

文章编号:1671-6833(2013)04-0064-05

# 同相供电系统无源补偿方案及参数配置

夏焰坤<sup>1</sup>, 解绍锋<sup>1</sup>, 宿婉<sup>2</sup>, 南晓强<sup>1</sup>, 郭鑫鑫<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 在平衡变压器负序补偿特性基础上, 提出利用无源对称补偿原理来构成同相供电方案. 针对不同性质的牵引负荷, 借助负序向量图分析方法, 直观地分析了不同方案中各端口补偿容量配置, 得出以  $\alpha\beta$  端口对外供电所需要的补偿容量最小的结论. 最后以交直交型机车负荷为例进行了仿真, 仿真结果验证了理论的正确性.

**关键词:** 平衡变压器; 补偿; 同相供电; 负序

**中图分类号:** TM922.3

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.015

## 0 引 言

现行电气化铁路广泛采用三相变两相变压器, 轮流给单相机车负载供电. 这种换相式供电是一种不对称供电方式, 存在负序大、功率因数低等问题. 随着大功率交直交型电力机车的大量应用, 大功率机车引起的负序问题将不容忽视. 同相供电系统<sup>[1-2]</sup>采用三相-单相对称补偿或变换, 能从根本上解决电气化铁道的负序问题, 且能取消变电所内的电分相环节.

目前实现同相供电的方式主要有两种办法: 一种是采用现代大功率交直交变流的方式, 将 3 相供电系统对称变换为单相系统对外供电<sup>[3-4]</sup>; 另一种是采用电容、电感等无源元件对称补偿<sup>[5]</sup>实现三相-单相供电. 前者动态性能好, 但存在结构复杂、造价高的特点; 后者动态性能稍差, 但相应成本较低, 如配合动态投切或在固定无源补偿基础上结合部分有源补偿来构成混合方案<sup>[6]</sup>, 不失为一种较佳方案. 因此有必要对无源补偿进行方案设计和参数计算.

笔者在铁路系统大量使用的平衡变压器的基础上, 探讨了其构成同相供电系统的无源补偿方案, 并针对不同性质的牵引负载, 采用负序相量图的方法进行了分析, 给出了相关参数匹配. 最后进行了相关仿真实验验证.

## 1 平衡变压器的结构及负序补偿特性分析

平衡变压器是一种将三相变成两相的特殊变

压器, 变压器原边接三相电力系统, 次边输出为正交的两相电压. 目前, 经过结构变形, 平衡变压器衍生出多种不同的结构形式<sup>[7-9]</sup>, 其中以 Scott 变压器最为典型. Scott 变压器结构和原理见图 1. 次边  $\dot{U}_\beta = j\dot{U}_\alpha$ , 当且仅当  $\dot{i}_\beta = j\dot{i}_\alpha$  时, 原边三相电流对称.

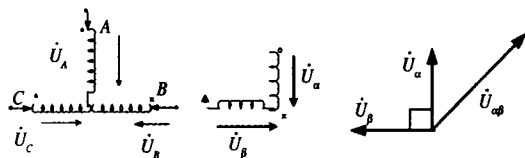


图 1 Scott 变压器结构及次边相量图

Fig. 1 Configuration of the Scott transformer and voltage phasor in secondary windings

根据文献[5], 任意接线变压器均可以得到统一的负序表达式. 取变压器原边相电压  $\dot{U}_A$  为参考向量, 变压器次边负荷电流及端口电压分别为  $\dot{I}_P, \dot{U}_P, P = 1, 2, \dots, n$ .

端口  $P$  的接线角  $\psi_P$  为  $\dot{U}_P$  滞后  $\dot{U}_A$  的角度

$$\dot{U}_P = U_P e^{-j\psi_P} = \sqrt{3} K_P U_A e^{-j\psi_P}. \quad (1)$$

当端口  $P$  的负荷功率因数角为  $\varphi_P$

$$\dot{i}_P = i_P e^{-j(\psi_P + \varphi_P)}. \quad (2)$$

可以推导出任意接线牵引变压器的正序电流和负序电流的表达式:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A^{(+)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p i_P e^{-j\psi_P}; \\ \dot{i}_A^{(-)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p i_P e^{-j(2\psi_P + \varphi_P)}. \end{aligned} \quad (3)$$

收稿日期:2013-02-20; 修订日期:2013-05-20

通信作者:解绍锋(1976-), 男, 河北定州人, 西南交通大学副教授, 主要研究方向为电能质量分析.

式中:系数  $K_p$  满足  $K_p = \frac{U_p}{\sqrt{3}U_A}$ ,  $p = 1, 2, 3, \dots, n$ .

用  $3U_A$  乘以上式(3)的共轭复数得到相应的正、负序复功率表达式:

$$\begin{cases} S^{(+)} = \sum_{p=1}^n S_p e^{j\varphi_p}; \\ S^{(-)} = \sum_{p=1}^n S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_p$  为二次侧端口输出功率模值.

由式(4)可知,负序分量不仅与变压器接线角有关,而且与功率因数角有关,因此可以合理选择端口或人为改变端口来寻求变压器最小补偿容量.

对于平衡变压器次边端口只有3个.由负序表达式易知,当变压器次边只有一个端口对外供电(令端口  $P = 1$ ),需要在两个或3个端口施加补偿可以使得负序分量为0.考虑到负荷的无功、负序可能同时出现,在负序补偿的基础上追加无功补偿约束,得到下式

$$\begin{cases} S_1 \sin\varphi_1 = \sum_{y=2}^m S_y \sin\varphi_y; \\ S_1 e^{j(2\psi_1 + \varphi_1)} = \sum_{y=2}^m S_y e^{j(2\psi_y + \varphi_y)}. \end{cases} \quad (5)$$

式中:接线角  $\psi_p$  已知,  $S_y$  为端口补偿装置容量,  $y$  为补偿端口.求解  $S_y$  的唯一解最多是3维的,即最多需要在3个端口配置无源补偿元件,可以实现无功和负序的综合治理.将平衡变压器接线角代入式(5),计算得到负荷在次边3个端口任何一个端口时,次边端口补偿容量表达式.

负荷在  $\beta$  端口时,3个端口补偿容量(正号对应容性元件,负号对应感性元件)

$$\begin{bmatrix} s_{c\alpha} \\ s_{c\beta} \\ s_{c\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\varphi_1 - \frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ -\frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ \cos\varphi_1 \end{bmatrix} S_1. \quad (6)$$

负荷在  $\alpha$  端口时,3个端口补偿容量

$$\begin{bmatrix} s_{c\alpha} \\ s_{c\beta} \\ s_{c\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_1 + \frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ \frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ -\cos\varphi_1 \end{bmatrix} S_1. \quad (7)$$

同理负荷在  $\alpha\beta$  端口时,3个端口补偿容量

$$\begin{bmatrix} s_{c\alpha} \\ s_{c\beta} \\ s_{c\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ -\frac{1}{2}\cos\varphi_1 \\ \sin\varphi_1 \end{bmatrix} S_1. \quad (8)$$

## 2 基于平衡变压器的同相供电无源补偿方案

由平衡变压器的结构易知,次边只有3个端口可对外单独供电.其中  $\alpha$  和  $\beta$  端口可以作为同一类性质的端口.在此选择  $\beta$  端口和  $\alpha\beta$  端口各自构成同相供电方案.

### 2.1 $\beta$ 端口构成的同相供电方案

该同相供电模式,选择  $\beta$  端口对外供电,其它端口施加无源元件电容、电感予以补偿.根据负载性质的不同进行简要分类探讨,如交直型机车呈现感性,交直交型机车呈现阻性,下文均以阻性负载和感性负载代替这两类机车负载.

(1) 阻性负载.当  $\beta$  端口接阻性负载时,取变压器原边相电压  $\dot{U}_A$  为参考向量,由负序分析可以做出次边的负序图如图2所示.

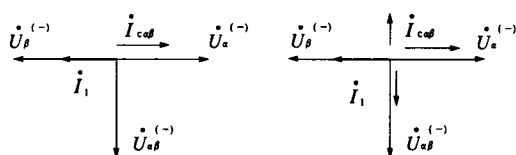


图2 阻性负载时负序图

Fig.2 Negative sequence diagram for resistive load

负载功率为  $S_1$  时,由负序功率平衡,只需要在  $\alpha\beta$  端口施加电容,补偿容量为  $S_1$ ,三相系统负序分量为0,此时系统将呈容性,功率因数为0.707.

若要求三相系统对称,且有高的功率因数,还需要在  $\alpha$  和  $\beta$  端口分别配置等量的电感,以补偿容性成分.此时总的补偿容量为  $2S_1$ ,其中各个端口补偿容量

$$\begin{bmatrix} s_{c\alpha} \\ s_{c\beta} \\ s_{c\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ 1 \end{bmatrix} S_1.$$

(2) 感性负载.当  $\beta$  端口接感性负载时,做出次边的负序图,见图3.

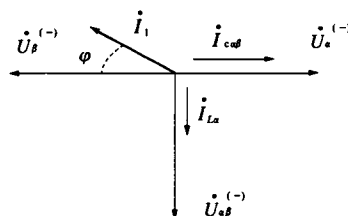


图3 感性负载时负序图

Fig.3 Negative sequence diagram for inductive load

为使负序为0,需要在 $\alpha\beta$ 端口施加电容,同时需要在 $\alpha$ 端口施加电感.此时系统的功率因数将会根据负载不同而表现不同的性质.当负载的感性成分和 $\alpha$ 端口施加的感性成分之和正好等于补偿的容性分量时功率因数为1,由三角形关系 $\tan\varphi = 0.5$ .对应的负载功率因数 $\cos\varphi = 0.894$ .当负载功率因数大于0.894时,三相系统平衡,但系统总体呈容性;反之,三相系统对称,系统总体呈感性.若想三相系统对称且功率因数为1,还得在负载端口 $\beta$ 配置相应无功补偿.

2.2  $\alpha\beta$  端口构成的同相供电方案

该同相供电模式,选择 $\alpha\beta$ 端口对外供电,其它端口施加无源元件电容、电感予以补偿.此时需要注意的是 $\alpha$ 和 $\beta$ 端口的电压将要设置为以前的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

(1) 阻性负载时.当 $\alpha\beta$ 端口接阻性负载时,做出的次边负序图如图4所示.

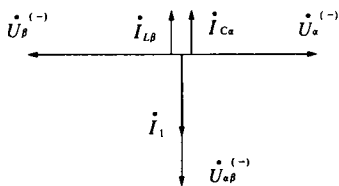


图4 阻性负载时负序图  
Fig.4 Negative sequence diagram for resistive load

负载功率为 $S_1$ 时,由负序功率平衡, $\alpha$ 和 $\beta$ 端口分别施加电容和电感,每个端口补偿容量相同为 $0.5 S_1$ ,三相系统负序分量为0,此时系统功率因数为1.若对功率因数没有要求, $\alpha$ 和 $\beta$ 端口可以只选择一个端口就可以进行负序补偿.

(2) 感性负载时.当 $\alpha\beta$ 端口接感性负载时,此时仅在两个垂直端口进行补偿将不能消除负载无功引起的负序分量,还需要在负载端口添加无功补偿使得总的功率因数为1,此时总的补偿容量为 $s_1 \sin\varphi_1 + s_1 \cos\varphi_1$ .

根据式(4)分析,如果能够改变平衡变压器的接线,将变压器次边做成不等边形式,人为的构造出接线角,使得补偿的负序电流和负载电流共线反向,此时补偿的总容量将恒等于负载容量,功率因数也可以达到1.此时有以下两个等式约束:

$$\begin{cases} s_{ca} + s_{L\beta} = s_1; \\ s_{ca} - s_{L\beta} = s_1 \sin\varphi. \end{cases}$$

解得  $s_{ca} = \frac{1 + \sin\varphi}{2} s_1; s_{L\beta} = \frac{1 - \sin\varphi}{2} s_1$ .

相应的负序图见图5,此时 $\alpha\beta$ 端口接线角 $\psi = \frac{1}{2}\theta = 45^\circ - \frac{1}{2}\varphi$ .

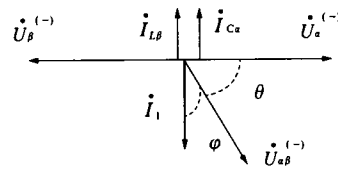


图5 感性负载时负序图  
Fig.5 Negative sequence diagram for inductive load

2.3 两种方案对比

根据上述分析,对变压器两类端口构成的同相供电系统无源补偿方案进行比较.表1给出了在阻性和感性负载条件下,两种方案所需要的补偿容量的大小.

表1 补偿容量对比

| Tab.1 Comparison of the compensation capacity |                                     |                |                                      |                |
|---|-------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|
| 方案<br>匹配条件                                    | $\beta$ 端口同相                        |                | $\alpha\beta$ 端口同相                   |                |
|   | 三相<br>对称                            | 三相对称且<br>高功率因数 | 三相<br>对称                             | 三相对称且<br>高功率因数 |
| (阻性) 补偿容量 / 负载容量                              | 1                                   | 2              | 1                                    | 1              |
| (感性) 补偿容量 / 负载容量                              | 1,34<br>( $\cos\varphi$<br>= 0.894) | 1              | $\cos\varphi_1$<br>+ $\sin\varphi_1$ | 1              |

由表1可知,采用平衡变压器 $\alpha\beta$ 端口作为负载端口对外进行同相供电优于 $\beta$ 端口,在完全补偿的情况下,补偿的总容量可以恒等于负载容量.值得注意的是,不等边变压器需要调研负载功率因数,一定程度上造成这种供电方式的特殊化.今后,随着交直交型电力机车的普及,其功率因数接近1,采用平衡变压器的 $\alpha\beta$ 端口同相补偿方案不失为一种较佳的方案.

3 牵引负荷再生制动的影响

与常规负载不同,为了节省制动时消耗的能量,交直交型电力机车普遍采用再生制动.再生制动时,机车相当于一个发电机向电网输出能量,电流由机车经过平衡变压器流向三相电网,此时正好与牵引时相反.再生制动对系统负序、谐波、电压波动等有影响,其中最严重的表现为负序.

在电力机车发生再生制动时,基于平衡变压器的同相供电系统补偿将会发生相应变化,端口补偿的性质(电容和电感)要进行交换.以 $\beta$ 端口方案为例,给出了两种工况下的补偿原理图如图

6 所示. 在牵引时,  $\alpha\beta$  端口实施电容补偿, 补偿电流产生的负序和负载产生的负序共线反向, 消除了负序; 在制动时, 负载电流负序反向同补偿电流负序相叠加, 负序电流将会加大一倍, 加剧系统的不平衡, 此时需要改变补偿性质, 在  $\alpha\beta$  端口实施电抗补偿 (见虚线所示). 工程上, 可以在补偿端口使用 TCR 和固定电容相结合的 SVC 结构, 灵活的补偿在再生情况下的负序分量.

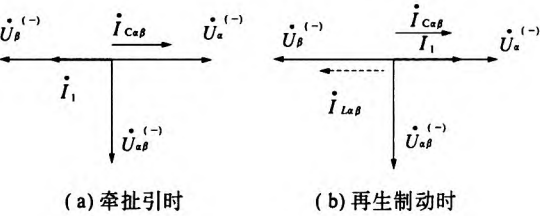


图 6 两种工况下补偿原理图  
Fig.6 Compensation principle  
in traction and braking state

4 仿真验证

为了分析补偿方法的正确性和有效性, 使用 Matlab/simulink 对补偿方法进行仿真验证. 三相电力系统电压为 110 kV, 经过平衡变压器变换成

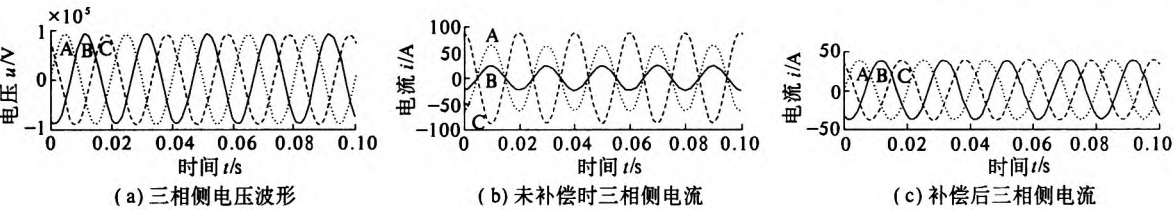


图 8 牵引工况下补偿前后三相侧仿真波形  
Fig.8 First side simulation result with and without compensation in traction state

由以上图 8 仿真波形和表 2 电流大小数据可见, 补偿单机车负荷需要的补偿电容和电抗容量与负载容量相等; 未补偿时三相侧电流不平衡度为 1, 电流严重不对称, 经过补偿后三相侧电流不平衡度为 0, 消除了负序分量.

表 2 牵引工况时电流大小仿真数据

| Tab.2 Current simulation data in traction state |      |      |             |      |      |
|---|------|------|-------------|------|------|
| 未补偿时三相侧电流 /A                                    |      |      | 补偿后三相侧电流 /A |      |      |
| A   | B    | C    | A           | B    | C    |
| 44.9  | 16.4 | 61.3 | 26.7        | 26.6 | 26.9 |

图 9 给出了在机车处于再生时三相侧电流情况, 其中再生有功功率为 5 MW, 机车使用电流源模拟. 从图中可以看出未进行任何补偿时, 三相电

的两相牵引端口电压幅值为  $27.5/\sqrt{2}$  kV, 相位相差  $90^\circ$ . 负载选取机车模型为有功功率设定为 5 MW 的恒功率源, 取功率因数为 0.8. Scott 变压器仿真模型见图 7 所示. 下面就平衡变压器  $\alpha\beta$  端口同相供电方案无源补偿前后三相系统侧电流大小进行比较.

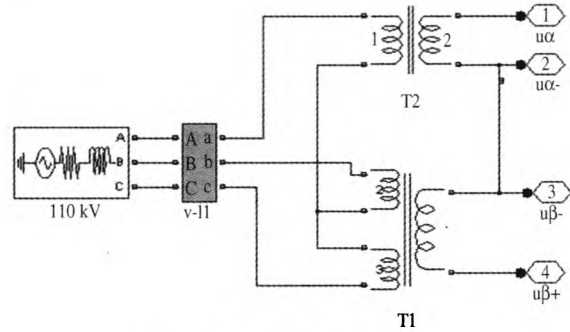


图 7 Scott 变压器仿真模型  
Fig.7 Scott transformer simulation model

图 8 给出了在机车处于牵引工况时, 未进行任何补偿措施以及在  $\alpha\beta$  端口补偿 4 Mvar 电容, 同时在  $\alpha$  端口使用容量为 2.5 Mvar 电容和  $\beta$  端口使用容量为 2.5 Mvar 电感补偿时三相系统侧电流波形. 表 2 给出了补偿前后三相电流大小情况.

流和牵引时电流方向相反, 表明负载向三相系统回馈功率. 在  $\alpha$  端口使用容量为 2.5 Mvar 电容和  $\beta$  端口使用容量为 2.5 Mvar 电感补偿时三相系统侧电流将比未补偿时增大一倍, 说明负序更加严重. 而交换  $\alpha$  端口和  $\beta$  端口补偿性质时三相系统侧电流基本对称, 负序分量被消除. 表 3 给出了补偿前后三相电流大小情况, 经过补偿后三相侧电流负序分量被消除.

表 3 再生制动工况时电流大小仿真数据

| Tab.3 Current simulation data in braking state |      |      |             |      |      |
|--|------|------|-------------|------|------|
| 未补偿时三相侧电流 /A                                   |      |      | 补偿后三相侧电流 /A |      |      |
| A  | B    | C    | A           | B    | C    |
| 36.2   | 13.5 | 49.8 | 26.0        | 25.5 | 24.9 |

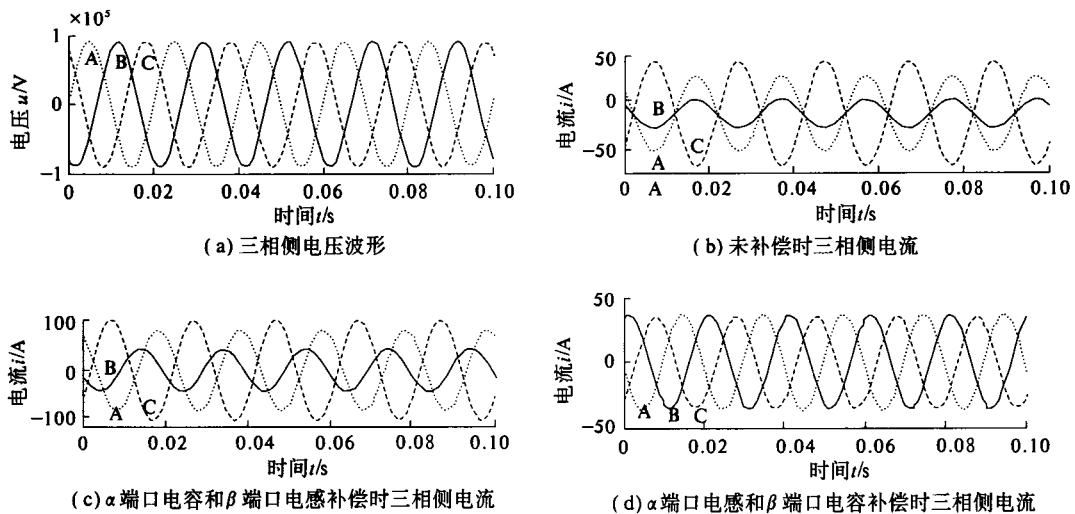


图9 再生制动工况下补偿前后三相侧仿真波形

Fig.9 First side simulation result with and without compensation in braking state

## 5 结论

(1) 采用变压器  $\alpha\beta$  端口同相供电模式是一种最省补偿容量的方案,无论在阻性还是感性负载条件,均可以使得补偿容量恒等于负载容量。

(2) 在机车负载发生再生制动时,补偿端口补偿元件性质要相应发生改变,以达到抑制负序的效果,否则会造成补偿时负序恶化。

(3) 笔者所分析的方案和结论同样适用于工业中需要采用三相-单相对称供电的场合。在负载变动不大的条件下,用固定无源装置补偿方式,在负载功率变化较大的情况下,用动态投切无源装置补偿方式。两种方式均可以大大改善三相系统的不对称性,实现高质量供电。

## 参考文献:

- [1] 李群湛,张进思,贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报,1988,10(4):23-30.
- [2] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键

技术问题[J]. 铁道学报,2010,32(4):119-124.

- [3] 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牵引供电系统[J]. 铁道学报,2003,25(3):49-54.
- [4] 吴萍,李群湛. 基于 YN-vd 接线变压器的新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):87-92.
- [5] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2006:16-30.
- [6] 周福林,李群湛,邱大强. 基于混合补偿的同相牵引供电系统[J]. 铁道学报,2012,34(1):19-24.
- [7] 姜寿生,周友庆,刘光烨. Y/ $\sqrt{3}$ / $\Delta$  平衡变压器运行特性分析与模型试验[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):102-106.
- [8] 吴命利,范瑜,辛成山. Scott 接线牵引变压器运行特性与等值电路模型研究[J]. 电工技术学报,2003,18(4):75-80.
- [9] 高仕斌,钱清泉. 电气化铁道应用三相变四相电力变压器的理论分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):174-177.

## Passive Compensation Method and Parameter Analysis of Cophase Power Supply System

XIA Yan-kun<sup>1</sup>, XIE Shao-feng<sup>1</sup>, SU Wan<sup>2</sup>, NAN Xiao-qiang<sup>1</sup>, GUO Xin-xin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Some schemes of cophase power supply used to passive symmetric compensation was presented which combined balance transformer negative sequence compensation characteristic. In view of different traction loads, applying negative sequence diagram analysis compensation capacity derived directly in all port and concluded the  $\alpha\beta$  port is the best power supply port which need the leaset compensation capacity. In the end, the simulation result on AC-DC-AC electrical locomoter load shows the correctness and validity of the proposed theory.

**Key words:** balance transformer; compensation; cophase power supply; negative sequence