率补偿的能力，但由于其存在输入电流过零畸变问题，在提供感性或容性无功时，过零畸变现象更加明显，如果不采取过零畸变抑制策略，VIENNA 整流器提供无功补偿的能力非常有限。

(2)随着 VIENNA 整流器向负载输送有功容量的增加，整流器提供额外的感性无功补偿容量逐渐增加，提供额外容性无功功率补偿容量呈先增后减趋势。

(3)VIENNA 整流器向负载输送有功功率及提供额外无功功率补偿时，总的功率容量不能超过额定视在功率容量。

参考文献：

[1] Wang Cong, Tian Changgeng, Cheng Hong, et al. Control strategy of parallel unidirectional controlled rectifiers for reactive power compensation [C]// PCIM Asia 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, China, 2019: 1-7.

[2] Wang Yaodong, Li Yinghui, Huang Shun. An improved sliding mode direct power control strategy based on reactive power compensation for Vienna rectifier [J]. IEEE Access, 2022, 10: 15469-15477.

[3] Cheng Hong, Chen Ting, Wang Cong, et al. Single-phase bridgeless rectifier with capability of power quality management [C]// 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China, 2018: 1-6.

[4] 丁冠华, 田长庚, 吕嘉琪, 等. VIENNA 整流器并联实现静止无功补偿控制方法研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 135-140.
Ding Guanhua, Tian Changgeng, Lü Jiaqi, et al. Control method of VIENNA rectifiers in parallel to realize static reactive power compensation [J]. Coal Engineering, 2023, 55(4): 135-140. (in Chinese)

[5] 王正仕, 陈辉明. 具有无功补偿和谐波抑制功能的 PWM 整流器及其控制方法的研究[J]. 变流技术与电力

牵引, 2007(4): 36-39.
Wang Zhengshi, Chen Huiming. Simulation research on a novel rectifier and its control strategies with functions of reactive power compensation and harmonic current filtering [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007(4): 36-39. (in Chinese)

[6] 郭佳才, 罗安, 陈燕东, 等. 兼具无功补偿功能的模块化多电平整流器控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 297-303.
Guo Jiacai, Luo An, Chen Yandong, et al. A control strategy of modular multilevel rectifier with reactive power compensation function [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 297-303. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 雷永锋, 孙莉莉, 王振玉. 电动汽车直流充电桩电源模块研究与设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(9): 170-174.
Lei Yongfeng, Sun Lili, Wang Zhenyu. Research and design of power module for DC charging pile of electric vehicle [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(9): 170-174. (in Chinese)

[9] Islam M H, Masud M M R, Razzak M A. Power factor correction for wind power generation systems using modified Vienna rectifier [C]// 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). Vellore, India, 2020: 1-5.

[10] 陈新, 王赟程, 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.
Chen Xin, Wang Yuncheng, Song Weiping, et al. High frequency switching rectifier in HVDC power supply system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 152-159. (in Chinese)

[11] 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 Electronics, 2019, 34(1): 801-814.

[12] Mukherjee D, Kastha D. Voltage sensorless control of VIENNA rectifier in the input current oriented reference frame [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8079-8091.

[13] 汪凤翔, 杨奥, 于新红, 等. 基于自适应超螺旋滑模观测器的三相 Vienna 整流器无模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1859-1870.
Wang Fengxiang, Yang Ao, Yu Xinhong, et al. Model-free predictive current control for three-phase Vienna rectifier based on adaptive super-twisting sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1859-1870. (in Chinese)

[14] Park J H, Lee J S, Lee K B. Sinusoidal harmonic voltage injection PWM method for Vienna rectifier with an LCL filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2875-2888.

[15] 何黎鹏, 郭强, 肖蕙蕙, 等. 含负载前馈补偿的电流型 PWM 整流器改进无差拍控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 501-513.
He Lipeng, Guo Qiang, Xiao Huihui, et al. Improved deadbeat control of current-source PWM rectifiers with load feed-forward compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 501-513. (in Chinese)

[16] 徐菘, 杨博, 刘浩, 等. 一种提高虚拟同步机电流质量的电压-电流级联闭环控制方案[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1871-1885.
Xu Song, Yang Bo, Liu Hao, et al. A cascaded harmonic voltage and current closed-loop control method to improve the current quality of virtual synchronous generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1871-1885. (in Chinese)

[17] 丁俊, 苏建徽, 汪海宁, 等. 降低 Vienna 整流器电流失真的无功补偿方法[J]. 电力电子技术, 2023, 57(4): 32-37.
Ding Jun, Su Jianhui, Wang Haining, et al. Reactive power compensation method for reducing current distortion of Vienna rectifier [J]. Power Electronics, 2023, 57(4): 32-37. (in Chinese)

[18] 陈才学, 欧阳港, 王昭鸿, 等. 带过零畸变补偿的

Vienna 整流器改进滑模反推直接功率控制[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3996-4005.

Chen Caixue, Ouyang Gang, Wang Zhaohong, et al. Improved sliding-mode backstepping direct power control of Vienna rectifier with zero-crossing distortion compensation [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3996-4005. (in Chinese)

[19] 高梁, 张庆岩, 胡业波. 不对称电网下 Vienna 整流器改进的功率控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 172-179.

Gao Liang, Zhang Qingyan, Hu Yebo. Improved power control strategy for Vienna rectifier under asymmetric grid [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 172-179. (in Chinese)

[20] 谐波国家标准起草工作组. 电能质量 公用电网谐波(国家标准)的编制[J]. 中国电力, 1993, 26(11): 2-7.

Xiebo GB Drafting Group for Harmonic National Standards. Compilation of the National Standard “Power Quality – Harmonics in Public Supply Network” [J]. Electric Power, 1993, 26(11): 2-7. (in Chinese)



苏雄

作者简介：

苏雄(1997—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：sqt2100403056@student.cumtb.edu.cn。

崔志成(1999—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：ZQT2100403073@student.cumtb.edu.cn。

宋浩楠(1999—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：sqt2100403054@student.cumtb.edu.cn。

刘姿如(1999—)，女，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：sqt2200403055@student.cumtb.edu.cn。

程红(1966—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：高压大功率多电平功率变换器技术，开关变换器建模与控制。E-mail：chengh@cumtb.edu.cn。

王聪(1955—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：软开关电力电子变换技术，高压大功率电力电子变换器。E-mail：wangc@cumtb.edu.cn。

(责任编辑：耿越)