

文章编号:1671-251X(2012)02-0049-04

DOI:CNKI:32-1627/TP.20120113.1319.014

三相电压不平衡情况下电机车整流技术的研究

吕康飞¹, 石超越²

(1. 淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223300;

2. 山西省电力勘测设计院, 山西 太原 030001)

摘要:针对煤矿井下直流电机车变流系统中存在三相电压不平衡而使传统的PWM整流器的交流侧出现负序电流分量的问题,提出了一种在三相电压不平衡情况下抑制PWM整流器交流侧负序电流分量的控制策略;详细介绍了该控制策略的具体实现。仿真及现场实验结果表明,采用该控制策略后,PWM整流器的交流侧电流波形基本接近正弦波形,实现了单位功率因数运行。

关键词:煤矿供电系统;牵引变流所;直流架线式电机车;不平衡三相电压;PWM整流器;负序电流
中图分类号:TD641 文献标识码:A 网络出版时间:2012-01-13 13:19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120113.1319.014.html>

Research of Rectification Technology of Electric Locomotive under Unbalanced Three-phase Voltage

LÜ Kang-fei¹, SHI Chao-yue²

(1. School of Physic and Electronic Electrical Engineering of Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China.

2. Shanxi Electric Power Exploration and Design Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: In view of problem of negative sequence current component in AC side of traditional PWM rectifier because of unbalanced three-phase voltage existed in converter system of underground DC electric locomotive, the paper proposed a control strategy of restraining negative sequence current component of AC side of PWM rectifier under unbalanced three-phase voltage. It introduced implementation of the control strategy in details. The results of simulation and field experiment showed that current wave of AC side of PWM rectifier is close to sine wave and realizes running with unity power factor after using the control strategy.

Key words: coal mine power system, traction converter station, DC trolley locomotive, unbalanced three-phase voltage, PWM rectifier, negative sequence current

0 引言

煤矿井下电机车是矿井巷道长距离运输的一种主要运输设备,担负着运输煤炭、矸石、材料、设备、人员等任务,其安全运行对确保煤矿安全生产有着重要意义。直流架线式电机车是电机车中的一种,其供电系统如图1所示^[1]。

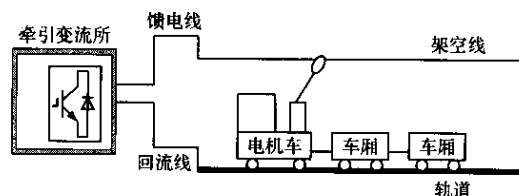


图1 直流架线式电机车供电系统

图1中,牵引变流所是安装在井下机电室的交流配电设备,其主要任务是将交流电转换为直流电

收稿日期:2011-11-07

基金项目:淮安市科技支撑计划项目(工业)(HAG2011018)

作者简介:吕康飞(1980-),男,江苏沛县人,硕士,现主要从事电能质量研究工作。E-mail:lvkf@cumt.edu.cn

供电机车使用。目前,牵引变流所的整流系统多是由晶闸管和整流变压器组成的相控整流系统。该系统各相电流中含有大量谐波并且电网侧的功率因数不高,需要配备专用滤波装置^[2],从而占用牵引变流所的大量空间。PWM 整流能够克服传统的相控整流系统的缺点,可实现电网侧单位功率因数运行、直流侧输出可调节、能量可双向流动等功能^[3-5],正逐步应用到直流架线式电机变流系统的改造中。常规的三相 PWM 整流器控制中,一般均假设三相电网电压平衡,但是通过对河北、山西、河南、山东等省的煤矿企业供电系统的实际测试,笔者发现在实际的三相电网中,由于各种原因常常造成电网电压的不平衡(不平衡度与煤矿电网的实际情况相关)。因此,在电网电压平衡条件下设计的 PWM 整流器,在电网电压不平衡时性能将恶化,交流侧出现负序电流分量,直流侧电压中也出现非特征次谐波分量。为解决上述问题,笔者从抑制交流侧负序电流分量的角度出发,研究了在煤矿供电系统三相电压不平衡情况下 PWM 整流器的控制问题。

1 三相电压不平衡情况下 PWM 整流器控制策略

三相电压不平衡情况下三相 PWM 整流器在 $d-q$ 坐标系下的数学模型为^[6-7]

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2}(E_d^p I_d^p + E_q^p I_q^p + E_d^N I_d^N + E_q^N I_q^N) \\ P_{c2} = \frac{3}{2}(E_d^N I_d^p + E_q^N I_q^p + E_d^p I_d^N + E_q^p I_q^N) \\ P_{s2} = \frac{3}{2}(E_q^N I_d^p - E_d^N I_q^p - E_q^p I_d^N + E_d^p I_q^N) \\ Q_0 = \frac{3}{2}(E_d^p I_d^p - E_q^p I_q^p + E_d^N I_d^N - E_q^N I_q^N) \\ Q_{c2} = \frac{3}{2}(E_d^p I_d^N - E_q^p I_q^N + E_q^N I_d^p - E_d^N I_q^p) \\ Q_{s2} = \frac{3}{2}(E_d^p I_d^N + E_q^p I_q^N - E_d^N I_d^p - E_q^N I_q^p) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_0 、 Q_0 分别为平均瞬时有功功率、平均瞬时无功功率; P_{c2} 、 P_{s2} 分别为 2 次有功功率的余弦项谐波峰值、正弦项谐波峰值; Q_{c2} 、 Q_{s2} 分别为 2 次无功功率的余弦项谐波峰值、正弦项谐波峰值; E 为电网电动势; I 为网侧电流; 上角 P 代表正序; 上角 N 代表负序。

在三相电压不平衡情况下,为了抑制三相 PWM 整流器交流侧负序电流分量,令 $I_d^N = I_q^N = 0$, 将其代入式(1),在只考虑 P_0 和 Q_0 控制的情况下,可得

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2}(E_d^p I_d^p + E_q^p I_q^p) \\ Q_0 = \frac{3}{2}(E_q^p I_d^p - E_d^p I_q^p) \end{cases} \quad (2)$$

从而可得正序电流参考值为

$$\begin{bmatrix} I_q^{p*} \\ I_d^{p*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3[(E_d^p)^2 + (E_q^p)^2]} \begin{bmatrix} E_q^p & -E_d^p \\ E_d^p & E_q^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^* \\ Q_0^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P_0^* 为平均有功功率参考值; Q_0^* 为平均无功功率参考值。

P_0^* 与直流侧平均电压有关,当直流电压调节器采用 PI 调节器时,直流电压调节器的输出与直流电流参考值对应^[3],则

$$P_0^* = [(K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s})(U_{dc}^* - U_{dc})]U_{dc}^* \quad (4)$$

式中: K_{vp} 为直流电压调节器的比例调节增益; K_{vi} 为直流电压调节器的积分调节增益; U_{dc}^* 为直流侧参考电压; U_{dc} 为直流侧实际电压。

如果要取得单位功率因数,则需令 $Q_0^* = 0$, 从而正序电流参考值就可由式(3)和(4)计算出来。

当电流内环调节器采用 PI 调节器时,利用前馈解耦控制原理可以求得正序电压为

$$\begin{cases} U_q^{p*} = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(I_q^{p*} - I_q^p) - \omega L I_d^{p*} + E_q^p \\ U_d^{p*} = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(I_d^{p*} - I_d^p) + \omega L I_q^{p*} + E_d^p \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{ip} 、 K_{il} 分别为电流内环调节器的比例调节增益和积分调节增益; s 为复频率; ω 为角频率; L 为网侧滤波电感。

由以上分析可得出三相电压不平衡情况下抑制交流侧负序电流分量的控制策略,如图 2 所示(其中 $D = (E_d^p)^2 + (E_q^p)^2$)。

2 仿真分析

采用 Matlab2007b/Simulink 仿真软件对上述控制策略进行验证。由于煤矿供电系统的实际情况不同,电网电压的不平衡度亦不同,仿真中假定电网电压的不平衡度为 10%。仿真参数: $E_m = 311$ V, $L_s = 3.6$ mH, $R_s = 0.2$ Ω , $C = 2$ 350 μ F。采用瞬时对称分量法分离正序、负序电压、电流。仿真结果如图 3~5 所示。

从图 3 可看出,系统交流侧电流已达到平衡;从图 4 可看出,电压、电流同相位,系统功率因数保持在 1 附近;从图 5 可看出, $D_{TH} = 1.46\%$, 说明交流侧电流波形变好。仿真结果表明,采用抑制交流侧

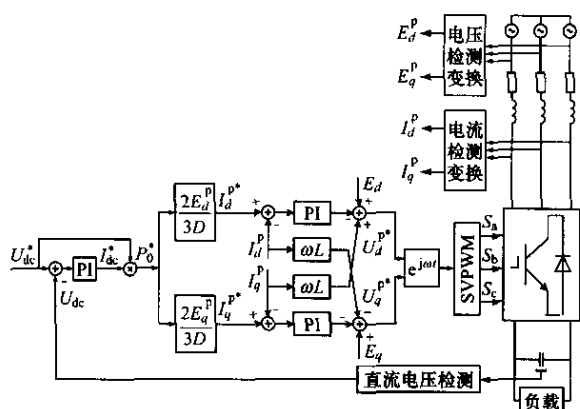


图 2 三相电压不平衡情况下抑制交流侧负序电流分量的控制策略

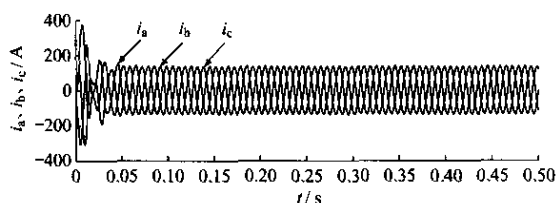


图 3 抑制交流侧负序电流分量时的交流侧电流波形

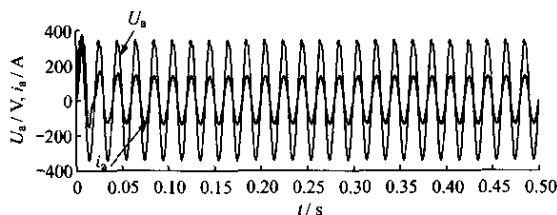


图 4 抑制交流侧负序电流分量时的 a 相电压、电流波形

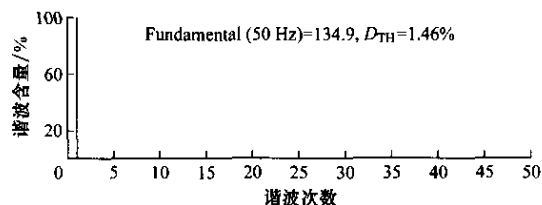


图 5 抑制交流侧负序电流分量时的交流侧电流频谱

负序电流分量的控制策略后,三相 PWM 整流器系统的控制性能得到了改善。

3 现场实验结果

现场实验地点选择的是山西省某煤矿 10 t 直流架线式牵引变流所,其直流架线式电机车 PWM 整流器系统结构如图 6 所示。PWM 整流器直流侧额定电压为 250 V,交流侧电压有效值为 220 V,采用 SVPWM 调制技术。控制器采用浮点型 DSP TMS320F28335 芯片,IPM 型号为 6MBI300U-120,功率模块驱动采用东芝公司的高速、高共模比光耦 TLP5599。现场实验结果如图 7~9 所示(图 7 和图 9 的纵坐标为每格 50 V 或每格 5 A)。

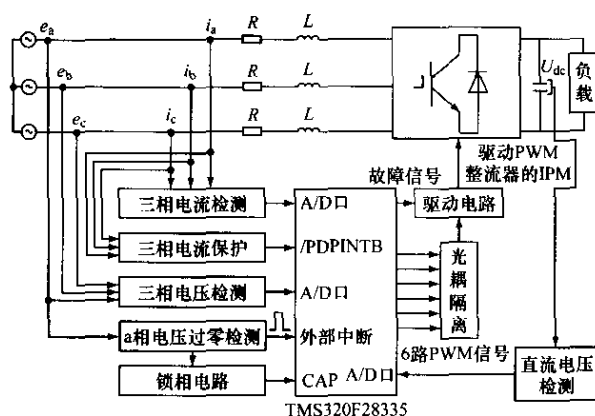


图 6 某矿直流架线式电机车 PWM 整流器系统结构

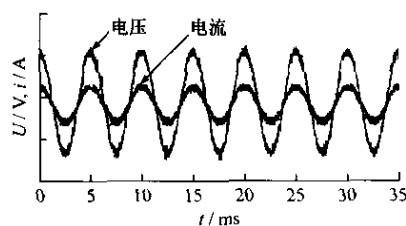


图 7 PWM 整流器交流侧电压、电流波形

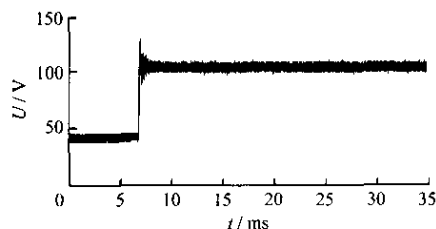


图 8 PWM 整流器直流侧电压波形

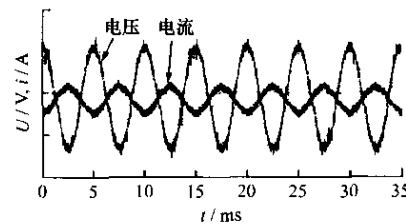


图 9 PWM 整流器能量回馈时交流侧电压、电流波形

从图 7 可看出,三相 PWM 整流器系统交流侧电流总的谐波含量大大降低,其波形基本接近正弦波,网侧电流与电网电压基本同相位,实现了单位功率因数运行。从图 8 可看出,三相 PWM 整流器系统直流侧电压波动小,达到了稳态误差要求,说明系统可以对直流侧电压进行控制。在控制 PWM 整流器前,先利用 6MBI300U-120 的续流二极管对电容进行预充,所以,可控整流投入运行时初始电压不为零,而是续流二极管不控整流时输出的电压。从图 9 可看出,能量回馈时,三相 PWM 整流器系统交流侧电流总的谐波含量小,基本接近正弦,功率因数为-1。

文章编号:1671-251X(2012)02-0052-04

DOI:CNKI:32-1627/TP.20120113.1320.015

变压器主保护新判据的研究

何人望¹, 谢伟¹, 宋海燕², 吴迅¹

(1. 华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对传统的变压器主保护无法正确识别变压器励磁涌流与内部故障电流的问题,提出了一种基于差动电流间断角的变压器主保护新判据。该判据采用 sym4 小波变换对变压器励磁涌流及内部故障电流信号进行处理,得出两者在 d1 尺度下间断角的明显差异特征,从而可正确区分变压器励磁涌流与内部故障电流。仿真结果验证了该判据的有效性。

关键词:变压器主保护;小波变换;励磁涌流;故障电流;间断角

中图分类号:TD611.5 文献标识码:A 网络出版时间:2012-01-13 13:20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120113.1320.015.html>

Research of a New Criterion of Main Protection of Transformer

HE Ren-wang¹, XIE Wei¹, SONG Hai-yan², WU Xun¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering of East China Jiaotong University,

Nanchang 330013, China.

2. College of Electrical and Information Engineering of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In view of problems that traditional main protection of transformer cannot identify inrush current and internal fault current of transformer, the paper proposed a new criterion of main protection of

收稿日期:2011-09-26

基金项目:华东交通大学科研基金资助项目(09DQ08)

作者简介:何人望(1963-),男,江西信丰人,副教授,博士研究生,现主要从事电力系统及其自动化、继电保护等方面的研究工作。E-mail: freeman2he@126.com

4 结语

针对煤矿井下直流架线式电机车 PWM 整流系统易受电网电压不平衡影响的问题,研究了一种用于电网电压不平衡时抑制交流侧负序电流分量的控制策略,并将该控制策略应用到煤矿井下 10 t 直流架线式电机车上。仿真及现场实验结果表明,该控制策略消除了三相电压不平衡的影响,降低了谐波次数,减小了 PWM 整流系统的体积,节省了牵引变流所的占地空间,效果显著。

参考文献:

[1] 顾永辉,范廷璚.煤矿电工手册(修订本)第三分册:煤矿固定设备电力拖动[M].北京:煤炭工业出版社,1999.

[2] SOOD V K. HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.

[3] WU Rusong, DEWAN S B, SLEMON G R. Analysis of an AC-to-DC Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1991(3): 355-364.

[4] 周永鹏,赵金程.三相电压型 PWM 整流的新型直接功率控制[J].电气传动,2011(3):40-42,47.

[5] 单栋梁,宋书中,马建伟,等.能量回馈式电压型 PWM 整流器的研究[J].工矿自动化,2010(6):77-80.

[6] 杨国清.电网电压不平衡双馈风力发电机改进控制方法[J].电力系统及其自动化学报,2011(4):76-81.

[7] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.