DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.172 中图分类号：TM461 文献标志码：A

# 不对称电网下 Vienna 整流器改进的功率控制策略

高 梁，张庆岩，胡业波
(合肥工业大学电气与自动化工程学院，合肥 230009)

**摘要：**针对由电网不对称引起的 Vienna 整流器有功功率波动和电流不对称问题，介绍了有功功率波动的抑制控制APFSC(active power fluctuation suppression control)和对称的正序电流控制SPSCC(symmetric positive-sequence current control)。由于受到功率器件的电流限制，采用 APFSC 会导致 Vienna 整流器运行的最大有功功率降低；采用 SPSCC 可以扩展 Vienna 整流器运行的最大有功功率，但有功功率波动较大。基于此，提出 1 种改进的功率控制 IPC(improved power control)策略。当 Vienna 整流器处理功率较小时，以保持有功功率无波动为首要目标，此时 IPC 与 APFSC 的效果一致，对比 SPSCC，IPC 可有效抑制有功功率的波动；当 Vienna 整流器处理功率较大时，以满足功率需求为首要目标，但尽可能地减小有功功率波动，此时 APFSC 无法满足功率需求，但 IPC 可以满足有功功率需求，且在满足功率需求的前提下，对比 SPSCC，IPC 下有功功率的波动更小。最后通过实验验证了控制方法的优越性。

**关键词：**Vienna 整流器；不对称电网；功率控制

# Improved Power Control Strategy for Vienna Rectifier under Asymmetric Grid

GAO Liang, ZHANG Qingyan, HU Yebo
(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aimed at the problems of active power fluctuation and current asymmetry of a Vienna rectifier caused by asymmetric grid, active power fluctuation suppression control (APFSC) and symmetric positive-sequence current control (SPSCC) are introduced. Due to the current limitation of power devices, the use of APFSC will reduce the maximum active power of the Vienna rectifier. In comparison, the use of SPSCC can expand its maximum active power at the cost of significant active power fluctuation. With the comprehensive consideration of disadvantages of the above two methods, an improved power control (IPC) strategy is proposed. When the processing power of the Vienna rectifier is small, keeping the active power without fluctuation is the primary control target. In this case, the effects of IPC and APFSC are the same. The active power fluctuation under IPC is effectively suppressed, while that under SPSCC is large. When the processing power of the Vienna rectifier is large, meeting the power demand is the primary control target, but the active power fluctuation should be reduced as much as possible. Under this circumstance, IPC can meet the active power demand, but APFSC cannot meet the power demand. On the premise of meeting the power demand, the fluctuation of active power under IPC is smaller than that under SPSCC. Finally, experimental results verified the advantage of the proposed control method.

**Keywords:** Vienna rectifier; asymmetric grid; power control

Vienna 整流器因其效率高、开关器件承受电压应力低且可靠性高的优点，在风力发电[1-2]、航天电源[3-4]及车载电源[5]等场合得到广泛应用。在实际应用中，电网电压受自身运行因素或外界环境的干扰可能出现不对称的情况。电网不对称产生的原因及其表现形式较多，最常见的电网电压不

**收稿日期：**2022-11-08；**修回日期：**2023-02-09；**录用日期：**2023-03-16；**网络首发日期：**2023-05-27

对称是电网电压单相跌落。文献[6]针对不平衡电网条件下变流器的控制策略进行了详细的讨论，不平衡电网下变流器的控制策略研究是当下热点；文献[7]指出电网电压不对称时会导致直流侧电压出现偶次谐波及输入电流出现奇次谐波。因此，为对称电网设计的 Vienna 整流器的控制策略将不再适用。

针对不对称电网下并网变流器的控制，经典控制方法将电网电压分解为正、负序分量[8-9]，在双 *dq* 坐标系下分别跟踪正、负序指令电流，这种控制方法适用范围广，通用性强，控制性能较好且易于实现。文献[10]将电网不对称度分为 2 种情况，在电网不对称度较低时抑制有功功率波动，在电网不对称度较高时抑制无功功率波动，采用分段控制拓宽了 Vienna 整流器的工作范围，然而该方法没有考虑到相电流不对称造成 Vienna 整流器的运行功率受限问题；文献[11]采用了有限集预测功率控制来抑制有功功率的波动，该方法跟踪性能好，且无超调问题，但只能适用于电网不对称度较低的情形；文献[12-13]将滑模控制引入到电流控制器中来适应不对称电网的情形，然而滑模面控制系数的选取较为复杂；文献[14]提出了 Vienna 整流器的 1 种基于无源性的自抗扰控制方法，具有较强的鲁棒性和快速跟踪性能，但尚未解决功率波动与电流平衡的协调问题；文献[15]将比例谐振 PR(proportional resonant)控制引入到 Vienna 整流器中，该方法结合了比例积分控制和滞环控制的优势，可消除电网不对称时的电流特定谐波，但 PR 调节器参数的设计比较困难；文献[16]针对平衡负载电压或平衡负载电流 2 种控制目标进行了讨论，并提出了 1 种基于负序补偿算法的平衡控制策略，且可以针对不同控制目标进行切换，但是这种控制目标依赖于在本地负载与公共耦合点之间加入补偿阻抗装置，并且只能满足 2 个控制目标中的 1 个。另外，当电网电压跌落时，由于受到 Vienna 整流器处理电流能力的限制，其带载能力必然降低，但少有论文讨论这一问题。

针对上述文献的分析，考虑功率器件电流的限制，本文提出 1 种改进的功率控制 IPC(improved power control)策略，以满足 Vienna 整流器的运行功率为前提，在不超过功率器件电流限制的条件下尽可能减小 Vienna 整流器的有功功率波动。

## 1　不对称电网下Vienna整流器的数学模型及其控制目标

### 1.1　不对称电网下 Vienna 整流器的数学模型

图 1 为 Vienna 整流器的主电路拓扑。图中：$e_x$ 为三相电网电压，其中 $x$=a, b, c；$i_x$ 为输入电流；$u_x$ 为 Vienna 整流器三相桥臂输出电压；$u_{C_1}$ 和 $u_{C_2}$ 分别为直流侧上、下电容电压；$L_s$ 和 $R_s$ 分别为网侧滤波器的电感和电阻；$C_1$ 和 $C_2$ 分别为直流侧上电容和下电容。

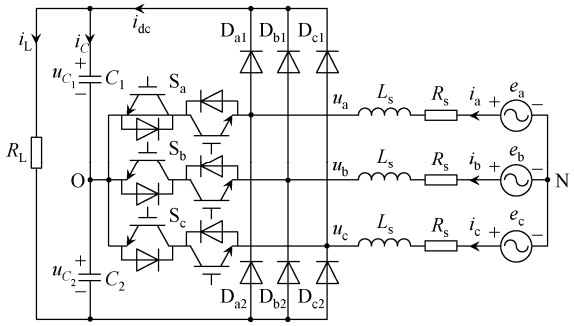



**图 1　Vienna 整流器拓扑**

**Fig. 1 Topology of Vienna rectifier**

三相静止坐标系下 Vienna 整流器的数学模型为

$$e_x = u_x + L_s \frac{\mathrm{d}i_x}{\mathrm{d}t} + R_s i_x \tag{1}$$

考虑到不对称电网会导致其含有正、负、零序分量，则

$$e_x = e_x^+ + e_x^- + e_x^0 \tag{2}$$

式中，上标“+、−、0”分别表示变量的正、负、零序分量。

因 Vienna 整流器采用三相无中线系统，零序分量不参与能量交换，可忽略零序分量的影响。为了更加直观地分析 Vienna 整流器的功率波动形式，对式(1)采用等功率 Clark 变换，得到 Vienna 整流器在两相静止坐标系下的数学模型为

$$e_{\alpha\beta}^{+-}=u_{\alpha\beta}^{+-}+L_{\mathrm{s}}\frac{\mathrm{d}i_{\alpha\beta}^{+-}}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_{\alpha\beta}^{+-} \tag{3}$$

式中，下标“$\alpha\beta$”代表在 $\alpha\beta$ 轴系下的变量。

再将两相静止坐标系下的变量通过 Park 变换为双 $dq$ 坐标系下的变量，则 Vienna 整流器在双 $dq$ 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases}e_d^+=u_d^+ + L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_d^+}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_d^+-\omega L_{\mathrm{s}}i_q^+\\ e_q^+=u_q^+ + L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_q^+}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_q^++\omega L_{\mathrm{s}}i_d^+\\ e_d^-=u_d^- + L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_d^-}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_d^-+\omega L_{\mathrm{s}}i_q^-\\ e_q^-=u_q^- + L_{\mathrm{s}}\dfrac{\mathrm{d}i_q^-}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_q^--\omega L_{\mathrm{s}}i_d^-\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\omega$ 为电网电压的角频率。双 $dq$ 坐标系的 Vienna 整流器的矢量图如图 2 所示。

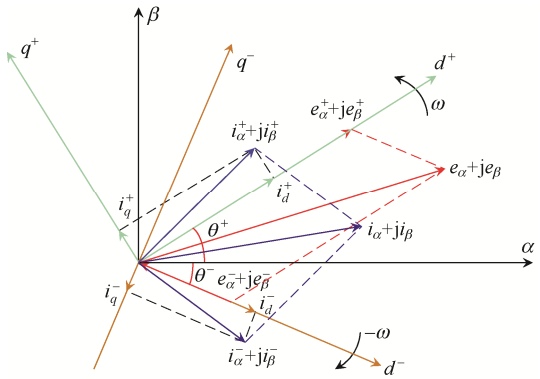



**图 2 Vienna 整流器在双 *dq* 轴系下的矢量**

**Fig. 2 Vector of Vienna rectifier under dual *dq* axes**

为了便于分析，采用标幺制系统，则不对称电网电压的正负序分量满足

$$e_d^{+*}+e_d^{-*}=e_d^*\leqslant 1 \tag{5}$$

式中，上标“*”代表变量的标幺值。

定义电网电压不对称度 $\delta$ 为

$$\delta=\frac{e_d^-}{e_d^+}\qquad \delta\in(0,1) \tag{6}$$

综合式(5)和式(6)可得

$$\begin{cases}e_d^{+*}=\dfrac{e_d^*}{1+\delta}\\ e_d^{-*}=\dfrac{\delta e_d^*}{1+\delta}\end{cases} \tag{7}$$

由于拓扑结构的限制，一般要求 Vienna 整流器工作于单位功率因数。基于瞬时功率理论可以得到在双 $dq$ 坐标系下电网电压不对称时的有功功率 $p$ 为

$$p=(e_d^+ + e_q^+ + e_d^- + e_q^-)\cdot(i_d^+ + i_q^+ + i_d^- + i_q^-) \tag{8}$$

进一步简化式(8)可得

$$p=p_0+p_{\mathrm{c}}\cos(\theta^+ +\theta^-)+p_{\mathrm{s}}\sin(\theta^+ +\theta^-) \tag{9}$$

式中：$\theta^+$和 $\theta^-$分别为电网电压正负序分量的瞬时相角；$p_0$、$p_{\mathrm{c}}$ 和 $p_{\mathrm{s}}$ 分别为有功功率的平均值、有功功率余弦分量幅值和正弦分量。

综合式(8)和式(9)可得

$$\begin{cases}p_0=e_d^+i_d^+ + e_q^+i_q^+ + e_d^-i_d^- + e_q^-i_q^-\\ p_{\mathrm{c}}=e_d^+i_d^- + e_q^+i_q^- + e_d^-i_d^+ + e_q^-i_q^+\\ p_{\mathrm{s}}=e_d^+i_q^- - e_q^+i_d^- - e_d^-i_q^+ + e_q^-i_d^+\end{cases} \tag{10}$$

根据图 2 中电网电压的定向原则可得

$$e_q^+=e_q^-=0 \tag{11}$$

则式(10)可简化为

$$\begin{cases}p_0=\dfrac{2}{3}(e_d^+i_d^+ + e_d^-i_d^-)\\ p_{\mathrm{c}}=\dfrac{2}{3}(e_d^+i_d^- + e_d^-i_d^+)\\ p_{\mathrm{s}}=\dfrac{2}{3}(e_d^+i_q^- - e_d^-i_q^+)\end{cases} \tag{12}$$

### 1.2 不对称电网下 Vienna 整流器的控制目标

电网电压不对称时，根据不同应用场合的需要，可以选择不同的控制目标。对 Vienna 整流器而言，可以分为功率无波动控制 APFSC(active power fluctuation suppression control)和对称的正序电流控制 SPSCC(symmetric positive-sequence current control)2 种控制策略。

出于 Vienna 整流器能量转换的需求，即使电网电压不对称，直流侧稳定仍是 Vienna 整流器的首要目标。为此，在控制平均功率的同时应抑制有功功率的波动，这种方法称为功率无波动控制。

设直流侧需求平均有功功率为 $p_0^*$，为了实现 APFSC，则有功功率波动的正弦量和余弦量均为 0。综合式(7)和式(12)可求解出 APFSC 下的参考电流正负序分量为

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{A}}^{+*}=\dfrac{p_0^*}{(1-\delta)e_d^*} \\ i_{q\mathrm{A}}^{+*}=0 \\ i_{d\mathrm{A}}^{-*}=-\dfrac{\delta p_0^*}{(1-\delta)e_d^*} \\ i_{q\mathrm{A}}^{-*}=0 \\ \left|i_{d\mathrm{A}}^*\right|=\left|i_{d\mathrm{A}}^{+*}\right|+\left|i_{d\mathrm{A}}^{-*}\right|=\dfrac{(1+\delta)p_0^*}{(1-\delta)e_d^*} \end{cases} \tag{13}$$

因为参考电流存在负序分量，所以 Vienna 整流器采用 APFSC 时，三相电流正弦但不对称。APFSC 正是利用电流的不对称消除电压的不对称，达到有功功率稳定。

当电网电压不对称时，SPSCC 的目标为获得三相对称的正序电流。因此应该使参考电流只有正序分量，消除负序分量，即

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{S}}^{-*}=0 \\ i_{q\mathrm{S}}^{-*}=0 \end{cases} \tag{14}$$

综合式(7)、式(12)和式(14)可求解出 SPSCC 下参考电流的正序分量为

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{S}}^{+*}=\dfrac{(1+\delta)p_0^*}{e_d^*} \\ i_{q\mathrm{S}}^{+*}=0 \end{cases} \tag{15}$$

## 2　改进的不对称电网下 Vienna 整流器的控制方法

在处理相同平均有功功率 $p_0^*$ 时，APFSC 和 SPSCC 下的电流满足

$$\left|i_{d\mathrm{A}}^*\right|==\frac{(1+\delta)p_0^*}{(1-\delta)e_d^*}>\left|i_{d\mathrm{S}}^*\right|=\frac{(1+\delta)p_0^*}{e_d^*} \tag{16}$$

在处理相同的平均功率时，APFSC 下的电流大于 SPSCC 下的电流。为了使 Vienna 整流器的电流不超过功率器件的电流限额，APFSC 下电流的限制条件为

$$\left|i_{d\mathrm{A}}^{+*}\right|+\left|i_{d\mathrm{A}}^{-*}\right|\leqslant i_{dq,\max}^*=1 \tag{17}$$

式中，$i_{dq,\max}^*$ 为电流限额最大值的标幺值。

当 Vienna 整流器采用 APFSC 时，根据第 1 节的分析可知，此时三相输入电流不对称。随着平均有功功率从 0 不断加大，考虑到相电流的限制，三相电流中的一相会首先达到限定值。当某一相电流达到该限定值时对应的 $p_0^*$ 为关键功率 1 即 CP1 (crisis power 1)。CP1 是 APFSC 在相电流限定条件下能够处理的最大功率。令 $\left|i_{d\mathrm{A}}^{+*}\right|+\left|i_{d\mathrm{A}}^{-*}\right|=1$，代入式(13)可得

$$p_{\mathrm{CP1}}^*=\frac{1-\delta}{1+\delta}e_d^* \tag{18}$$

当 Vienna 整流器的运行功率小于 CP1 时，APFSC 可以实现有功功率波动为 0 且电流不超过限定值。

当平均有功功率超过 CP1 后，APFSC 下的电流会超出限定值，此时 APFSC 不再适用。若需要满足更大的 Vienna 整流器运行功率，应保持最大相电流不变，其余两相电流增大。当三相电流均达到限定值，此时对应 SPSCC 所能处理的最大有功功率 $p_0^*$ 为关键功率 2 即 CP2(crisis power 2)。令式(17)中的 $i_d^{+*}=1$ 即可解出 CP2 为

$$p_{\mathrm{CP2}}^*=\frac{e_d^*}{1+\delta} \tag{19}$$

当 $p_0^*$ 介于 CP1 和 CP2 之间时，应采用改进的功率控制策略。此时应满足如下条件：①三相电流不超过限定值；②有功功率波动尽可能小。在 IPC 中将 $p_0^*$ 分配为 APFSC 对应的 $p_{0\mathrm{A}}^*$ 和 SPSCC 对应的 $p_{0\mathrm{S}}^*$。结合式(13)~式(15)和式(17)可得

$$\begin{cases} \dfrac{(1+\delta)p_{0\mathrm{S}}^*}{e_d^*}+\dfrac{p_{0\mathrm{A}}^*}{(1-\delta)e_d^*}+\dfrac{\delta p_{0\mathrm{A}}^*}{(1-\delta)e_d^*}=1 \\ p_{0\mathrm{A}}^*+p_{0\mathrm{S}}^*=p_0^* \end{cases} \tag{20}$$

联立式(13)、式(15)和式(20)可得 IPC 下的总电流给定值 $i_{d,\mathrm{IPC}}^{+*}$、$i_{d,\mathrm{IPC}}^{-*}$ 分别为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{IPC}}^{+*}=i_{d\mathrm{S}}^{+*}+i_{d\mathrm{A}}^{+*}=\dfrac{p_0^*}{e_d^*}+\dfrac{\delta}{1+\delta} \\ i_{d,\mathrm{IPC}}^{-*}=i_{d\mathrm{A}}^{-*}=\dfrac{p_0^*}{e_d^*}-\dfrac{1}{1+\delta} \end{cases} \tag{21}$$

综上，IPC 的电流给定计算方法为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{IPC}}^{+*}=\dfrac{p_0^*}{(1-\delta)e_d^*} & p_0^*\leqslant p_{\mathrm{CP1}}^* \\ i_{d,\mathrm{IPC}}^{-*}=\dfrac{\delta p_0^*}{(1-\delta)e_d^*} & p_0^*\leqslant p_{\mathrm{CP1}}^* \\ i_{d,\mathrm{IPC}}^{+*}=\dfrac{p_0^*}{e_d^*}+\dfrac{\delta}{1+\delta} & p_{\mathrm{CP1}}^*<p_0^*\leqslant p_{\mathrm{CP2}}^* \\ i_{d,\mathrm{IPC}}^{-*}=\dfrac{p_0^*}{e_d^*}-\dfrac{1}{1+\delta} & p_{\mathrm{CP1}}^*<p_0^*\leqslant p_{\mathrm{CP2}}^* \end{cases} \tag{22}$$

## 3 控制系统设计与实现

根据第 1 节和第 2 节的分析，图 3 给出了本文所提算法的控制框图。系统采用 PI 外环维持直流侧稳定，其输出与电网未跌落时的 $d$ 轴分量 $e_d$ 相乘得到有功功率给定值 $p_0$。通过正负序分离及式(6)计算出电网的不对称度 $\delta$，再由式(18)和式(19)分别得到 Vienna 整流器能够处理的关键功率的标幺值 $p_{\mathrm{CP1}}^*$ 和 $p_{\mathrm{CP2}}^*$。将 $p_0$ 换算成标幺值后与 $p_{\mathrm{CP1}}^*$ 和 $p_{\mathrm{CP2}}^*$ 进行比较，当 $p_0^*<p_{\mathrm{CP1}}^*$ 时，采用 APFSC；当 $p_{\mathrm{CP1}}^*\leqslant p_0^*\leqslant p_{\mathrm{CP2}}^*$ 时，采用 IPC，参考电流由式(22)确定。系统的电流控制器采用无差拍控制 DBC(deadbeat control)算法[17]，DBC 输出 $\alpha\beta$ 轴系下的调制电压，通过反 Clark 变换得到调制波，最终通过 PWM 调制技术来驱动功率器件。

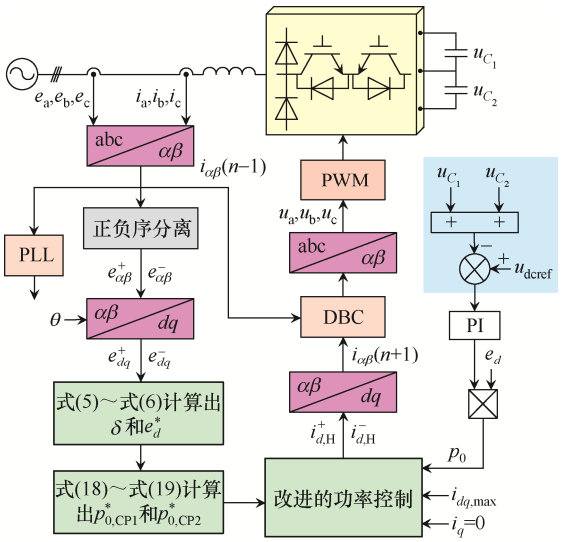



**图 3 Vienna 整流器的控制结构**

**Fig. 3 Control structure of Vienna rectifier**

## 4 实验验证

为了验证所提方法的可行性和优势，搭建 1 台 Vienna 整流器实验样机，如图 4 所示。主控芯片采用 TMS320F28374S 型 DSP，IGBT 的型号为 MMG150CE065PD6EN，系统主要参数见表 1。

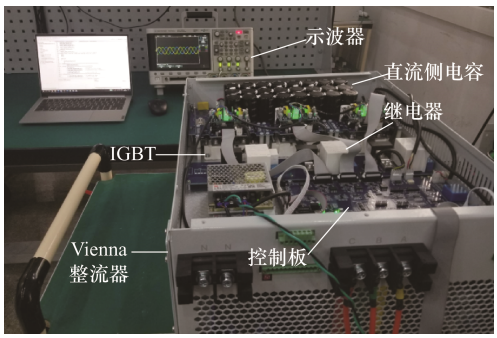



**图 4 实验样机**

**Fig. 4 Experimental prototype**

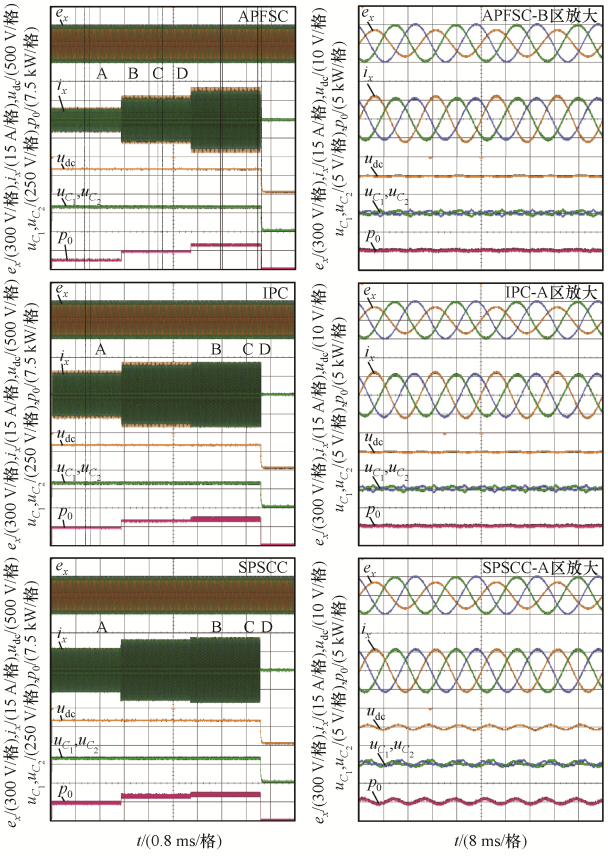
**表 1 系统参数**

**Tab. 1 Parameters of system**

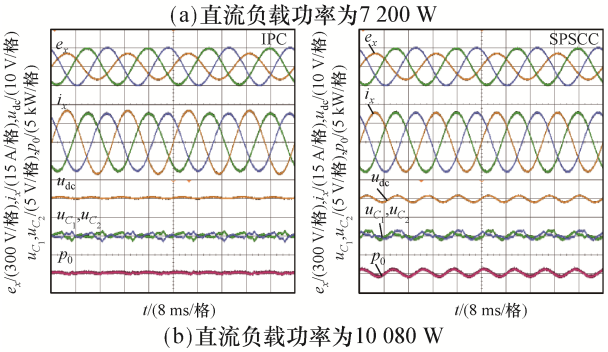
| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 直流侧电压/V | 600 |
| 直流侧上下电容/μF | 1 000 |
| 电网相电压/V | 220 |
| 网侧输入电感/mH | 3 |
| 相电流限定峰值/A | 25 |
| 开关频率/kHz | 10 |
| 基波频率/Hz | 50 |
| 负载 1/Ω | 50 |
| 负载 2/Ω | 125 |
| 负载 3/Ω | 600 |
| 负载 4/Ω | 400 |

图 5 为 A 相电网电压跌落 20%时，分别采用 APFSC、SPSCC 及 IPC 的实验结果。此时 CP1 和 CP2 分别为 10 045 W 和 10 817 W，通过投切直流侧电阻，使负载功率不断增加。图 5(a)对应直流负载为 7 200 W 的工况，对比图 5(a)中 3 种控制方法的实验结果，可以看出 Vienna 整流器处理相同负载功率时，在 APFSC 和 IPC 下，系统的直流侧电压、网侧电流、有功功率和直流侧上下电容电压波形是一致的，说明了在 CP1 以下时 IPC 等效于

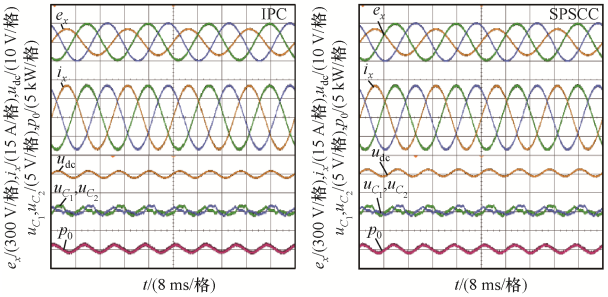
APFSC，可以消除输入功率波动，直流侧波动较小；图 5(b)对应直流负载为 10 080 W 的工况，由图 5(b)




(a)直流负载功率为7 200 W




(b)直流负载功率为10 080 W



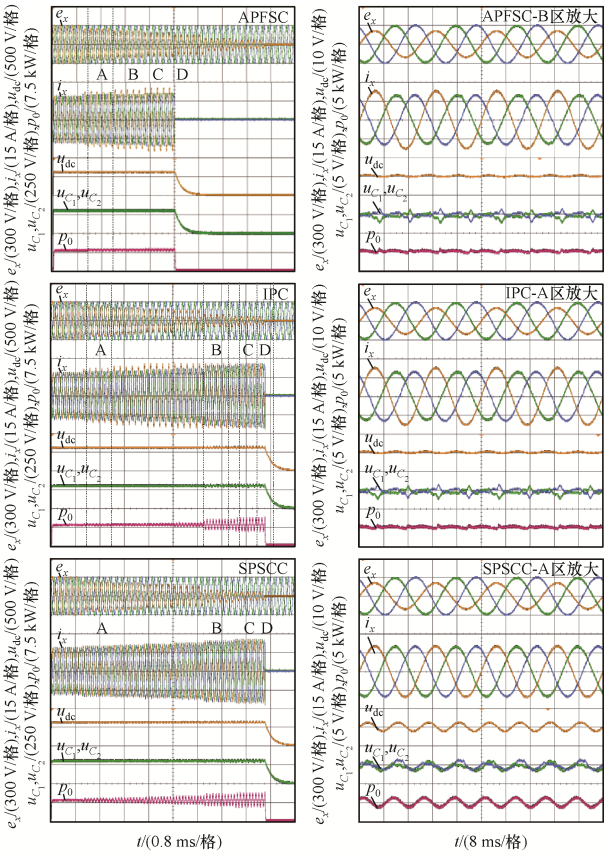

(c)直流负载功率为10 817 W

**图 5　逐渐增加给定有功功率下的实验结果**

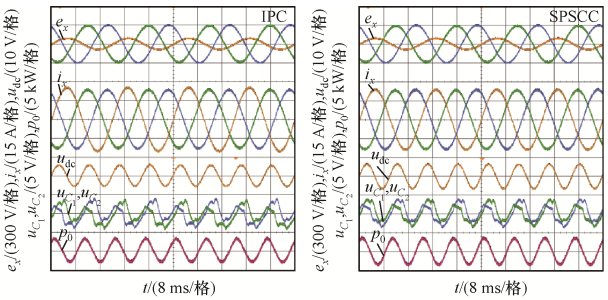
**Fig. 5 Experimental results with gradually increasing active power**

可知，此时 Vienna 整流器处理的有功功率介于 CP1 和 CP2 之间，IPC 下 Vienna 整流器的有功功率波动及直流侧波动均小于 SPSCC；图 5(c)对应直流负载为 10 817 W 的工况，由图 5( c )可知，此时 Vienna 整流器处理功率达到 CP2，说明在 CP2 时，IPC 等效于 SPSCC，可以消除输入功率波动，直流侧波动较小。综合比较实验结果，可以看出 APFSC 可以有效消除输入功率波动，考虑到相电流的限制，APFSC 能够处理的最大功率较小。相较于 APFSC，SPSCC 可以有效提高 Vienna 整流器的功率处理能力，但具有输入功率波动较大的缺点，造成直流侧电压波动较大。IPC 兼容了 APFSC 和 SPSCC 的优点，既可以使输入功率波动变小，也可以提升 Vienna 整流器的功率处理能力。

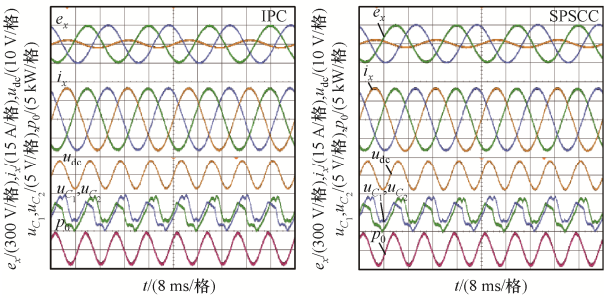
图 6 为 A 相电网电压从额定值连续跌落到 0 并维持直流侧负载功率 7 200 W 时，分别采用 APFSC、SPSCC 及 IPC 的实验结果。图 6(a)对应 A 相电网电压跌落 20%的工况，由图 6(a)可以看出，




(a)A相电网电压跌落20%




(b)A相电网电压跌落60%




(c)A相电网电压跌落80%

**图 6 逐渐增加电网不对称度下的实验结果**

**Fig. 6 Experimental results with gradually increasing grid asymmetry**

在相同的较小电网电压不对称度下，APFSC 和 IPC 下系统的实验波形保持一致；图 6(c)对应 A 相电网电压跌落 80%的工况，由图 6(c)可以看出，在较大的电网电压不对称度下，此时 Vienna 整流器能够处理的有功功率等于 CP2，SPSCC 和 IPC 下系统的实验波形保持一致。随着电网不对称度的加大，图 6(b) 对应 A 相电网电压跌落 60%的工况，由图 6(b)可以看出，此时 Vienna 整流器处理的有功功率介于 CP1 和 CP2 之间，IPC 下的有功功率波动及直流侧波动均小于 SPSCC，IPC 此时兼有 APFSC 和 SPSCC 的优点。

为了综合评价所提出的方法，不同控制策略的比较见表 2。

**表 2 不同控制策略的对比**

**Tab. 2 Comparison among different control strategies**

| 控制策略 | 相同电网不对称度下运行的最大有功功率 | 相同运行功率下支持的最大电网不对称度 | 相同负载功率下的有功功率波动 |
|---|---|---|---|
| APFSC | 低 | 低 | 几乎为 0 |
| SPSCC | 高 | 高 | 大 |
| IPC | 与 SPSCC 相同 | 与 SPSCC 相同 | 介于 APFSC 和 SPSCC 之间 |

## 5 结语

本文分析了不对称电网下 Vienna 整流器的 2 种控制目标，介绍了相应的控制策略。在电网不对称的前提下，为了增加 Vienna 整流器所能处理的最大有功功率及降低有功功率的波动，提出了 1 种改进的功率控制策略。实验结果表明，在电网不对称的条件下，相较于 APFSC，所提出的控制策略提高了 Vienna 整流器运行的最大功率；相较于 SPSCC，所提出的控制策略减小了 Vienna 整流器有功功率和直流侧电压的波动。

**参考文献：**

[1] Monteiro A P, Jacobina C B, Bahia F A C, et al. AC-DC power conversion systems for open-end winding PMSM based on Vienna rectifiers [C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA, 2019: 2156-2163.

[2] Chen Hao, Aliprantis D C. Analysis of squirrel-cage induction generator with Vienna rectifier for wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 967-975.

[3] 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]. 电工技术学报, 2020, 35(24): 5152-5163.
Hao Zhenyang, Xu Ziliang, Chen Yu, et al. Fault diagnosis and fault tolerant control for aviation Vienna rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(24): 5152-5163. (in Chinese)

[4] Xu Ziliang, Ren Xiaoyong, Zheng Zhihao, et al. A quadrature signal-based control strategy for Vienna rectifier under unbalanced aircraft grids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5280-5289.

[5] 史明明, 尹思浩, 张宸宇, 等. VIENNA 整流器过零补偿和中点电位平衡策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(9): 6-10, 19.
Shi Mingming, Yin Sihao, Zhang Chenyu, et al. A zero-crossing compensation and neutral voltage balance strat-

egy for VIENNA rectifier [J]. Power Electronics, 2021, 55(9): 6-10, 19. (in Chinese)

[6] 江友华，陈芳，赵乐，等. 不平衡电网电压条件下 MMC 控制策略综述[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 74-87.
Jiang Youhua, Chen Fang, Zhao Le, et al. Review of control strategies for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87. (in Chinese)

[7] Kim S P, Song S G, Park S J, et al. Imbalance compensation of the grid current using effective and reactive power for split DC-link capacitor 3-leg inverter [J]. IEEE Access, 2021, 9: 81189-81201.

[8] Rodriguez P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.

[9] Castilla M, Miret J, Sosa J L, et al. Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2930-2940.

[10] 曹穆, 许嘉沄, 王珊珊, 等. 不平衡电网下 Vienna 整流器无差拍预测控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(4): 4-6, 11.
Cao Mu, Xu Jiayun, Wang Shanshan, et al. Deadbeat prediction control of Vienna rectifier under unbalanced power grid [J]. Power Electronics, 2022, 56(4): 4-6, 11. (in Chinese)

[11] 冯兴田，崔晓，马文忠，等. 基于电网不平衡的三相 Vienna 整流器双闭环控制策略[J]. 电网技术，2021, 45(5): 1976-1984.
Feng Xingtian, Cui Xiao, Ma Wenzhong, et al. Double closed-loop control strategy of three-phase Vienna rectifier based on unbalanced grid [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1976-1984. (in Chinese)

[12] 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]. 电源学报, 2022, 20(3): 52-61.
Li Shan, He Wutong, Guo Qiang, et al. Sliding mode control strategy for Vienna rectifier under unbalanced grid voltage conditions [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 52-61. (in Chinese)

[13] 薛彪，党超亮. 基于滑模变结构的 Vienna 整流器控制研究[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 62-70.
Xue Biao, Dang Chaoliang. Research on control of Vienna rectifier based on sliding mode variable structure [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 62-70. (in Chinese)

[14] Li Jianguo, Wang Mian, Wang Jing, et al. Passivity-based control with active disturbance rejection control of Vienna rectifier under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Access, 2020, 8: 76082-76092.

[15] Adhikari J, Iv P, 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.

[16] 屈艾文，韦道洲，薛建华. 不平衡电网下并网逆变系统平衡控制策略研究[J/OL]. 电源学报，1-10. (2024-09-10)[2025-09-01]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240909.1800.002.
Qu Aiwen, Wei Daozhou, Xue Jianhua. Research on balance control strategy of grid-connected inverter system under unbalanced grid [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-10. (2024-09-10)[2025-09-01]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240909.1800.002.

[17] 姜卫东，汪磊，皋艳，等. 一种实现内环电流跟踪的改进无差拍控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2370-2383.
Jiang Weidong, Wang Lei, Gao Yan, et al. An improved deadbeat control method to implement current tracking for inner loop [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2370-2383. (in Chinese)



高梁

**作者简介：**

高梁(1999—　)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：三电平变流器。E-mail：2020110409@mail.hfut.edu.cn。

张庆岩(1995—　)，男，博士研究生。研究方向：电力电子与电机控制。E-mail：2021010038@mail.hfut.edu.cn。

胡业波(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：三电平变流器。E-mail：2020110373@mail.hfut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)