

# 三相电压源型 PWM 整流器不平衡控制策略研究

张宏杰<sup>1</sup>, 张辑<sup>2</sup>, 孙祖明<sup>3</sup>

(1. 健雄职业技术学院中外合作教育系, 江苏 太仓 215411; 2. 厦门理工学院电子与电气工程系, 福建 厦门 361024; 3. 北京煤炭科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 主要研究了 PWM 整流器在电网电压不平衡时的数学模型和基于该数学模型的控制策略。首先, 分析了 PWM 整流器在不平衡时用正序电动势、负序电动势和零序电动势描述的数学模型。然后, 利用网侧功率平衡原理设计了电流指令计算方法。基于这种方法, 设计了正负序电流独立控制的功率平衡控制策略。正负序电流独立控制最后将正负序电压信号合成为一个电压信号。通过仿真, 进一步验证了该方法是可行的。

**关键词:** 电压源型 PWM 整流器 (VSR); 矢量控制; 不平衡控制; 正负序电流

## Study of control strategy based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition

ZHANG Hong-jie<sup>1</sup>, ZHANG Ji<sup>2</sup>, SUN Zu-ming<sup>3</sup>

(1. Department of Sino-foreign Cooperative Education, CSIT, Taicang 215411, China; 2. Department of Electronic and Electrical Engineering, XMUT, Xiamen 361024, China; 3. Beijing Coal Institute of Science and Technology, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The control strategies of PWM rectifier when the three-phase power supply voltage are unbalanced are mainly discussed in this paper. PWM rectifier's mathematic model and control strategy are discussed when the power supply voltage is unbalanced. The positive and negative sequence current separate control strategy is utilized. When the voltage and current are controlled separately, the control principle is same to the vector control and the difference is the positive sequence current and the negative sequence current composed to be one at last. The simulation results prove the control strategies can fulfill the requirement.

**Key words:** PWM rectifier; vector control; unbalanced control; positive and negative sequence current

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0013-04

## 0 引言

在电力系统中, 要求电网电压与电流同相位, 但是由于存在着非线性负载, 电网电压和电流很难同相位, 这样就会产生大量谐波, 目前主要的谐波源是整流器。PWM 整流器具有功率因数可调, 输入网侧电流接近正弦的优点, 并且与 PWM 逆变器结合组成的双 PWM 结构可以实现能量回馈电网, 因而成为研究的热点。三相电压源型 PWM 整流器由于效率较高, 因而在 PWM 整流器中应用很广泛<sup>[1-4]</sup>。

目前, 电压源型 PWM 整流器主要采用电压、电流双闭环的控制结构。电压外环用于控制直流侧电压, 它给出电流内环的控制指令, 控制电流与电网电压同相位。传统的控制是假设三相电网电压对称, 也就是三相电压幅值相等, 相位互差 120°。在这种情况下, 一般采用矢量控制技术, 在同步旋转坐

标系下, 分别控制电流的有功和无功分量。但是在实际系统中, 三相电网电压很难完全平衡, 这就会影响控制的性能。于是, 在平衡控制的基础上, 许多学者又提出了 PWM 整流器的不平衡控制策略。本文分别对基于正、负序电流独立控制的不平衡控制策略进行了详细研究, 分析了该方法的特点并对该策略进行了仿真研究。

## 1 电网不平衡时三相 VSR 数学模型

三相电压型 PWM 整流器的主电路如图 1 所示, 其三相交流电压方程为<sup>[5,6]</sup>:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = (R + L \frac{d}{dt}) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为供电侧三相交流电压;  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  为 PWM 整流桥输入端三相交流电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为 PWM 整流器三相交流电流;  $R$ 、 $L$  分别为交流电抗器的电感和电阻。

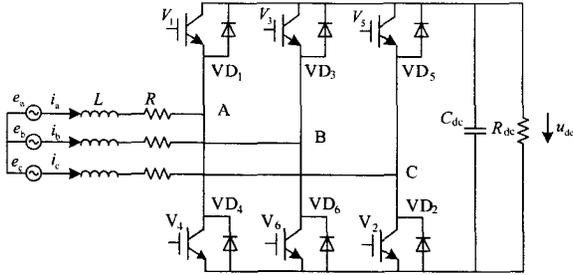


图 1 三相电压型 PWM 整流器拓扑结构

Fig.1 Topology of three-phase voltage source PWM rectifier

电网电压不平衡时, 电网电动势可以描述成正序电动势、负序电动势和零序电动势的合成, 即

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E_m^P \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_e^P) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^P - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^P + 2\pi/3) \end{bmatrix} + E_m^N \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_e^N) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^N - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^N + 2\pi/3) \end{bmatrix} + E_m^0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_e^0) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^0) \\ \cos(\omega t + \alpha_e^0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $E_m^P$ 、 $E_m^N$ 、 $E_m^0$  是正序、负序、零序基波电网电动势幅值;  $\alpha_e^P$ 、 $\alpha_e^N$ 、 $\alpha_e^0$  是正序、负序、零序基波电网电动势初始相角。

将整流器侧电压、电流也按上述方法分解为正序负序分量, 按照式 (1) 的形式得出正负序分量各自的三相电压方程式并变换到旋转坐标系得:

$$\begin{cases} E_{dq}^P = L \frac{dI_{dq}^P}{dt} + RI_{dq}^P + j\omega LI_{dq}^P + V_{dq}^P \\ E_{dq}^N = L \frac{dI_{dq}^N}{dt} + RI_{dq}^N - j\omega LI_{dq}^N + V_{dq}^N \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V_{dq}^P$ 、 $V_{dq}^N$  是交流电压正序、负序分量在正负序同步旋转坐标系中的 d、q 分量;

$I_{dq}^P$ 、 $I_{dq}^N$  是交流电流正序、负序分量在正负序同步旋转坐标系中的 d、q 分量。

通过坐标变换后, 三相静止坐标系中基波正弦变量将转换成同步旋转坐标系的直流量, 从而简化了控制系统的设计。

## 2 电网电压不平衡时的功率平衡控制策略

当电网电压不平衡时, 若采用平衡控制策略将会在其交流侧产生负序电流, 交流侧的负序电流又会在直流侧产生电压和电流谐波, 影响三相 VSR 的正常运行<sup>[7-9]</sup>。本文进一步探讨了三相 VSR 的不平衡

控制策略。

### 2.1 基于网侧功率平衡的电流指令控制算法

三相 VSR 交流侧复功率表达式为:

$$S_V = V_{\alpha\beta} J_{\alpha\beta} = (e^{j\alpha} V_{dq}^P + e^{-j\alpha} V_{dq}^N) (e^{j\alpha} I_{dq}^P + e^{-j\alpha} I_{dq}^N) \quad (4)$$

令  $p_{c2}^* = p_{s2}^* = 0$ , 可抑制三相 VSR 直流侧二次谐波,  $p_0^*$  由电压外环调节器给出,

$p_0^* = \left[ \left( k_{vp} + \frac{k_{vi}}{s} \right) (v_{dc}^* - v_{dc}) + i_L \right] v_{dc}^*$ , 根据这些约束条件结合式 (4) 可以求出抑制直流侧电压谐波的电流控制指令:

$$\begin{bmatrix} i_d^{P*} \\ i_q^{P*} \\ i_d^{N*} \\ i_q^{N*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^P & v_q^P & v_d^N & v_q^N \\ v_q^P & -v_d^P & v_q^N & -v_d^N \\ v_d^N & -v_q^N & -v_d^P & v_q^P \\ v_q^N & v_d^N & v_d^P & -v_q^P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} p_0^* \\ \frac{2}{3} q_0^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2p_0^*}{3D_1} \begin{bmatrix} v_d^P \\ v_q^P \\ -v_d^N \\ -v_q^N \end{bmatrix} + \frac{2q_0^*}{3D_2} \begin{bmatrix} -v_d^P \\ v_q^P \\ v_d^N \\ -v_q^N \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{cases} D_1 = \left[ (e_d^P)^2 + (e_q^P)^2 \right] - \left[ (e_d^N)^2 + (e_q^N)^2 \right] \neq 0 \\ D_2 = \left[ (e_d^P)^2 + (e_q^P)^2 \right] + \left[ (e_d^N)^2 + (e_q^N)^2 \right] \neq 0 \end{cases}$$

电压矢量  $v_d^P$ 、 $v_q^P$ 、 $v_d^N$ 、 $v_q^N$  不能直接测量得到, 但是可以通过式 (5) 计算出来。

$$\begin{cases} V_{dq}^P = e_{dq}^P - RI_{dq}^P - j\omega LI_{dq}^P \\ V_{dq}^N = e_{dq}^N - RI_{dq}^N - j\omega LI_{dq}^N \end{cases} \quad (5)$$

这种方法只需要检测三相电网电压  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  和网侧三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 。

由计算得到的电流指令, 经过解耦, 就可以求出控制电压指令。结合 SVPWM 技术, 可以给出控制脉冲。这种方法的基本原理是保持网侧功率平衡, 所以被称为网侧功率平衡控制策略。这种控制策略可实现直流侧电流无谐波, 但网侧就存在负序电流。所以, 交流负序电流控制与直流电压谐波控制是矛盾的。用网侧功率平衡算法可以发现, 三相 VSR 的直流侧输入瞬时功率中仍含有二次谐波分量, 那是因为在计算交流电流指令时忽略了交流侧阻抗的影响。

### 2.2 基于正负序电流独立控制的功率平衡控制策略

这种控制策略采用的正负序坐标系双电流内环控制结构, 如图 2 所示。为保证输入电流为正弦, 直流瞬时输入功率就不可避免有波动。正序电流在正向坐标系下为直流量, 负序电流在负向坐标系下为直流量, 对它们分别控制可以达到电流控制无静

差。在正负向坐标系下的电流控制与在平衡状态下的控制原理一样，将公式算出的正负电流指令与反馈电流比较后，分别对正负序电流进行解耦控制，并乘上各自的旋转因子  $e^{j\alpha}$ ， $e^{-j\alpha}$ 。最后将得到的正负序电压指令合成一个电压指令，结合 SVPWM 模块，给出控制脉冲。

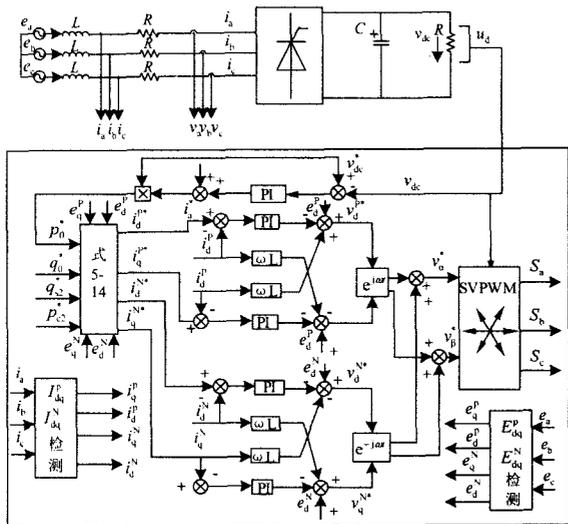


图 2 基于正负序电流独立控制的功率平衡控制图  
Fig.2 Power balance control based on the control of positive and negative sequence components of current

### 3 仿真结果与分析

用 Matlab/Simulink 进行仿真，仿真参数为：电网电压为 220 V，50 Hz，整流器交流侧电感为 12 mH，交流侧电阻为 0.1  $\Omega$ ，直流侧滤波电容为 2.4  $\mu\text{F}$ 。电网电压不平衡时的参数为：A 相幅值为 220，相角为 0，B 相幅值为 220，相角为 -110，C 相幅值为 200，相角为 0，仿真结果图 4 所示。由图 5 可以看出，不平衡状态下的功率平衡控制可以使网侧电网电压与电流同相位，并且使电流接近正弦波，这样 PWM 整流器的功率因数就近似为 1，达到控制的要求。

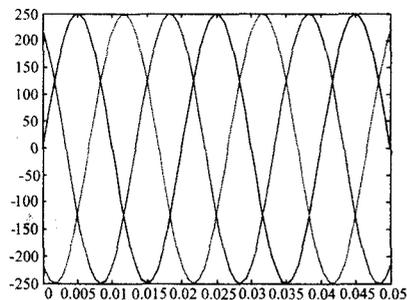


图 3 平衡条件下的三相电网电压波形  
Fig.3 Waveform of three-phase voltage system based on balance conditions

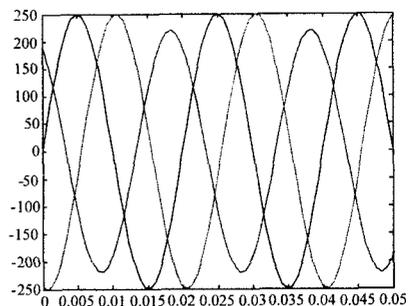


图 4 不平衡条件下的三相电网电压波形  
Fig.4 Waveform of three-phase voltage system based on unbalance conditions

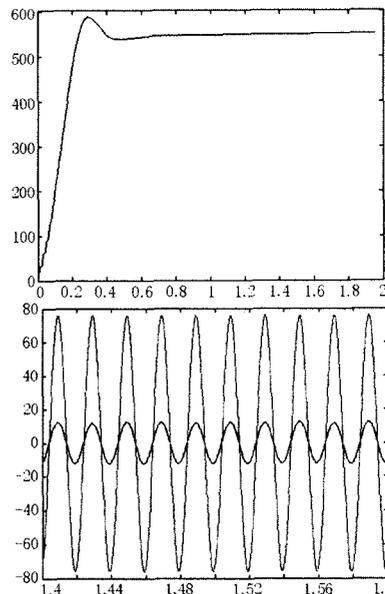


图 5 不平衡控制时直流侧电压波形和电流波形  
Fig.5 Waveforms of DC side voltage and current based on unbalance conditions

### 4 总结

本文首先给出了三相电网不平衡时的 PWM 整流器数学模型，然后，分析不平衡时的 PWM 整流器的策略。控制原理采用基于电网电压定向的矢量控制，控制结构采用电压外环、电流内环的双闭环结构。电压外环的作用是控制整流器直流侧电压，电流内环的作用是按电压外环给出的电流指令控制电流，实现网侧单位功率因数的控制。控制策略采用正负序电流独立控制的功率平衡控制策略。此外，有负序电压，当控制使输入电流仍为正弦时，直流就不可能平衡。最后，本文对该控制策略进行了仿真，仿真结果表明，该策略能使网侧电压、电流同相位，并且使电流接近正弦波，控制效果良好。

参考文献

[1] 张志刚, 黄守道, 任光法, 等.三相电压型 SVPWM 整流器控制策略研究[J].长沙大学学报, 2004.  
ZHANG Zhi-gang,HUANG Shou-dao, REN Guang-fa,et al. Research on Control Strategy of the Three-phase Voltage SVPWM Rectifier[J]. Journal of Changsha University, 2004.

[2] 张崇巍, 张兴.PWM 整流器及其控制[M].北京: 机械工业出版社, 2003.  
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Control Strategy of PWM Rectifier[M].Beijing: China Machine Press, 2003.

[3] 张笑薇, 李永东, 刘军.PWM 整流器电流控制策略的研究[J].电工技术杂志, 2003,(12):57-59,68.  
ZHANG Xiao-wei, LI Yong-dong, LIU Jun . Research on Current Control Strategy for PWM Rectifier[J]. Electrotechnical Journal, 2003,(12):57-59,68.

[4] 黄守道, 张铁军, 陈颖, 等.一种三相 PWM 整流器控制方法研究[J].电气应用, 2005,(3):110-113.  
HUANG Shou-dao,ZHANG Tie-jun, CHEN Ying,et al. Investigation of an Control Strategy for Three Phase PWM Voltage Rectifier[J]. Electric Application, 2005,(3):110-113.

[5] 张勋, 甘长海, 王兵, 等.PWM 整流器的电流解耦控制研究[J].空军雷达学院学报, 2004,(4):33-35.  
ZHANG Xun, GAN Chang-hai,WANG Bing,et al. Research of Current Decoupling Control for PWM Rectifier[J]. Journal of Air Force Radar Academy,

2004,(4):33-35.

[6] 詹长江, 康勇, 刘平, 等.电压型 PWM 整流器统一数学模型及系统仿真[J].电工技术学报, 1996,(6):60-64.  
ZHAN Chang-jiang, KANG Yong,LIU Ping,et al. The Unified Mathematical Model and systematic simulation for PWM Rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996,(6):60-64.

[7] Moran L, Ziogas P D, Joos G, Design Aspects of Synchronous PWM Rectifier-inverter Systems Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1992, 28(6):1286-1293.

[8] Vincenti D, Jin H. A Three Phase Regulated PWM Rectifier with on-line Feed-forward Input Unbalance Correction[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1994, 41:526-532.

[9] song Hong-seok, Nam Kwanghee., Dual Current Control Scheme for PWM Converter Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1999,46(5):953-959.

收稿日期: 2009-03-16; 修回日期: 2009-05-21  
作者简介:

张宏杰 (1969-), 男, 讲师, 从事继电保护、电力电子等方面的研究;

张辑 (1976-), 男, 从事继电保护、电力电子等方面的研究。E-mail: 221zhangji@163.com

(上接第 12 页 continued from page 12)

WANG Qing-hong, ZHOU shuang-xi. Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7): 18-22.

[7] Overbye T J. Use of Energy Methods for On-line Assessment of Power System Voltage Security[J]. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(2): 452-457.

[8] Overbye T J, Use of Energy Methods for On-Line Assessment of Power System Voltage Security[J]. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(2): 452-457.

[9] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6): 40-45.  
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest bus of the Power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (6): 40-45.

[10] FENG Zhi-hong, Vendataramana Ajjaraipu. Identification

of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 342-348.

[11] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York :McGraw-Hill, 1994.

[12] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw- Hill, 1994.

收稿日期: 2008-11-28; 修回日期: 2009-01-01  
作者简介:

徐涛 (1968-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: xutao\_569@163.com

康海珍 (1971-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统控制与继电保护;

张振程 (1966-), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度工作。