

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209934

Vienna 整流器网压重构功率控制*

向文凯,郭 强,肖蕙蕙,陈 岚,胡前云
(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要:在电网电压不平衡下采用双闭环 PI 控制策略需对电网电压正负序分量分别控制,同时其参数整定较为复杂、稳定性能较差。为了简化在不平衡下的控制结构,提高系统的整体控制效果,提出了一种在电网不平衡下的 Vienna 整流器网压重构功率控制策略。首先,通过在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下对电网不平衡电压采用网压重构控制进行处理,减少了坐标变换,取消了正负序分量分离;然后,从优化整定参数复杂性的角度,建立以瞬时功率理论为基础的预测功率数学模型,取消了 PI 控制器参数的整定;最后,通过在 MATLAB/Simulink 中搭建基于网压重构的预测功率控制与 PI 双闭环控制策略的仿真模型进行对比分析。对比分析表明,相比于传统 PI 控制策略,控制策略在电网不平衡下降低了网侧电流总畸变率约 70%,在电网不平衡且负载突变下降低了约 40%,并进一步在实验平台上验证了该控制策略的可行性。

关键词:三相 Vienna 整流器;电网电压不平衡;网压重构控制;预测功率控制
中图分类号: TM46 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Grid voltage reconfiguration predictive power control of Vienna rectifiers

Xiang Wenkai, Guo Qiang, Xiao Huihui, Chen Lan, Hu Qianyun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: When the grid voltage is unbalanced, the double closed-loop PI control strategy needs to control the positive and negative sequence components of the grid voltage separately. Its parameter setting is complicated and the stability performance is poor. To simplify the control structure under unbalanced condition and improve the overall control effect of the system, a power control strategy for Vienna rectifier grid voltage reconfiguration under grid unbalanced condition is proposed. Firstly, by using grid voltage reconfiguration control to deal with the unbalanced voltage of the grid in the $\alpha\beta$ two-phase static coordinate system, the coordinate transformation is reduced and the separation of positive and negative sequence components is cancelled. Then, from the perspective of optimizing the complexity of tuning parameters, a mathematical model of predicted power based on instantaneous power theory is formulated, and the tuning of PI controller parameters is cancelled. Finally, the comparison and analysis are implemented by building the simulation model of the predictive power control based on the network voltage reconstruction and the PI double closed-loop control strategy in MATLAB/Simulink. Compared with the traditional PI control strategy, the analysis shows that this control strategy reduces the total distortion rate of grid-side current by about 70% under grid unbalance, and about 40% under grid unbalance and load mutation. The feasibility of the control strategy is evaluated on the platform.

Keywords: three phase Vienna rectifier; grid unbalance; grid voltage reconfiguration control; predictive power control

0 引 言

随着电力电子技术的发展,Vienna 整流器因其自身结构优势所具有的诸多优点,受到了国内外相关学者的

关注,并被应用于风能、汽车充电、电源、电网相关领域和其他设备中^[1-4]。

目前,有关 Vienna 整流器控制策略的研究多数在电网电压平衡条件下进行,但在电网运行过程中,由于受到各种因素的影响,电网电压不平衡现象时有发生。此时,

收稿日期:2022-06-10 Received Date: 2022-06-10

* 基金项目:重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-201901102)、重庆市研究生科研创新项目(CYS22644)资助

若仍采用电网电压平衡下的控制策略会出现网侧电流谐波污染较大、输出直流电压不稳定等问题,不利于 Vienna 整流器系统的稳定运行。因此,在电网电压不平衡条件下有关控制策略的研究具有一定的意义。

Vienna 整流器在电网电压不平衡条件下的控制策略偏少。文献[5]提出了改进型控制策略,实现了网侧三相电流的谐波抑制,但控制模块中解耦锁相环的设计相对复杂且不易实现。文献[6]采用将自抗扰控制与无源控制相结合的混合控制策略,避免了电网电压正负序分量分离,结构简单,但该控制策略算法较为复杂。文献[7]提出了改进型 PR 控制策略,降低了谐波污染与输入电流的谐波失真,但 PR 控制器参数的整定过程较为繁琐。文献[8]通过在三相自然坐标系下实现对电网电压不平衡条件下 Vienna 整流器的控制,无需坐标变换,简化了控制结构,但该控制策略无法应用于电网电压突变较大的情况下,限制了应用范围。文献[9]在调制中加入零序分量,改善了 Vienna 整流器的直流侧输出电压,并减少了网侧电流的谐波污染,但降低了系统的动态性能。文献[10]对不同控制目标分别计算功率补偿量得到功率参考值,有效抑制了有功功率纹波与负序电流,但无法同时兼顾多个控制目标,使其控制效果得到了限制。文献[11]提出的新型双闭环控制,内环采用有限控制集模型预测控制,外环采用 ADRC 控制,抑制了网侧输入电流中的三次谐波污染,实现了 Vienna 整流器在电网不平衡下的稳定运行。但对网侧电压采用延迟 90° 的方法,使得设计原理变得较为复杂。文献[12-13]给出了在 abc 坐标系下有关电网电压不平衡的控制策略,虽然减少了坐标变换,但对正负序分量进行分别控制使得控制器数量较多,调参较为复杂。文献[14]在单周期控制的基础上引入谐振控制器,降低了网侧输入电流谐波含量,但单周期控制的固有问题未得到解决。

针对 Vienna 整流器在电网电压不平衡下控制策略不足的问题,本文首先分析了 Vienna 整流器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的预测功率数学模型,并基于此提出了 Vienna 整流器的网压重构功率控制。该控制策略通过网压重构控制模块对网侧三相电压进行重构,形成平衡的参考电压输入至预测功率模块,再通过预测功率模块计算出的电压矢量输入至空间矢量调制中控制功率开关管的运行,实现 Vienna 整流器的稳定良好运行。并利用仿真与实验分析,验证了该控制策略简化了控制结构、具有低谐波、高功率因数等优点。

1 三相 Vienna 整流器的数学模型

Vienna 整流器的主电路拓扑图如图 1 所示。其中, E_a 、 E_b 、 E_c 为网侧的三相电压源; R 为网侧寄生电阻; L 为

网侧升压电感; C_1 、 C_2 分别为 Vienna 整流器直流侧上下电容,且 $C_1 = C_2 = C$; R_{load} 为直流侧负载电阻; S_{a1} 、 S_{a2} 为 IGBT 开关器件。

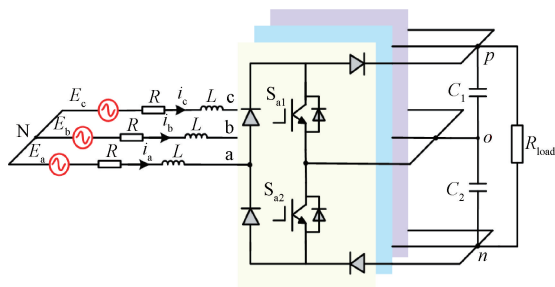


图1 Vienna 整流器主电路拓扑结构

Fig. 1 Diagram of Vienna rectifier main circuit topology

从三相 Vienna 整流器的主电路拓扑图可得其数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = E_a - Ri_a - (u_{ao} + u_{oN}) \\ L \frac{di_b}{dt} = E_b - Ri_b - (u_{bo} + u_{oN}) \\ L \frac{di_c}{dt} = E_c - Ri_c - (u_{co} + u_{oN}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ao} 、 u_{bo} 、 u_{co} 分别为 a、b、c 与 o 之间的电压; u_{oN} 为 o 与接地点 N 之间的电压。

将式(1)利用坐标变换矩阵 $T_{3s/2s}$ 进行坐标变换:

$$T_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

可得其数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = E_\alpha - Ri_\alpha - u_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = E_\beta - Ri_\beta - u_\beta \end{cases} \quad (3)$$

2 网压重构预测功率控制

2.1 预测功率模块

在平衡条件下,由瞬时功率理论^[15]可得网侧瞬时功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{2}{3} (E_\alpha i_\alpha + E_\beta i_\beta) \\ Q = \frac{2}{3} (E_\beta i_\alpha - E_\alpha i_\beta) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得瞬时功率变化率为:

$$\begin{cases} \frac{3}{2} \frac{dP}{dt} = E_{\alpha} \frac{di_{\alpha}}{dt} + E_{\beta} \frac{di_{\beta}}{dt} + i_{\alpha} \frac{dE_{\alpha}}{dt} + i_{\beta} \frac{dE_{\beta}}{dt} \\ \frac{3}{2} \frac{dQ}{dt} = E_{\beta} \frac{di_{\alpha}}{dt} - E_{\alpha} \frac{di_{\beta}}{dt} + i_{\alpha} \frac{dE_{\beta}}{dt} - i_{\beta} \frac{dE_{\alpha}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

同时,电网电压 E_{α} 、 E_{β} 的相关性为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_{\alpha} \\ E_{\beta} \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} -E_{\beta} \\ E_{\alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合式(2)、(5)与(6)^[16],可得:

$$\begin{cases} \frac{3}{2} \frac{dP}{dt} = 1/L(E_{\alpha}^2 - E_{\alpha}u_{\alpha} - RE_{\alpha}i_{\alpha} + E_{\beta}^2 - E_{\beta}u_{\beta} - RE_{\beta}i_{\beta}) + \omega(E_{\alpha}i_{\beta} - E_{\beta}i_{\alpha}) \\ \frac{3}{2} \frac{dQ}{dt} = 1/L(E_{\alpha}u_{\beta} - E_{\beta}u_{\alpha} + RE_{\alpha}i_{\beta} - RE_{\beta}i_{\alpha}) + \omega(E_{\alpha}i_{\beta} - E_{\beta}i_{\alpha}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{α} 、 u_{β} 为交流侧输出电压。

对上述功率采用离散化,采样周期为 T_s :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} \Big|_{t=k} = \frac{P(k+1) - P(k)}{T_s} \\ \frac{dQ}{dt} \Big|_{t=k} = \frac{Q(k+1) - Q(k)}{T_s} \end{cases} \quad (8)$$

根据预测功率控制目标,需保证在周期内的功率跟踪误差达到最小。因此,令目标代价函数^[17-19]为:

$$F = (P_{\text{ref}} - P_{(k+1)})^2 + (Q_{\text{ref}} - Q_{(k+1)})^2 \quad (9)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功、无功功率参考值。同时,令 $Q_{\text{ref}}=0$ 。

为实现预测功率误差达到最小,令目标代价函数对输出电压 u_{α} 、 u_{β} 的偏导数等于0,即:

$$\begin{cases} \frac{dF}{du_{\alpha}} = 0 \\ \frac{dF}{du_{\beta}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据上述对预测功率的分析,整理可得 u_{α} 、 u_{β} 为:

$$\begin{cases} u_{\alpha} = E_{\alpha} - Ri_{\alpha} + \omega Li_{\beta} - \frac{L}{T_s(E_{\alpha}^2 + E_{\beta}^2)}(AE_{\alpha} + BE_{\beta}) \\ u_{\beta} = E_{\beta} - Ri_{\beta} - \omega Li_{\alpha} - \frac{L}{T_s(E_{\alpha}^2 + E_{\beta}^2)}(AE_{\beta} - BE_{\alpha}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} A = P_{\text{ref}} - 1.5P(k) \\ B = Q_{\text{ref}} - 1.5Q(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P(k)$ 、 $Q(k)$ 分别为 kT_s 时刻的计算值。

2.2 网压重构模块

当电网电压不平衡时,多数控制策略均采用对网侧电压采取正负序分量分离的方法。为了简化控制结构,

降低控制系统的复杂性,本文采用网压重构模块对不平衡电压进行处理。

网压重构控制模块由两相静止坐标系下增强型锁相环(two-phase stationary-frame-based enhanced PLL, TPSF-EPLL)与平均计算法模块组成。与同步参考系锁相环、三相增强型锁相环相比,TPSF-EPLL 具有无需坐标变换,较高系统响应速度,结构简单等优点^[20]。由 TPSF-EPLL 对两相静止坐标下的网侧电压幅值进行提取,再通过对电压进行加权平均,得到平衡的网侧参考电压输入至预测功率计算模块中。TPSF-EPLL 是在传统 PLL 电路^[21-22]基础上的改进,其主要由鉴相器(phase detector, PD)、低通滤波器(loop pass filter, LPF)和压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)以及幅值跟踪4部分组成。

锁相环中的鉴相器用于将输入信号与反馈信号的差值转化为电压信号,设计为:

$$x_{PD} = E_i - x_A \sin x_{VCO} \quad (13)$$

式中: x_{PD} 为 PD 输出量; x_A 为幅值跟踪模块输出量; x_{VCO} 为 VCO 输出量; E_i 为输入量。

低通滤波器为滤除电压信号中的高频分量,设计为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{LPF} = z_1 + k_3 x_{PD} \times \cos x_{VCO} \\ \dot{z}_1 = k_2 x_{PD} \times \cos x_{VCO} \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_{LPF} 为 LPF 输出量; k_2 为角频率系数; k_3 为相位角系数。

而压控振荡器用于完成信号的转换:

$$\begin{cases} \dot{x}_{VCO} = z_2 \\ \dot{z}_2 = x_{LPF} + \omega_0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: ω_0 取值为 $2\pi f$ 。

幅值跟踪模块主要是对网侧电网电压的幅值进行跟踪提取,设计为:

$$\begin{cases} \dot{x}_A = z_3 \\ \dot{z}_3 = k_1 x_{PD} \times \sin x_{VCO} \end{cases} \quad (16)$$

式中: k_1 为幅值跟踪系数。

利用增强型锁相环对网侧电压 E_{α} 、 E_{β} 的幅值进行提取,进行加权平均后可得网侧参考电压:

$$\begin{cases} \frac{A_{\alpha} + A_{\beta}}{2A_{\alpha}} \times E_{\alpha} = A_p \sin(\omega t + \theta_{\alpha}) = v_{\alpha} \\ \frac{A_{\alpha} + A_{\beta}}{2A_{\beta}} \times E_{\beta} = A_p \sin(\omega t + \theta_{\beta}) = v_{\beta} \end{cases} \quad (17)$$

式中: A_{α} 、 A_{β} 、 A_p 分别为网侧电压 E_{α} 、 E_{β} 幅值与参考电压的幅值。

将网压重构模块计算出的网侧参考电压取代预测功率分析中的网侧电压,可得新的输出电压 u_{α}^* 、 u_{β}^* 为:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^* = v_{\alpha} - Ri_{\alpha} + \omega Li_{\beta} - \frac{L}{T_s(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2)}(Av_{\alpha} + Bv_{\beta}) \\ u_{\beta}^* = v_{\beta} - Ri_{\beta} - \omega Li_{\alpha} - \frac{L}{T_s(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2)}(Av_{\beta} - Bv_{\alpha}) \end{cases} \quad (18)$$

通过对 Vienna 整流器的网压重构预测功率控制各个模块的介绍,其控制结构框图如图 2 所示。

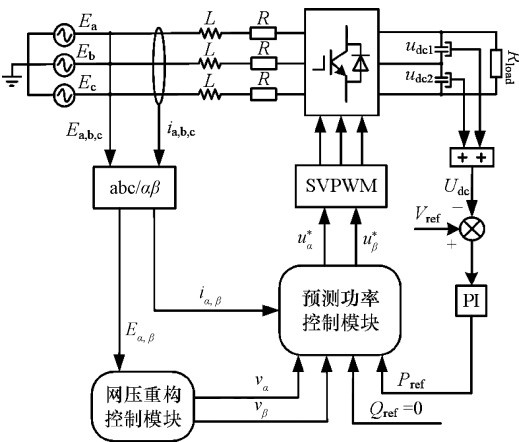


图 2 Vienna 整流器的网压重构预测功率控制结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of grid voltage reconfiguration predictive power control of Vienna rectifier

由图 2 可知,本文所提控制策略通过网压重构控制模块对网侧三相不平衡电压进行重构,再输入至预测功率控制模块中,通过预测功率模块计算出输出电压控制功率开关管的运行,实现 Vienna 整流器在电网电压不平衡下的良好稳定运行。将所提控制策略结构框图 2 与传统双闭环控制策略结构框图相比,其传统控制结构框图见附录图 A1,对比可以看出,所提控制策略结构简单,实现了 Vienna 整流器在电网电压不平衡下由 4 个控制量到两个控制量的简化,减小了对 Vienna 整流器控制的复杂性。

3 仿真实验分析

将所提控制策略与传统双闭环控制策略在 MATLAB/Simulink 仿真软件中构建仿真模型进行对比分析,两种控制策略的主电路参数相同,具体参数如表 1 所示。

表 1 Vienna 整流器参数值
Table 1 Vienna rectifier parameters

参数	数值
电网侧电压 E/V	110
直流侧电压 U_{dc}/V	400
开关频率 f/kHz	20
电网侧电感 L/mH	4.5
直流侧电容 $C_1、C_2/\mu\text{F}$	4 400
额定功率 P/kW	10

3.1 仿真分析

电网 a 相电压在 0~0.4 s 以幅值 50% 运行,0.4 s 电压幅值突变至 60%,运行至 0.6 s 时,电网电压恢复至平衡状态下,电网三相电压波形图如图 3 所示。

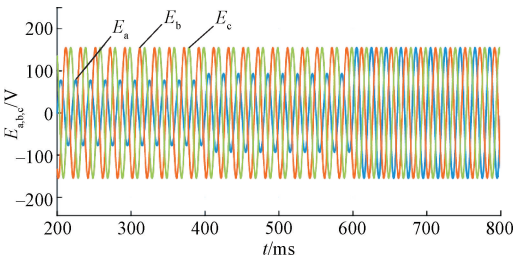


图 3 电网三相电压幅值突变下仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform under the sudden change of three-phase voltage amplitude of power grid

为了更好的对比传统控制与所提控制下的动态响应性能。传统控制与所提控制在上述情况下的直流侧输出电压、网侧三相电流、a 相电压电流同相位以及 a 相电流在 a 相电压幅值分别为 50%、60% 与平衡状态下的 THD 值如图 4(a)、(b) 所示。由图 4 可知,传统控制策略在电网 a 相电压幅值发生突变时,直流侧输出电压与网侧三相电流具有一定的波动与跳变。而所提控制策略在突变时的过渡过程较为平滑,响应速度较快。同时,两种控制策略均可实现同相位运行。但传统控制策略下的 a 相电流在 a 相电压幅值分别为 50%、60% 与平衡状态下的 THD 值分别为 5.88%、4.95%、2.82%,而所提控制策略 a 相电流 THD 值分别为 1.83%、1.72%、1.40%,所提控制策略 THD 值明显低于传统控制下的 THD 值。因此,与传统控制策略相比,所提控制策略谐波含量更低,更适合对电流质量要求更高的应用场合,同时,承受电网电压不平衡度范围更大。

为了进一步验证所提控制策略的控制效果。将电网 a 相电压幅值调为 80% 时下运行,当运行至 0.45 s 时,将直流侧负载由 20 Ω 突变至 40 Ω 运行,即系统由满载(10 kW)变为半载(5 kW)运行。传统控制与所提控制下的直流侧输出电压、网侧三相电流、a 相电压电流同相位仿真波形、a 相电压 80% 幅值时 a 相电流 THD 值以及在半载(5kW)下运行的 a 相电流 THD 值如图 5(a)、(b) 所示。

由图 5 可知,在传统控制策略下,当 a 相电压幅值为 80% 时,网侧 a 相电流 THD 值为 3.16%,当负载突变时,直流侧输出电压突变量较大,恢复时间约为 120 ms,且当系统在半载运行时,网侧三相电流正弦度不高,a 相电流 THD 值为 3.80%。而所提控制策略直流侧电压在负载

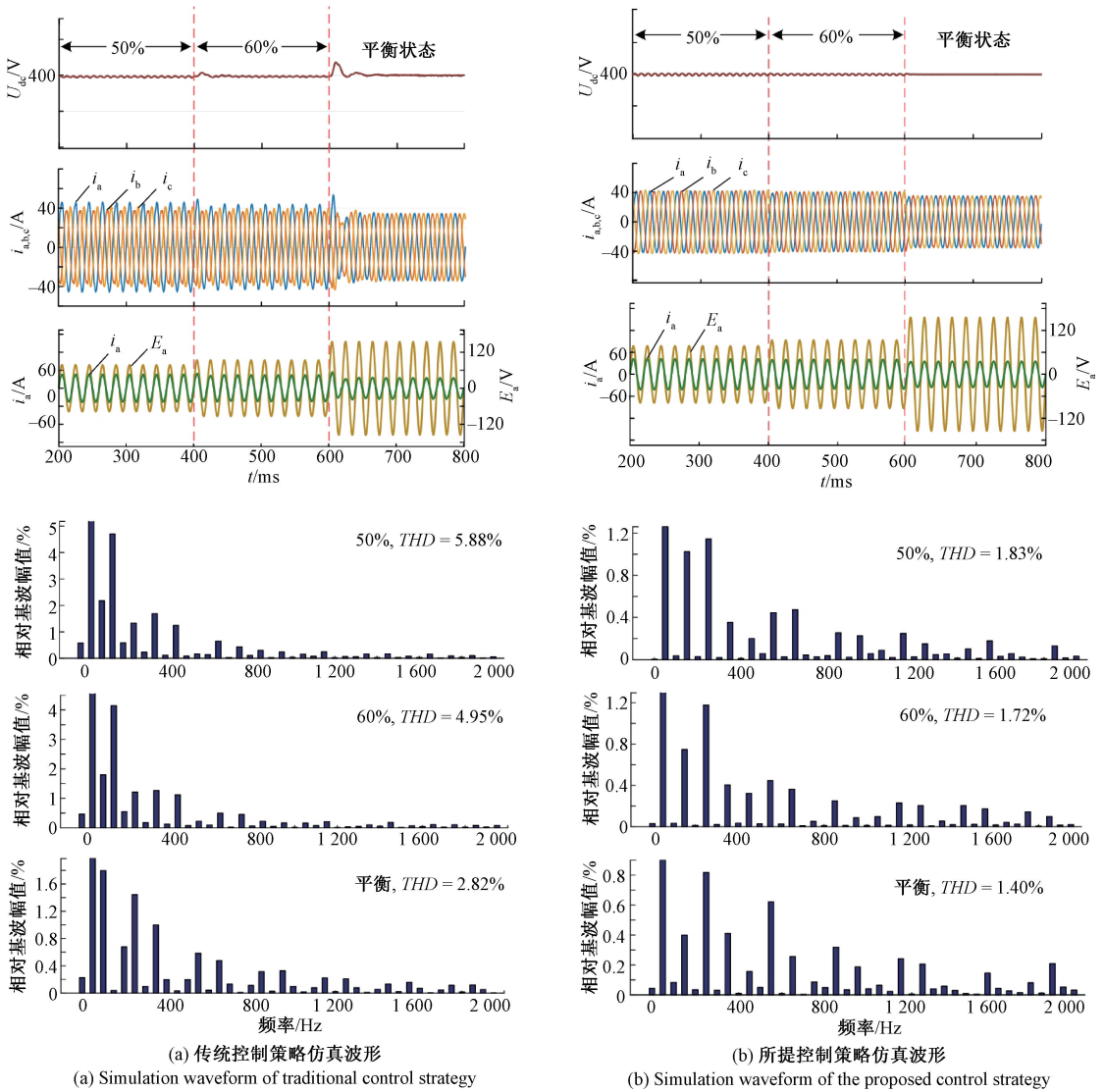


图4 电网电压幅值突变下的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform under the sudden change of grid voltage amplitude

突变时,突变率较小,恢复时间约为 90 ms,且当系统在半载运行时,网侧 a 相电流 THD 值为 2.64%,谐波含量较低。

为了进一步验证所提控制策略良好的鲁棒性能。将交流侧滤波电感降低 50%,即由 4.5 mH 降低为 2.25 mH 时,Vienna 整流器在电网 a 相电压幅值分别为 50%、60% 以及平衡状态下的 a 相电流 THD 值如图 6 所示,由图 6 可知,此时 a 相电流 THD 值分别为 3.46%、3.33%、2.90%,网侧三相电流 THD 值低于 5%,验证了所提控制策略在电网电压不平衡下具有良好的鲁棒性能。

3.2 实验分析

为了进一步验证所提控制策略的正确性。搭建以 Chroma 的大功率可编程电源 MODEL61830/IT8617 可编程交流负载、DSP28335 为控制核心的 Vienna 整流器硬

件平台对所提控制策略进行验证分析,Vienna 整流器硬件平台如图 7 所示。

本文所提控制策略在电网 a 相电压幅值突变下的实验波形如图 8 所示。从图 8 可以看出,采用本文所提控制策略后,当网侧 a 相电压跳变时,直流侧输出电压畸变较小,网侧三相电流呈现出较为平滑的正弦波形,a 相电压电流基本实现同相位运行,实现了 Vienna 整流器的良好稳定运行。同时,Vienna 整流器系统在 a 相电压 50% 幅值时,a 相电流 THD 值为 3.18%,在电网电压平衡度较低的情况下,电流质量得到明显改善。

本文所提控制策略在 a 相电压幅值突变至 80%,且负载发生突变时的直流侧输出电压、a 相电压电流同相位仿真波形以及 a 相电流半载下运行的 THD 值如图 9 所示。由图 9 可知,在电网电压幅值发生突变时,若负

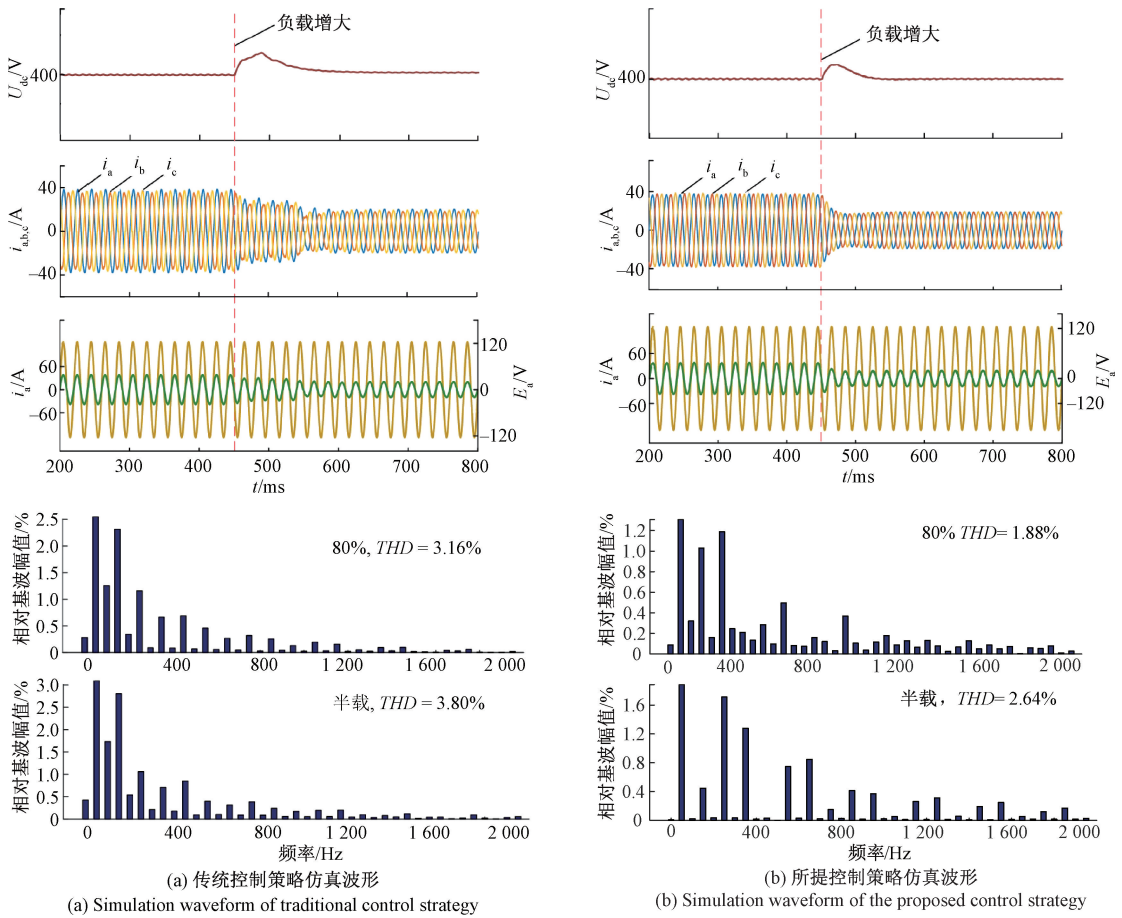


图 5 电网不平衡且负载突变下的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform under grid unbalance and load sudden change

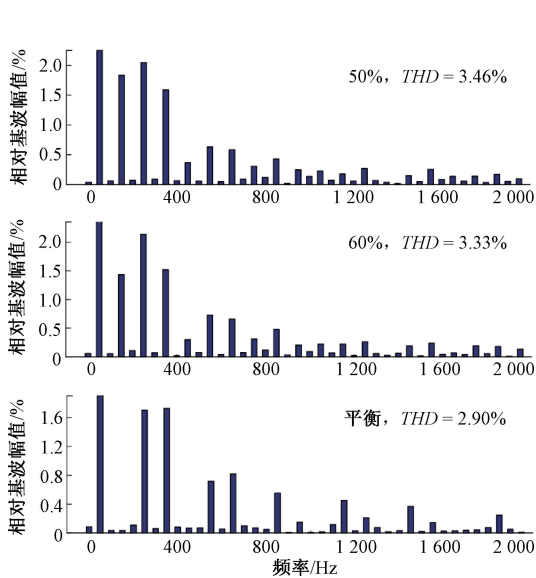


图 6 参数变化下的 a 相电流 THD 值

Fig. 6 A Phase current THD value under parameter change

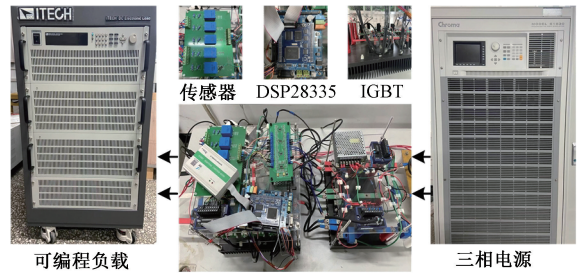
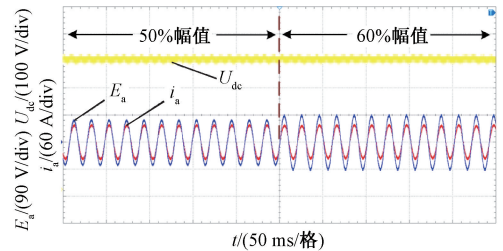


图 7 Vienna 整流器硬件实验平台

Fig. 7 Vienna rectifier hardware experiment platform



(a) a相电压50%幅值突变至60%幅值

(a) a-phase voltage suddenly changed from 50% amplitude to 60% amplitude

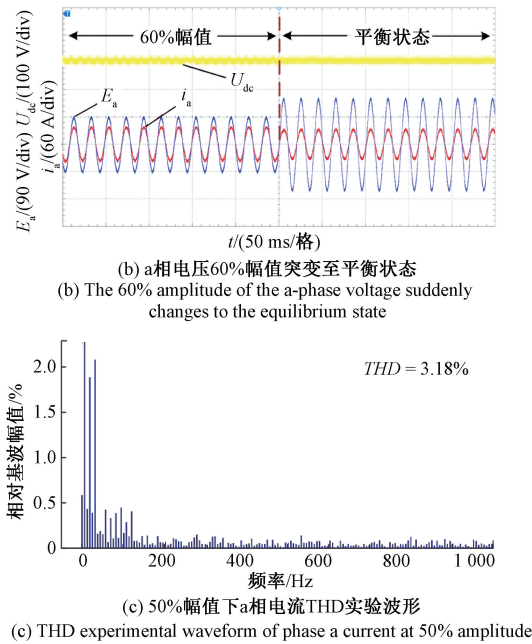


图8 电网不平衡下幅值突变实验波形
Fig. 8 Amplitude mutation experiment waveform under grid unbalance

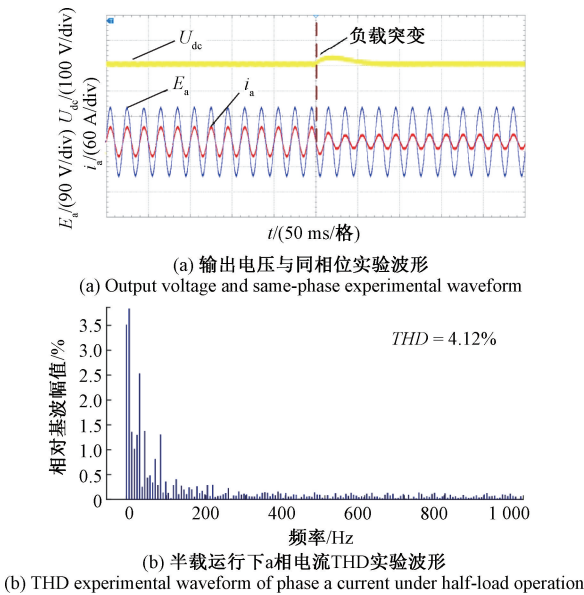


图9 电网不平衡下负载突变实验波形
Fig. 9 Load mutation experiment waveform under grid unbalance

载发生突变,此时所提控制策略可实现 Vienna 整流器的正常运行,a 相电流 THD 值为 4.12%,满足国家对电流质量的要求。进一步证明了本文所提控制策略在电网电压不平衡下具有较强的抗干扰能力、良好的响应速度与稳定性等优点。

4 结 论

本文针对在电网电压不平衡下采取双闭环控制策略存在的复杂性与控制效果欠佳的缺点,提出了 Vienna 整流器的网压重构预测功率控制,并通过与双闭环控制策略的仿真进行对比分析与实验分析得出如下结论。网压重构预测功率控制在电网电压不平衡下,具有结构简单、控制精度较高、谐波污染较低、易于实现的优点,验证了该控制策略的有效性与可行性。该控制策略相比于双闭环控制策略,其承受的电网电压不平衡度范围更大,且整体控制效果更为良好。

参考文献

- [1] 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.
ZHEN Y, XU Z L, CHEN Y, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant control of aviation Vienna rectifier [J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2020, 35(24): 5152-5163.
- [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.
CHEN X, WANG Y CH, SONG W P, et al. High-frequency switching rectifier module for high-voltage DC communication power supply [J]. Chinese Journal of Electrotechnical Technology, 2014, 29(4): 152-159.
- [3] CHEN H, 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.
- [4] 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.
- [5] 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 SH, HE W T, GUO Q, et al. Sliding mode control strategy of Vienna rectifier under grid voltage unbalance

- condition [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 52-61.
- [6] LI J G, WANG M, WANG J, et al. Passivity-based control with active disturbance rejection control of Vienna rectifier under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Access, 2020, 8(7): 6082-76092.
- [7] JEEVAN A, PRASANNA I V, KUMAR S P. 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.
- [8] ZHANG M, HANG L J, YAO W X, et al. A novel strategy for three-phase/switch/level (Vienna) rectifier under severe unbalanced grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4243-4252.
- [9] DING W L, ZHANG C H, GAO F, 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.
- [10] 周运红, 张爱民, 张杭, 等. 电压不平衡下 Vienna 整流器的谐振滑模控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 76-84.
- ZHOU Y H, ZHANG A I M, ZHANG H, et al. Resonant sliding mode control strategy of Vienna rectifier under voltage imbalance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 76-84.
- [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 X T, CUI X, MA W ZH, et al. Double closed-loop control strategy of three-phase Vienna rectifier based on grid unbalance [J]. Power Grid Technology, 2021, 45(5): 1976-1984.
- [12] 董德智, 海良豪, 王悦. PWM 整流器一般不平衡分析和控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 112-121.
- DONG D ZH, HAI L H, WANG Y. General unbalance analysis and control strategy of PWM rectifier [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 112-121.
- [13] 董德智, 王悦, 汪谦, 等. 非理想电网下 PWM 整流器的多谐振控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 92-101.
- DONG D ZH, WANG Y, WANG Q, et al. Research on multi-resonance control of PWM rectifiers in non-ideal power grids [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 92-101.
- [14] 韦微, 陈新, 陈杰, 等. 输入电压不平衡时三相 PFC 整流器改进单周期控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 65-72.
- WEI ZH, CHEN X, CHEN J, et al. Research on improved single-cycle control strategy of three-phase PFC rectifier when input voltage is unbalanced [J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2014, 29(10): 65-72.
- [15] 赵峰, 李述特, 陈小强, 等. 不平衡电网下三相 PWM 整流器预测直接功率控制[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 870-879.
- ZHAO F, LI SH T, CHEN X Q, et al. Predictive direct power control of three-phase PWM rectifier under unbalanced power grid [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(3): 870-879.
- [16] 郭旭刚, 高增伟, 尹靖元, 等. 不平衡电网电压下的 PWM 整流器功率预测[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2362-2367.
- GUO X G, GAO Z W, YIN J Y, et al. Power prediction of PWM rectifier under unbalanced grid voltage [J]. Power Grid Technology, 2013, 37(8): 2362-2367.
- [17] WANG F X, LI S H, MEI X Z, et al. Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of PTC and PCC methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 671-681.
- [18] YANG H, ZHANG Y, ZHANG Z, et al. A voltage sensorless finite control set-model predictive control for three-phase voltage source PWM rectifiers [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 2(2): 52-59.
- [19] PANTEN N, HOFFMANN N, FUCHS F W. Finite control set model predictive current control for grid-

connected voltage-source converters with LCL filters: A study based on different state feedbacks [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (7): 5189-5200.

[20] WU F, ZHANG L, DUAN J. A new two-phase stationary-frame-based enhanced PLL for three-phase grid synchronization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2015, 62(3): 251-255.

[21] 马立新, 肖川, 林家隽, 等. 神经网络与锁相环相结合的谐波检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 24-29.

MA L X, XIAO CH, LIN J J, et al. Harmonic detection method combining neural network and phase-locked loop [J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2011, 23(3): 24-29.

[22] BOUAFIA A, GAUBERT J P, KRIM F. Predictive direct power control of three-phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 228-236.

作者简介



向文凯, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为 Vienna 整流器及其控制策略。

E-mail: wenkaihh@163.com

Xiang Wenkai is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University of Technology. His main research interests include Vienna rectifiers and their control strategies.



郭强(通信作者), 2010 年于西南大学获得硕士学位, 2015 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学副教授, 主要研究方向为 PWM 整流器、混合微电网及存储系统等。

E-mail: guoqiang@cqut.edu.cn

Guo Qiang (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Southwest University in 2010 and Ph. D. degree from Chongqing University in 2015. He is currently an associate professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include PWM rectifiers, hybrid microgrid and storage systems.