## 基于 Y / > / ▽平衡变压器的同相牵引供电系统

张友鹏,董海燕

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:针对目前电气化铁道使用的斯科特变压器和阻抗匹配变压器的缺点以及同相供电系统补偿电流实时 检测方法的不足,提出了基于 Y/>/▽平衡变压器的同相牵引供电系统方案。分析了 Y/>/▽平衡变压器平衡 变换条件,给出了无锁相环补偿电流实时检测方法,且采用 MATLAB/Simulink 搭建整个系统的仿真模型。在 仿真系统中,用信号发生器产生与电源电压同频同相的正、余弦信号;在实验系统中,采用查询正、余弦表的 方法产生与电源电压同频同相的正、余弦信号、取消了锁相环的使用。结果表明、所提同相供电方案实现了 三/单相的综合补偿,无锁相环补偿电流实时检测提高了补偿电流实时检测的准确性。

关键词:Y/>/▽平衡变压器;补偿电流;锁相环;实时检测;准确性;变压器

中图分类号: TM 922.3:U 223

文献标识码 A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.018

#### 引言 0

我国电气化铁路采用单相工频交流牵引供电系 统,实现高速、重载电力牵引时,由于自身结构和牵 引负荷的特殊性,在负序、谐波及无功等方面对电力 系统造成了极为严重的三相不平衡。

采用平衡变压器和有源滤波器的同相供电方案 能够从根本上解决这一问题。文献[1-2]提出了有源 滤波器分别与斯科特变压器、阻抗匹配平衡变压器 结合的同相供电方案,但这些组合具有一定的制约 性:斯科特平衡变压器高压侧中性点不能直接接地, 且没有三角形接线绕组;阻抗匹配平衡变压器由于 低压两相之间有电气联系,不宜直接用于电气化铁 路的 AT 供电方式<sup>[3-4]</sup>。

本文给出的 Y/>/▽平衡变压器兼有斯科特变 压器和阻抗匹配平衡变压器二者的优点。将 Y/>/▽ 平衡变压器与基于有源滤波器的平衡变换装置 (BCD)相结合,采用无锁相环补偿电流实时检测方 法,基本消除了负序电流,且能动态地补偿谐波、无 功,是较理想的新型同相牵引供电方案,能满足安 全、高速、重载牵引的发展要求。

#### 牵引供电系统结构 1

同相牵引供电系统如图1所示,它由牵引网和 同相牵引变电所组成,其中同相牵引变电所主要由 牵引变压器和有源滤波器构成,其与现有系统在结构 上的主要区别是[5-6]:将现有变电所的2个供电臂合 并,取消分相绝缘器,每个变电所输入侧的接线方式 相同,输出侧只有一个绕组给机车供电,使各个变电 所输出相位相同的电压。为了防止电力系统多个变 电所及牵引网构成环路,不同变电所之间采用分段

收稿日期:2012-01-25;修回日期:2013-02-26

基金项目: 甘肃省科技厅科技支甘项目(1011, IKCA172)

Project supported by Department of Science and Technique of Gansu Province(1011JKCA172)



图 1 同相牵引供电系统结构示意图

Fig.1 Structure of co-phase traction power supply system

绝缘器隔开。尽管设置了分段绝缘器,但是它的数目 减少了一半,如果再辅之以自动过分相设备,电力机 车就可以直接通过,不会对机车及牵引网造成不利 的影响,几乎不会造成机车功率的损失及车速的降 低,因而能满足安全、高速、重载牵引的要求。

## 2 Y/>/▽平衡变压器平衡变换条件

Y/>/▽平衡变压器的接线方式如图 2 所示,  $W_{A}, W_{B}, W_{C}$  是变压器的三相绕组,  $W_{a}$  和  $W_{cl}$  构成低 压侧  $\alpha$  相,  $W_{a2}$ ,  $W_{b2}$  和  $W_{c2}$  构成低压侧  $\beta$  相, 三相高 压侧相电压与两相低压侧相电压之比为 $K_{\circ}$ 



图 2 Y/>/▽平衡变压器接线图 Fig.2 Connection diagram of Y/>/ $\bigtriangledown$ balanced transformer

按磁势平衡原理,原、副边电流变换关系为:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/3 \\ 0 & 2/3 \\ -1/\sqrt{3} & -1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix}$$
(1)

所以,正序电流和负序电流表达式为:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{I}_{+} = \frac{1}{3} \left( \mathbf{I}_{A} + a\mathbf{I}_{B} + a^{2}\mathbf{I}_{C} \right) = \frac{1}{3K} \left( \mathbf{I}_{\alpha} e^{j30^{\circ}} + a\mathbf{I}_{\beta} \right) \\ \mathbf{I}_{-} = \frac{1}{3} \left( \mathbf{I}_{A} + a^{2}\mathbf{I}_{B} + a\mathbf{I}_{C} \right) = \frac{1}{3K} \left( \mathbf{I}_{\alpha} e^{-j30^{\circ}} + a^{2}\mathbf{I}_{\beta} \right) \end{aligned}$$
(2)

**山** 3 3K 3K 电流不平衡度为.

$$\varepsilon_{I} = \frac{I_{-}}{I_{+}} = \sqrt{\frac{\lambda^{2} + 1 - 2\lambda\cos(\varphi_{\beta z} - \varphi_{\alpha z})}{\lambda^{2} + 1 + 2\lambda\cos(\varphi_{\beta z} - \varphi_{\alpha z})}}$$
(3)

其中,电流比 $\lambda = I_{\alpha}/I_{\beta}, \varphi_{\alpha\alpha}, \varphi_{\beta\alpha}$ 分别为 $\alpha, \beta$ 相负载阻抗角。

由式(3)可得 Y/>/▽平衡变压器电流不平衡度 曲线,如图 3 所示。从图中可以看出:

a. 当一个供电臂空载时,电流不平衡度趋近于1;

**b.** 只有当电流比 $\lambda$ =1,且负载阻抗角差 $\varphi_{\beta\omega}-\varphi_{\alpha\omega}=0$ 时,电流不平衡度 $\varepsilon_{l}=0$ ,即当两供电臂负载完全相同时,Y/>/▽平衡变压器所引发的电力系统的负序电流为0,变压器原边的电流才是三相对称的。

单相负载引起的三相电力系统不对称性,通过 采用 Y/>/▽平衡变压器可以得到改善,但是改善程 度与牵引负载有关。由于牵引负载的随机性,只采用 Y/>/▽平衡变压器难以达到三相电流对称。



图 3 Y/>/▽平衡变压器电流不平衡度曲线 Fig.3 Current imbalance curve of Y/>/▽ balanced transformer

#### 3 BCD 的结构及无锁相环补偿电流实时检测

为了实现同相供电,并改善电能质量,在变电所 内安装 BCD,使变压器的两副边绕组均输出幅值相 同的纯有功电流,从而单相非阻性负载相对于三相 电力系统是对称的纯阻性负载。

### 3.1 BCD 的结构

BCD的结构示意图如图 4 所示,它由 2 个单相的四象限变流器组成,2 个变流器"背靠背"地连接在一起,共用一个直流环节,以实现有功能量的传递<sup>[78]</sup>。

设牵引网电压和负载电流分别为:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \gamma_n) \\ \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{2} U_n \cos(\omega t + \gamma_n) \end{bmatrix}$$
(4)

$$i_{\rm L}(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \gamma_n) = \sqrt{2} I_{1p} \sin \omega t + \sqrt{2} I_{1q} \cos \omega t + h(t)$$
(5)  
$$I_{1p} = I_1 \cos \varphi_1, \quad I_{1q} = I_1 \sin \varphi_1$$
$$h(t) = \sum_{n=3}^{+\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$



图 4 BCD 结构示意图 Fig.4 Structure of BCD

BCD 的调节目标是使变压器的 2 个绕组均输出 幅值相同的纯有功电流,因此设电源电流的期望值为:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_{sr} \sin(\omega t + \gamma_1) \\ \sqrt{2} I_{sr} \cos(\omega t + \gamma_1) \end{bmatrix}$$
(6)

负载的有功功率都应该由电源提供,所以在一 个电源周期 T 内,电源提供的能量与负载需要的能 量相等,由此得:

$$I_{\rm sr} = \frac{1}{2} I_{1p} \tag{7}$$

#### 3.2 无锁相环补偿电流实时检测

无论是采用单相电路有功电流分离法还是单相 瞬时无功理论法检测谐波和无功电流,都要用锁相 环产生与接触网电压同频同相位的单位正、余弦信 号<sup>[9]</sup>。由于电力机车是一个急剧变化的负荷,会引起 牵引供电系统接触网电压的波动,当存在较大波动 时,较大的频率偏移将会导致锁相环处于失锁状态, 从而影响补偿电流的准确检测。

将式(4)中  $\alpha$  供电臂牵引网电压两边同时乘以  $\sin(\omega t - \theta)$ ,并在一个周期内积分后取平均值,则有:

$$U_p = \frac{\sqrt{2}}{2} U_1 \cos(\gamma_1 + \theta) \tag{8}$$

同理,将式(4)中  $\alpha$  供电臂牵引网电压两边同时 乘以 cos( $\omega t - \theta$ ),并在一个周期内积分后取平均值, 则有:

$$U_q = \frac{\sqrt{2}}{2} U_1 \sin(\gamma_1 + \theta) \tag{9}$$

将式(8)、(9)联立求解,可推得牵引网基波电压 的有效值和初相位为:

$$\begin{cases} U_1 = \sqrt{2(U_p^2 + U_q^2)} \\ \gamma_1 = -\theta + \arctan \frac{U_q}{U_p} \end{cases}$$
(10)

同理可得负载电流的有效值和初相位为:

$$I_{1} = \sqrt{2(I_{p}^{2} + I_{q}^{2})}$$

$$\varphi_{1} = -\theta + \arctan \frac{I_{q}}{I_{p}}$$
(11)

补偿电流为:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha}(t) \\ i_{\beta\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\rm L}(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$
(12)

综上所述,图 5 给出了基于无锁相环的补偿电流 实时检测电路图,图中没有使用锁相环, $sin(\omega t - \theta)$ 、  $cos(\omega t - \theta)$ 是由信号发生器产生的与电压同频率的 正、余弦信号,其中  $\theta$ 为任意角。





### 4 仿真分析

为了观察本文提出的同相供电系统的运行效 果,验证本文提出的补偿电流检测方法的正确性,针 对图 1 给出的系统及图 4 给出的 BCD,采用单极性 滞环电流控制<sup>[10-11]</sup>和图 5 所示无锁相环补偿电流实 时检测,利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型<sup>[12-13]</sup>, 并进行仿真分析,对象是一列满载运行的 8250 kV·A 电力机车,负载电流为:

 $i_{\rm L}(t) = 300\sqrt{2}\sin(\omega t - 30^\circ) + 80\sqrt{2}\sin(3\omega t - 75^\circ) +$ 

 $20\sqrt{2}\sin(5\omega t - 30^\circ) + 6\sqrt{2}\sin 7\omega t$ 

系统仿真模型参数如下:牵引网电压 27 500 V, 降压变压器变比 10:1,直流侧电压 4 200 V,电感 0.2 mH,电容 20 mF,环宽 20 A。

图 6 为负载电流波形,含有 26% 的 3 次谐波、 6.4% 的 5 次谐波、1.9% 的 7 次谐波。图 7 为 BCD 输出的补偿电流波形,可以看出,α供电臂侧的单相 变流器不仅要提供 1/2 的基波有功功率而且要提供 负载端口的谐波与无功,所以波形中含有谐波分量, β 供电臂侧的单相变流器仅传递 1/2 的基波有功功 率,所以波形为正弦波。



图 6 负载电流波形 Fig.6 Waveform of load current



Fig.7 Waveforms of compensating current

图 8 和图 9 为加入 BCD 后 Y/>/▽牵引变压器 副边和原边电流波形,两侧电流完全对称,几乎不含 谐波和无功,实现了综合补偿。



图 8 牵引变压器副边电流波形





图 9 牵引变压器原边电流波形

Fig.9 Current waveforms of transformer primary winding

### 5 结论

a. Y/>/▽平衡变压器绕组数目较少,阻抗匹配 关系容易得到满足,因而制造工艺简单。高压侧可以 直接接地,并可降低绝缘制造成本,低压侧两相之间 没有电气联系,其中一个绕组三角形联接,能构成激 磁电流 3 次谐波分量的通路,改善了电势波形。这既 适用于我国 110 kV 电压等级及以上高压输电系统 中性点运行方式,也适用于电气化铁路的高电压、大 容量、远距离的 AT 供电方式。

b. 无锁相环补偿电流实时检测,提高了补偿电流实时检测的准确性。目前,这种检测方法已经应用于实验室研究,用查表的方法产生与电压同频同相的正、余弦信号。即采用 DSP28335 芯片,用 C 语言编写程序,生成正、余弦表。

c. 同相供电系统可以实现铁道单相牵引负载到 三相电力系统的平衡变换。单相负载虽然产生了大 量的谐波,并消耗无功,但对于电力系统而言,是一 个三相对称的纯阻性负载。

#### 参考文献:

[1] 曾国宏,郝荣泰. 基于有源滤波器和斯科特变压器的同相供电系统[J]. 北方交通大学学报,2003,27(4):84-90.

ZENG Guohong, HAO Rongtai. Cophase traction supply system

based on active power filter and Scott transformer[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(4):84-90.

[2] 曾国宏,郝荣泰.基于有源滤波器和阻抗匹配平衡变压器的同相 供电系统[J].铁道学报,2003,25(3):49-54.

ZENG Guohong, HAO Rongtai. Cophase traction supply system based on active power filter and impedance matching balance transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25 (3):49-54.

- [3] 张秀峰,钱清泉,李群湛. 基于有源滤波器和 AT 供电方式的新型 同相牵引供电系统[J]. 中国铁道科学,2006,27(4):73-77.
  ZHANG Xiufeng,QIAN Qingquan,LI Qunzhan. A new cophase traction power supply system based on active filter and AT traction power supply method[J]. China Railway Science,2006, 27(4):73-77.
- [4] 张秀峰,连级三.利用电力电机技术构建的新型牵引供电系统 [J]. 变流技术与电力牵引,2007(3):49-59.

ZHANG Xiufeng,LIAN Jisan. New traction power supply system constructed by power electronic technology[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007(3):49-59.

[5] 贺建闽,李群湛.用于同相供电系统的对称补偿技术[J].铁道学报,1998,20(6):47-51.

HE Jianmin,LI Qunzhan. Symmetrical compensation technology used in feeding system without phase exchange[J]. Journal of the China Railway Society,1998,20(6):47-51.

[6] 贺建闽,李群湛. 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.

HE Jianmin,LI Qunzhan. Electrified railway feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4):9-11.

[7] 唐敏,李群湛,贺建闽. 牵引变电所无功谐波综合补偿方案研究[J]. 电网技术,2004,28(2):47-52.

TANG Min,LI Qunzhan,HE Jianmin. Structure of hybrid power filter for reactive power and harmonic currents in traction substation[J]. Power System Technology,2004,28(2):47-52.

[8] 夏焰坤,李群湛,邹大云.一种基于有源滤波器的同相牵引供电

系统方案[J]. 电网技术,2010,34(10):132-134.

XIA Yankun,LI Qunzhan,ZOU Dayun. A cophase traction power supply system based on active power filter[J]. Power System Technology, 2010, 34(10):132-134.

[9] 李承, 邹云屏. 单相电路谐波及无功电流检测研究[J]. 电力自动 化设备, 2004, 24(4): 33-35.

LI Cheng,ZOU Yunping. Study on harmonic and reactive current detection in single-phase circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4):33-35.

 [10] 解绍锋,李群湛,贺建闽. 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.
 XIE Shaofeng,LI Qunzhan,HE Jianmin. Control strategy of symmetry compensation system for traction power supply system

in phase[J]. Journal of the China Railway Society,2002,24(2): 109-113.

- [11] 黎建华,徐海利,唐志琼. 并联电力有源滤波器滞环电流控制方法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(23):27-31.
  LI Jianhua,XU Haili,TANG Zhiqiong. Study on the method of hysteresis current control in APF[J]. Relay,2008,36(23):27-31.
- [12] JEON S J. Unification and evaluation of the instantaneous reactive power theories[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2008, 23(3):1502-1510.
- [13] 华晓萍,王奔,孟凌凌,等. 有源电力滤波器仿真研究[J]. 电力 自动化设备,2007,27(1):42-46.
  HUA Xiaoping,WANG Ben,MENG Lingling, et al. Simulation research on active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):42-46.

作者简介:

张友鹏(1965-),男,甘肃庆阳人,教授,研究方向为电气 化铁路供电及交通信息工程及控制:

董海燕(1987-),女,甘肃和政人,硕士研究生,研究方 向为同相供电、综合有源补偿(E-mail:donghaiyancool@126. com)。

# Co-phase traction power supply system based on $Y/>/\nabla$ balanced transformer ZHANG Youpeng, DONG Haiyan

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of Scott transformer and impedance-matching transformer applied in electrified railway and the insufficiency of real-time compensating current detection methods adopted in the co-phase traction power supply system, a solution based on  $Y/>/\nabla$  balanced transformers is put forward. The conditions of its balanced transformation are analyzed and the real-time detection method of compensating current without phase locked loop is given. Its simulation model is established with MATLAB/ Simulink. The sinusoidal and cosine signals with the same frequency and phase as power voltage, are produced by signal generator in the simulation system, and produced by inquiring sinusoidal and cosine table without phase locked loop in the experiment system. Results show that, the three/single-phase comprehensive compensation is achieved and the accuracy of real-time compensating current detection without phase locked loop is enhanced.

Key words: Y/>/ $\bigtriangledown$  balanced transformer; compensating current; phase locked loops; real-time detection; accuracy; power transformers

104