DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.017

基于矢量调制的维也纳整流器共模电压抑制研究

王智敏

(国网福建省电力公司 泉州供电公司,福建 泉州 362000)

摘要:针对维也纳整流器的安全可靠问题,对维也纳整流器的共模电压高和中点不平衡等方面进行了研究,提出了一种矢量调制方 法以及时实现共模电压减少以及直流侧电压平衡控制。首先分析了共模电压产生的原因,通过提出的矢量调制减少了共模电压; 然后分析了中点平衡产生的原因,通过所提出的矢量调制同时实现了中点平衡控制;利用维也纳整流器试验台对维也纳整流器的 中点平衡控制和共模电压抑制效果进行了测试。研究结果表明:维也纳整流器的共模电压能够有效地得到抑制,而且维也纳整流 器的线电压为标准的五电平波形,直流侧电容电压得到有效控制,输入电流的畸变率得到有效控制。

关键词:维也纳整流器;共模电压;矢量调制;中点电压平衡

中图分类号:TM461 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0298-04

Common mode voltage suppression of Vienna rectifiers based on vector modulation

WANG Zhi-min

(Quanzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Aiming at the safety and reliability of the Vienna rectifier, the common-mode voltage and neutral-point imbalance of the DC side. First of all, the reason of common mode voltage was analyzed. The proposed vector modulation can reduce the common mode voltage. Then the reason of the neutral-point balance was analyzed. The proposed vector modulation can realize the neutral-point balance control at the same time. Vienna rectifier test bench was used to test the neutral point balance control and common mode voltage suppression effect of Vienna rectifier. The results show that the common mode voltage of the Vienna rectifier can be effectively suppressed, and the line voltage of the Vienna rectifier is a standard five-level waveform. The DC-side capacitor voltage is effectively controlled and the distortion rate of the input current is effectively controlled.

Key words: Vienna rectifiers; common mode voltage; vector modulation; neutral-point voltage balance

0 引 言

随着分布式能源快速发展,三相变换器由于具有 低功率纹波以及直流侧较小的电容值而逐渐得到广泛 应用。过去,两电平变换器是一种重要的接口选择。 然而,随着功率以及规模的增加,两电平变换器开关损 耗大以及滤波器体积大的缺点显现出来^[1-3]。维也纳 整流器具有谐波小和滤波器体积小等优点,成为分布 式能源的重要选择。

然而,维也纳整流器共模电压大会损坏发电设备,

如果不加以控制,会增加额外的损耗以及电流畸变。 文献[4]提出的 LMZVM 方法(大矢量、中矢量以及小 矢量调制)会有效地降低共模电压,因此被广泛应用 到无隔离三电平逆变器中。但是目前还未有文献研究 维也纳整流器的共模电压抑制。

而且维也纳整流器也三电平一样,都存在中点不 平衡问题。

电容电压中点不平衡问题会增加开关器件的应 力,减少电容的寿命。因此,研究维也纳整流器中点 平衡具有重要的意义。正常情况下,维也纳整流器

收稿日期:2017-06-19

作者简介:王智敏(1963-),男,福建福州人,高级工程师,主要从事电力系统生产及管理方面的研究。E-mail: fjqzwzm@163.com

输出是平衡的,但是遇到干扰的时候,电容电压会发 生中点不平衡问题,输入电流会产生二次和四次谐 波。因此,文献[5]提出不连续调制方法,实现开关 损耗减少和中点平衡控制。文献[6-7]提出空间矢 量调制方法,通过改变矢量作用时间,实现中点平衡 控制。文献[8]提出模型预测控制,实现了中点平衡 控制。

但是目前针对维也纳整流器的共模电压抑制和中 点平衡控制,还没有相关文献研究。

因此,本文综合考虑维也纳整流器的开关损耗以 及中点平衡控制问题,提出一种矢量调制方法,正常情 况下,采用 LMZVM 方法实现共模电压减少,当出现中 点不平衡问题时,本文提出一种 LMSVM 方法实现中 点电位平衡控制和共模电压抑制。

1 Vienna 整流器共模电压抑制

维也纳整流器的拓扑结构如图1所示。



图1 维也纳整流器拓扑结构

系统包括三相电网电压、滤波器、维也纳整流器 以及母线电容组成。维也纳整流器的输出接负载。

本文以维也纳整流器的负极为参考点,在三相静 止坐标系下的数学等式为:

$$e_i = L \frac{\dot{t}_i}{dt} + u_{iN} + u_{nN}$$
 (1)

式中: i_i — 输入电流; e_i — 三相电网电压; u_{nN} — 直流侧 负极到电网中性点 n 点电压; u_{iN} — 维也纳整流器三相 输入电压, $i = a, b, c_{\circ}$

对式(1) 进行 d - q 变换得到:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d - u_d \\ e_q - u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$
(2)

维也纳整流器的电网电压矢量、电流矢量和输入 电压表示为:

$$\vec{e} = \frac{2}{3}(e_a + a \times e_b + a^2 \times e_c)$$

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_a + a \times i_b + a^2 \times i_c)$$

$$\vec{u} = \frac{2}{3}(u_a + a \times u_b + a^2 \times u_c)$$
(3)

其中: $a = e^{j2/3\pi}$ 。

经过 PI 控制器后,系统将输出矢量送到矢量调制 中。维也纳整流器根据幅值可以分成大矢量、中矢量、 小矢量以及零矢量4个部分。包括:一个1零矢量,6个 大矢量、6个中矢量以及12个小矢量。维也纳整流器矢 量控制图如图2所示。



共模电压的公式为:

$$V_{CM} = \frac{u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}}{3}$$
(4)

因此能够得到维也纳整流器的开关状态和电压幅 值如表1所示。

表1 维也纳整流器开关状态和电压幅值

小矢量(P-type)	共模电压	大矢量	共模电压
V_1 [POO]	$V_{ m dc}/6$	V_{13} [PNN]	$-V_{ m dc}/6$
V_2 [PPO]	$2V_{ m dc}/6$	V_{14} [PPN]	$V_{ m dc}/6$
V_3 [OPO]	$V_{ m de}/6$	V_{15} [NPN]	$-V_{ m dc}/6$
V_4 [OPP]	$2V_{ m dc}/6$	$V_{16}[\text{NPP}]$	$V_{ m dc}/6$
$V_5[OOP]$	$V_{ m dc}/6$	$V_{17}[NNP]$	$-V_{ m dc}/6$
$V_6[POP]$	$2V_{ m dc}/6$	V_{18} [PNP]	$V_{ m dc}/6$
小矢量(N-type)	共模电压	中矢量	共模电压
V_1 [ONN]	$-2V_{\rm dc}/6$	V_7 [PON]	0
V_2 [OON]	$-V_{\rm dc}/6$	V_8 [OPN]	0
V_3 [NON]	$-2V_{\rm dc}/6$	V_9 [NPO]	0
V_4 [NOO]	$-V_{\rm dc}/6$	$V_{10}[NOP]$	0
V_5 [NNO]	$-2V_{dc}/6$	$V_{11}[NOP]$	0
V_6 [ONO]	$-V_{ m dc}/6$	V_{12} [PON]	0
零矢量	共模电压		
V_0 [000]	0		

当正常情况下,采用 LMZVM 的方法(如表1 所示),大矢量的共模电压为 ± V_{dc}/6,中矢量和零 矢量的共模电压为0。LMZVM 的矢量图如图3所示。假设矢量在I大区1小区时,开关次序如图4 所示。



2 维也纳整流器中点平衡控制研究

三电平存在中点不平衡问题,维也纳整流器也同样 存在^[9-10]。VIENNA 整流器开关状态对中电电位影响 VIENNA 整流器开关状态对中电电位影响如图 5 所示。



如图5(a)所示,当维也纳整流器的矢量为[POO] 时,会减少上侧电容电压;同理,如图5(b)所示,当维 也纳整流器的矢量为[OON]时,会减少上侧电容电 压;当维也纳整流器为[OOO]和[PNN],不会影响电 容电压,如图5(c)、5(d)所示;维也纳整流器的中矢 量也影响中点平衡,可以通过改变小矢量作用时间实 现对其控制,如图5(e)、5(f)所示。 在 I 大区, 假设当下侧电容电压大于上侧电容电 压时, 需要选择 N 型矢量的作用时间, 故本文选择 [OON] 作为调节中点平衡的矢量, 如图 6 所示。



同理,假设当上侧电容电压大于下侧电容电压 时,需要选择 P 型矢量的作用时间,故本文选择 [POO]作为调节中点平衡的矢量。

3 实验结果

为了验证所提出的共模电压抑制和中点平衡控制 方法的正确性,本文搭建了一台 10 kW 维也纳整流 器,实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

参数	数值
e_a , e_b , $e_c/{ m V}$	120
电网频率/Hz	50
直流侧电压/V	400
开关频率/Hz	5 000
参考电流/A	20
死区时间/μs	2.5
直流侧电容/μF	3 200
滤波器/mH	2.8

采用传统方法和本文提出 LMSVM 和 LMZVM 方法的实验对比波形如图(7~8)所示。



通过实验波形能够看出,采用传统方法,共模电 压达到 200 V。当采用本文算法以后,共模电压的峰 值在 70 V 左右,共模电压得到了很好的抑制。

采用本文算法以后的维也纳整流器线电压和电流 波形如图9所示。



通过图 9 可以看出,线电压波形为五电平,输入 电流波形质量良好。

采用本文算法后维也纳整流器电容电压实验波形如图 10 所示。通过波形能够看出,在 250 ms 的时候加入本文中点平衡控制算法,中点电位得到很好的控制。



4 结束语

维也纳整流器具有谐波小和滤波器体积小等优点 得到广泛关注,但是维也纳整流器存在共模电压高和 中点电位不平衡的问题。为此,本文针对维也纳整流 器,首先提出 LMZVM 实现共模电压抑制,当存在中点 不平衡问题时,提出 LMSVM 方法实现中点平衡控制。 本文提出方法能够同时实现共模电压抑制、中点 平衡以及电流跟踪控制。实验验证了所提算法能够实 现电流跟踪、共模电压抑制和中点平衡控制。

参考文献(References):

- [1] 王若醒,吴迎霞,杨恢宏,等.两级式T型三电平光伏逆变器的关键技术研究及实现[J].电力系统保护与控制, 2015,43(4):58-62.
- [2] 翦志强,司徒琴.三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(14):126-130.
- [3] 张明光,陈晓婧.光伏并网发电系统的低电压穿越控制策 略[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):28-33.
- [4] LEE J S, LEE K B. New modulation techniques for a leakage current reduction and a neutral-point voltage balance in transformerless photovoltaic systems using a three-level inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2014, 29(4):1720-1732.
- [5] LEE J S, LEE K B. Carrier-based discontinuous PWM method for vienna rectifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5):2896-2900.
- [6] LEE J S, LEE K B. Time-offset injection method for neutral-point AC ripple voltage reduction in a three-level inverter
 [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31

 (3):1931-1941.
- [7] DALESSANDRO L, ROUND S D, DROFENIK U, et al. Discontinuous space-vector modulation for three-level PWM rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008,23(2):530-542.
- [8] VARGAS R, CORTES P, AMMANN U, et al. Predictive control of a three-phase neutral-point-clamped inverter [J].
 IEEE Trans. Ind. Electron, 2007, 54(5):2697-2705.
- [9] JIANG W D, DU S W, CHANG L C, et al. Hybrid PWM strategy of SVPWN and VSVPWM for NPC three-level voltage-source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2010, 25(10):2607-2619.
- [10] ZHANG Z, THOMSEN O C, ANDERSEN M A E. Discontinuous PWM modulation strategy with circuit-level decoupling concept of three level neutral-point-clamped (NPC) inverter[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2013, 60(5): 1897-1906.

[**编辑:**李 辉]

本文引用格式:

王智敏.基于矢量调制的维也纳整流器共模电压抑制研究[J].机电工程,2018,35(3):298-301.

WANG Zhi-min. Common mode voltage suppression of Vienna rectifiers based on vector modulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(3):298-301. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn