

电气化铁路背靠背 SVG 补偿系统方案研究

常 非, 李群湛, 赵丽平, 张 丽

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对电气化铁道牵引供电系统存在大量的负序、谐波、无功等问题, 提出了基于平衡变压器的背靠背 SVG 补偿方案. 方案中综合潮流控制器装置主要由两个背靠背的单相二极管箝位型三电平电压源变流器构成, 主要用于传递有功功率、补偿无功功率及谐波, 使得牵引供电系统相对电力系统而言, 是一个三相对称纯阻性网络. 以实测牵引负荷作为给定负荷进行仿真验证, 结果表明, 该方案能实时动态地补偿电气化铁道谐波、无功和负序电流, 改善电气化铁道电能质量.

关键词: 电气化铁路; 背靠背静止无功发生器; 平衡变压器; 电流平衡补偿; 电能质量

中图分类号: TM922.3

文献标志码: A

0 引言

负序、无功、谐波一直是电气化铁路牵引供电系统存在的技术难题, 为了解决这些问题, 目前用于电铁电能质量治理的方式主要有无源滤波和有源滤波 2 种. 目前无源滤波方式的研究相对比较成熟, 较多地通过 SVC 等补偿装置来完成, SVC 用来动态补偿无功和谐波, 但很难解决负序问题; 而有源滤波方式的治理主要是通过 SVG 装置来完成. 目前电气化铁路领域研究较热的是同相牵引供电技术, 包括基于对称补偿技术的同相供电系统和基于潮流控制器的同相供电系统^[1-4]. 同相供电方案可取消电分相, 实现负序、无功及谐波的综合治理, 效果较好, 但是同相供电技术的推广和使用还需要一段时间. 为此, 笔者采用 SVG 背靠背连接与固定补偿相结合的方式, 在现有供电方式的基础上, 就电气化铁路存在的电能质量问题进行综合解决. 最后以实测牵引负荷作为给定负荷, 通过 MATLAB 仿真验证了该方案的可行性.

1 基于平衡变压器的背靠背 SVG 补偿系统

背靠背 SVG 方案适合于无功、谐波、负序的综合电能质量补偿. 牵引变压器采用 YN-vd 平衡变压器的接线方式, 这种平衡变压器低压侧的两相输出电路既完全独立, 又无互感耦合关系. 负

荷端口配置 3, 5 次谐波补偿装置, 同时将两台 SVG 的输出端通过隔离变压器分别接入两个端口负荷, 然后将 SVG 的直流电容并联, 从而组成了牵引供电系统以及补偿系统, 如图 1 所示.

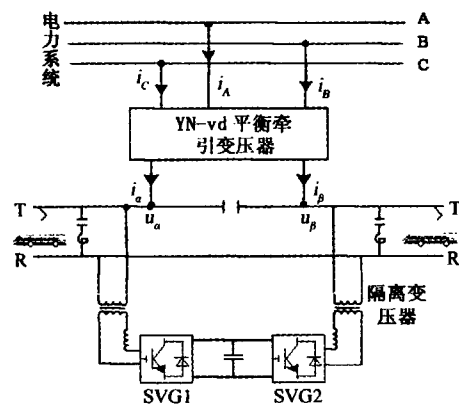


图1 背靠背 SVG 补偿系统

Fig.1 Structure of back-to-back SVG compensation system

两个背靠背 SVG, 通过共同使用一个直流电容, 将两个单相 SVG 连接起来, 系统可实现无功、谐波、负序的综合治理. 两臂负荷相差较大时, 可以根据负荷的差量, 通过中间的直流电容传递有功, 使得两个供电臂负荷基本相等, 这样通过平衡变压器可以在系统一次侧等效为对称负荷从而解决负序问题^[5-7].

2 三电平潮流控制器主电路结构

三电平潮流控制器如图 2 所示, 它由“背靠

收稿日期:2011-05-02;修订日期:2011-06-16

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAA12B05)

作者简介:常非(1986-),男,陕西渭南人,西南交通大学硕士研究生. 通讯作者:李群湛(1957-),男,西南交通大学教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析与控制, E-mail:lqz3431@263.net.

背”的四象限电压型变流器组成,主电路为二极管箝位型三电平拓扑结构,两端口变流器通过两直流电容耦合在一起.其主要功能在于实现牵引负荷功率在牵引变压器不同负荷端口之间的交换.牵引负荷与普通电力负荷的主要区别之一就

是其具有不对称性,利用潮流控制器将两相牵引变压器其中一相并联接入另一相,对牵引负荷产生的无功功率与谐波均由潮流控制器予以补偿,可使牵引变压器仅仅传递有功功率,从而大大降低其容量,实现原边三相电流完全对称.

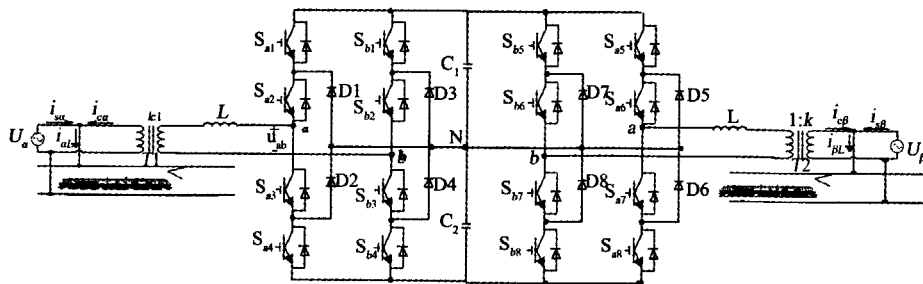


图2 综合潮流控制器结构

Fig.2 Structure of integrated power flow controller

三电平潮流控制器左右结构对称,下面以左侧VSC为例来介绍其工作结构。 $S_{a1} \sim S_{a4}$ 、 $S_{b1} \sim S_{b4}$ 为额定值3 300 V、1 200 A的IGBT开关, $D_1 \sim D_4$ 为箝位二极管, C_1 和 C_2 为直流侧两个支撑电容。A桥臂与直流分压电容 C_1 、 C_2 组成一个半桥式三电平变流器,其输出相电压为 U_{aN} ;同理B桥臂与 C_1 、 C_2 也组成一个半桥式三电平变流器,其输出相电压为 U_{bN} 。由于半桥式二极管箝位型三电平变流器输出相电压具有 $\pm U_d/2, 0$,共3个电平,所以单相全桥二极管箝位型三电平变流器的输出线电压 $U_{ab} = U_{aN} - U_{bN}$,将出现 $0, \pm U_d/2, \pm U_d$ 共5个电平。

与传统两电平变流器相比,二极管箝位三电平变流器每一个功率器件所承受的关断电压仅为直流侧电压的一半.这样,在相同的情况下,直流电压可以提高1倍,容量也可以提高1倍。

从单相全桥式二极管箝位三电平变流器结构可以看出,开关器件承受的关断电压为 $U_d/2$,是传统两电平变流器中开关器件承受电压应力的一半.由于变流器输出电压有5个电平,所以输出电压与两电平变流器输出电压相比更接近正弦,谐波含量更小,可以降低开关器件频率,减小开关损耗。

3 潮流控制器控制原理

3.1 电流谐波及无功检测方法

检测电路采用了基于鉴相原理的瞬时谐波电流检测法^[5-7],如图3所示.由于 α 、 β 两相负载相互独立,故以 α 相为例,设 α 相的电压为

$$u_a(t) = U \sin \omega t \quad (1)$$

α 相的负载电流用傅里叶级数可表示为

$$i_{aL}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = I_{ap} \sin \omega t + I_{aq} \cos \omega t +$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (2)$$

式中: $i_p(t)$ 、 $i_q(t)$ 、 $i_h(t)$ 依次为基波有功分量、基波无功分量和谐波分量。

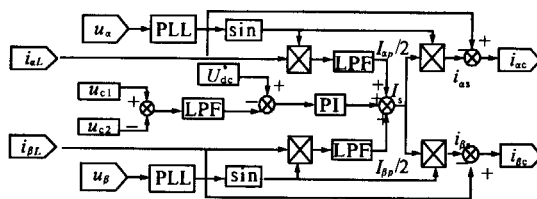


图3 平衡补偿方法的电流谐波及无功检测框图

Fig.3 The algorithm of harmonic and reactive current detecting

锁相环检测出与电压同相位的单位正弦信号,将它与式(2)的负载电流信号相乘,可得到:

$$i_{aL}(t) \sin \omega t = \frac{I_{ap}}{2} - \frac{I_{ap}}{2} \cos 2\omega t + \frac{I_{aq}}{2} \sin 2\omega t +$$

$$\sin \omega t \cdot i_h(t) = \tilde{I}_a + \tilde{I}_a \quad (3)$$

通过低通滤波器滤去交流分量之后,得到的直流分量等于 $I_{ap}/2$,即为 α 相负载电流有功分量幅值的一半.依此类推,可得到 $I_{bp}/2$ 这两个直流信号之和即为所需的隔离变压器输出电流幅值 I_a 、 I_b 分别乘上锁相环输出的与 α 、 β 相电压同相位的单位正弦信号,即可得到所需要的两相输出电流 $i_{ac}(t)$ 和 $i_{bc}(t)$;其分别与负载电流 i_{aL} 、 i_{bL} 做差,即得两相补偿电流 i_{ac} 和 i_{bc} 。

变流器工作时,其能量损耗会引起直流侧电容电压 u_d 的降低,但为了保证PWM变流器的正常工作, u_d 必须维持恒定.为此算法中增加了一

个检测直流电压的 PI 控制器,以保持直流环节的电压。算法定义逆变器吸收的有功功率由两相均摊,PI 控制器的输出与 $I_{ap}/2$ 、 $I_{bp}/2$ 一起构成新的 I_s ,以维持逆变器的正常工作。

3.2 三角载波电流控制策略^[8]

三角载波电流控制的载波频率固定,且等于三角载波的频率,适合大容量多重化补偿场合,其原理框图如图 4 所示。该方法将潮流控制器指令电流 i_{ac} 、 i_{bc} 与实际输入电流 i_{acf} 、 i_{bcf} 的差值送入 PI 调节器,将调节结果作为变流器的输出电压给定值,然后与多电平三角载波进行比较,得到功率器件的开关信号,驱动变流器工作。

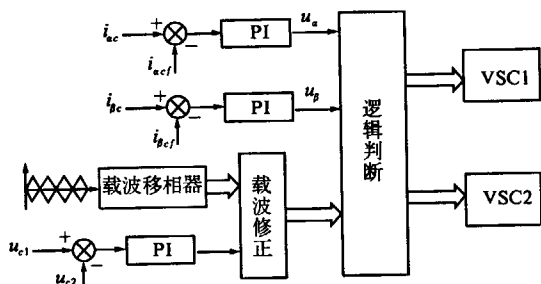


图 4 潮流控制器控制原理框图

Fig. 4 Block diagram of power flow controller

为了抑制中点电位偏移,在控制输出补偿电流的同时,加入了电容电压均衡控制环节。将电容电压偏差 $\Delta u = u_{c1} - u_{c2}$ 送入 PI 调节器,用调节结果对载波占空比进行修正,以调节分压电容充放电时间,最终实现电容电压均衡。

4 仿真验证

仿真验证时以实测牵引负荷作为给定负荷,牵引负荷数据源于牵引变电所实测,数据长度为 24 h,其负荷具有随机波动性、功率因数低及谐波含量高的特点。笔者选取其中的一段负荷数据进行仿真验证。

采用 Matlab/simulink 建立了与图 1 对应的牵引供电系统仿真模型^[9],平衡变压器采用 YNvd 接线。仿真中取直流侧电压为 3 300 V,隔离变压器变比 $K_T = 27\,500\text{ V}/1\,770\text{ V}$,三角载波频率 $f_c = 1\,000\text{ Hz}$,直流侧支撑电容 $C_1 = C_2 = 0.1\text{ F}$,三电平 VSC 交流侧电感参数 $L_1 = L_2 = 2\text{ mH}$,仿真结果如图 5~9 所示。

(1) 无功补偿分析。在由平衡变压器和 SVG 结合构成的牵引供电补偿系统下,牵引变压器副边两端口各承担 1/2 的有功功率,补偿之前牵引变压器副边端口平均功率因数为 0.923 3,补偿之

后为 0.999 9(接近 1),无功补偿达到满意效果。

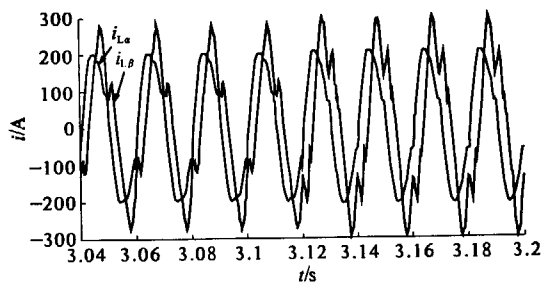


图 5 牵引负荷电流波形

Fig. 5 Current waveform of traction load

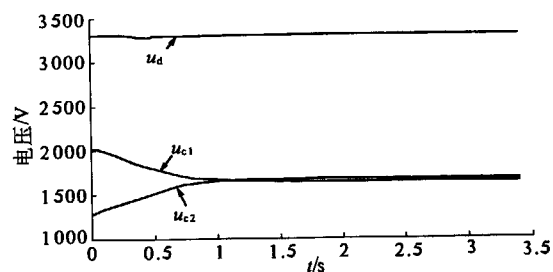


图 6 直流侧电压及电容电压

Fig. 6 DC voltage and the capacitor voltage

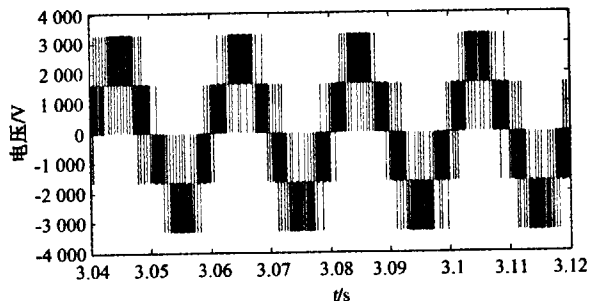


图 7 VSC 单元输出电压波形

Fig. 7 Output voltage waveform of VSC unit

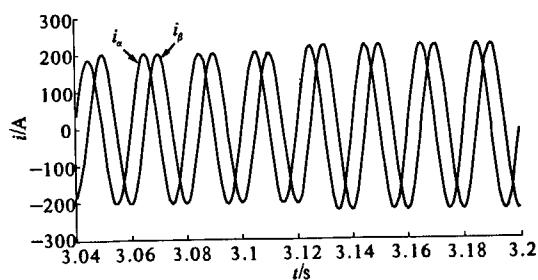


图 8 补偿之后平衡变压器二次侧电流波形

Fig. 8 Primary current of balance transformer after compensation

(2) 谐波抑制分析。根据国标规定,该牵引变电所注入系统的各次谐波电流允许值见表 1,与仿真值相比,符合国标要求。可见,背靠背 SVG 对电流谐波的补偿作用很明显,不会对电力系统供电质量造成影响。

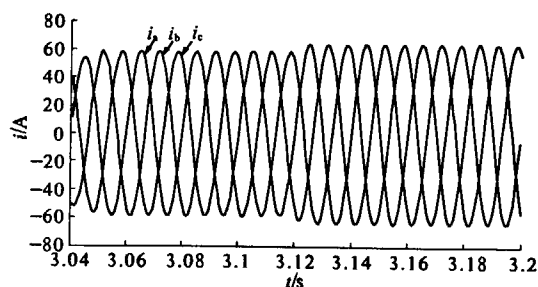


图9 补偿之后系统侧电流波形

Fig.9 The three-phase current of power system side after compensation

表1 各次谐波电流允许值与仿真值对照表

Tab.1 Comparison between the harmonic current allowable value and the actual value

谐波次数	谐波电流允许值/A	仿真值/A
3	9.6	3.68
5	9.6	1.17
7	6.8	1.18
9	3.2	0.37
11	4.3	0.37

(3) 负序补偿分析. 图8表明, 补偿后, 牵引变压器副边两相电流幅值相等, 相位互差 90° , 从图9可以看出, 补偿后系统侧电流波形三相对称, 补偿效果良好.

5 结论

经仿真验证, 基于单相全桥式二极管箝位型三电平电压源变流器构成的背靠背SVG补偿系

统不仅能够动态补偿系统中的无功电流, 而且还能够补偿谐波以及实现有功功率在两臂之间的流动, 是一种较为理想的补偿装置.

参考文献:

- [1] 李群湛, 贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 9-11, 28.
- [2] 解绍锋, 李群湛, 贺建闽, 等. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(2): 109-113.
- [3] 张秀峰, 高仕斌, 钱清泉, 等. 基于阻抗匹配平衡变压器和AT供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 32-37.
- [4] 吕晓琴, 张秀峰. 基于有源滤波器和V/x结线的同相牵引供电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(6): 73-78.
- [5] 欧阳帆, 周有庆, 郭自勇. 基于平衡变压器的电流平衡补偿方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 53-57.
- [6] 戴瀚波, 林海雪, 雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 80-84.
- [7] 蒋斌, 颜钢锋, 赵光宙. 一种单相谐波电流检测法的研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 65-69.
- [8] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

Research on Back-to-Back SVG Compensation Scheme Used in Electrified Railway

CHANG Fei, LI Qun-zhan, ZHAO Li-ping, ZHANG Li

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

Abstract: According to the problems of negative sequence, reactive and harmonic that caused by traction power supply system, back-to-back SVG compensation scheme based on balance transformer is proposed. Comprehensive power flow controller is composed of two back-to-back single-phase diode-clamped three-level voltage source converter. It mainly transfers the active power, compensates the reactive power and harmonic current simultaneously, making the traction power supply system is a three-phase symmetrical pure resistant load. According to matlab/simulink, it is proved that when regarding the real-tested traction load as the given load, the scheme can real-timely and dynamically compensate negative sequence, reactive and harmonic for improving power quality of electrified railway.

Key words: electrified railway; back-to-back SVG (Static Var Generator); balance transformer; current balance compensation; power quality