

基于 V 型接线的同相牵引供电系统

魏 光

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 电气化处, 陕西 西安 710043)

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, 以及相邻供电区段分相绝缘器引起的列车速度和牵引力损失等问题, 基于既有 V 型接线牵引供电系统, 提出了一套同相供电系统的改造方案。在分析综合补偿原理的基础上, 提出基于无锁相环的电流检测方法, 建立综合潮流控制器容量模型及电能质量模型, 并采用双向互补瞬时比较 PWM 控制策略。多重化主电路结构及满意优化补偿控制策略的提出, 改善了系统的技术经济性。理论推导和仿真结果验证了方案的正确性与可行性。

关键词: 同相牵引供电系统; V 型接线; 满意优化补偿; 双向互补瞬时比较 PWM 控制

中图分类号: TM 922.3; U 223

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0060-06

0 引言

中国电气化铁路采用单相工频交流电流制。现有的牵引供电系统对电力系统引入大量的负序、谐波及无功。相邻供电区段分相绝缘器的存在, 造成了列车速度和牵引力无谓的损失, 为此提出了同相牵引供电系统方案^[1]。V 型接线变压器^[2]广泛应用于牵引供电系统, 有必要研究基于 V 型接线的同相牵引供电系统改造方案。

文献[3]将综合潮流控制器与 YN,d11 相结合, 而文献[4-5]则分别将其与 Scott、阻抗匹配平衡变压器相结合, 构成同相牵引供电系统。由于机车负载的特殊性, 这些接线形式适应性差, 因而使用量少。文献[3-7]均在完全补偿的范畴内给出了同相供电系统的控制策略, 无法实现电能质量的满意优化补偿。

为实现电能质量的满意补偿, 并充分利用 V 型接线的优势, 现分别就目前应用最广的 V_v 接线和 V_x 接线提出了同相供电满意优化补偿改造方案。

1 供电方式

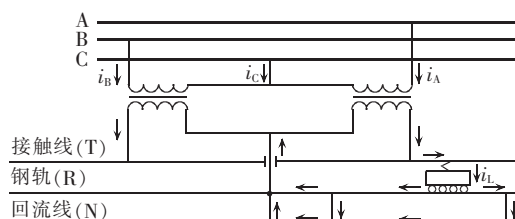
目前中国普速铁路以 V_v 接线带回流线的直接供电方式为主, 客专则主要采用 V_x 接线自耦变压器(AT)供电方式。下面分别研究既有电气化铁路牵引变电所不同供电方式下的同相供电改造方案。

1.1 带回流线的直接供电方式

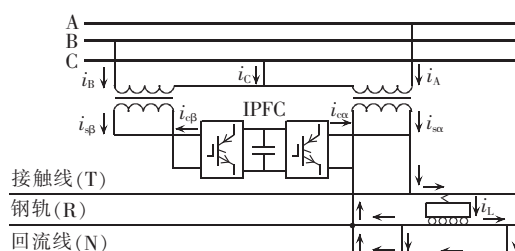
V_v 接线牵引变压器与带回流线的直接供电方式相结合, 如图 1(a)所示。V_v 变压器的 2 个副边端子分别连接 2 个供电臂, 回流电流通过回流线、钢轨及大地返回其公共端子。由于接线形式的特殊性, 负序问题尤为突出^[2]。

在此基础上, 引入综合潮流控制器 IPFC(Inte-

grated Power Flow Controller), 构成 V_v 接线同相牵引供电系统, 如图 1(b)所示。变电所 2 个牵引端口通过 IPFC 相并联, 同时向牵引网供电, 对于牵引变压器仅传递有功功率, 从而大幅降低其容量。IPFC 利用直流侧电容作为能量交换环节, 在两端口间实现有功功率的传递, 同时补偿无功, 滤除主要谐波, 经过 V_v 接线牵引变压器变换, 使得电力系统侧电压、电流三相满意对称。



(a) 原直供系统结构



(b) V_v 接线同相供电系统结构

图 1 带回流线的直接供电方式

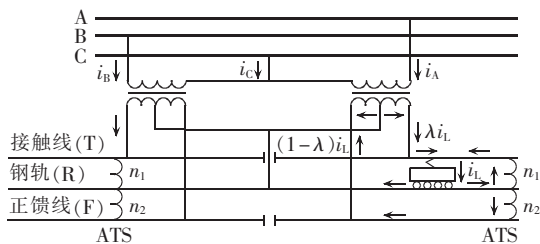
Fig.1 Direct power supply mode with return channel

1.2 AT 供电方式

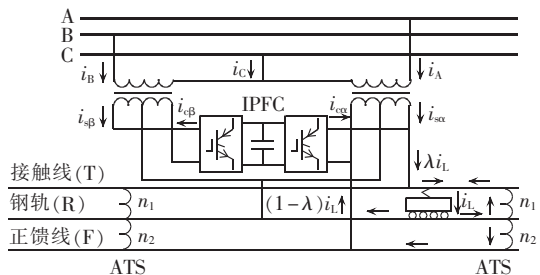
将 2×27.5 kV AT 供电方式与 V_x 变压器相结合构成 AT 牵引供电系统, 如图 2(a)所示。与 55 kV 模式^[8]相比, 省却了变电所内的 AT, 但 V_x 变压器副边两绕组皆带中点抽头, 构成 2×27.5 kV 模式。在相邻变电所的第 1 个 AT 段内, 存在由接触线 T、钢轨 R、正馈线 F、牵引变压器组成的直供回路和由 T、R、F、自耦变压器组成的 AT 回路 2 条能量传递途

径,其电流根据直供回路与 AT 回路 2 个供电回路的阻抗关系来分配。

V_x 接线同相 AT 牵引供电系统见图 2(b)。所不同的是,IPFC 将承受 55 kV 端口电压,并且其端口电流占机车取流的比例随机车位置变化而不同。



(a) 原 AT 供电系统结构



(b) V, x 接线 AT 同相供电系统结构

图 2 AT 供电方式

Fig.2 AT power supply mode

2 IPFC 主电路

IPFC 由背靠背四象限电压型变流器组成,如图 3 所示,两端口变流器通过直流电容耦合在一起。为了与电力电子开关器件的性能相匹配,采用变比 10:1 的降压变压器 T₁ 和 T₂,并将直流侧参考电压预设为 5 kV。在直流侧引入 LC 调谐滤波环节,用以滤去 2 倍频谐波,保证直流电压平稳。

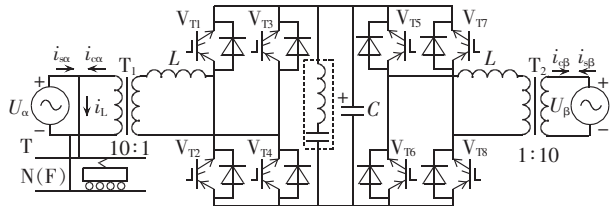


图 3 IPFC 结构原理图

Fig.3 Schematic diagram of IPFC structure

出于技术经济性的考虑,对于大容量同相供电系统,宜采用多重化 IPFC 结构。图 4 给出了并联 IPFC 主电路拓扑,作用如下:

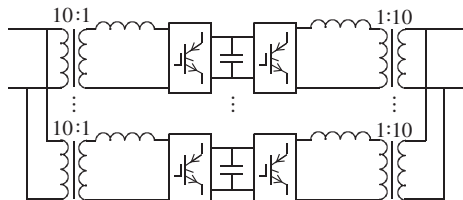


图 4 IPFC 主电路拓扑

Fig.4 Main circuit topology of IPFC

- 分配有功潮流;
- 调配负序、无功、谐波;
- 备用冗余。

3 综合补偿原理

为了提取负载电流中的序分量,需要将其映射到三相电力系统侧。设电力系统三相电压对称,并取 U_A 为参考量,得:

$$[U_A \ U_B \ U_C]^T = [1 \ a^2 \ a]^T U_A \quad (1)$$

其中, $a = e^{j120^\circ}$ 。

定义牵引端口 α 相电压与一次侧线电压之比为变比,即 $K = U_\alpha / (\sqrt{3} U_A)$ 。 U_α 滞后 U_A 的相角 ψ_L 为接线角,即

$$U_\alpha = U_A e^{-j\psi_L} = \sqrt{3} U_A K e^{-j\psi_L} \quad (2)$$

端口电流 I_α (即馈线负载电流 I_L) 滞后端口电压 U_α 的功率因数角为 φ_L , 即

$$I_L = I_\alpha e^{-j(\psi_L + \varphi_L)} = I_\alpha \quad (3)$$

由于采用 V 型变压器,为了简化分析,设 IPFC 2 个端口电压为

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \psi_L) \\ u_\beta(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \psi_L - 60^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

馈线负载电流为

$$i_L(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \varphi_1 - \psi_L) + i_h(t) \quad (5)$$

其中, $i_h(t) = \sum_{n=2}^{+\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n - \psi_L)$ 为负载电流中谐波成分。

则负载的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p_L(t) &= u_\alpha(t) i_L(t) = \\ &U_1 I_{lp} \{1 - \cos[2(\omega t - \psi_L)]\} - \\ &U_1 I_{lq} \sin[2(\omega t - \psi_L)] + u_\alpha(t) i_h(t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $I_{lp} = I_1 \cos \varphi_1$, $I_{lq} = I_1 \sin \varphi_1$ 。

欲使 V 型变压器原边电流三相对称,设端口电流期望值为

$$\begin{cases} i_{scr}(t) = \sqrt{2} I_{sr} \sin \omega t \\ i_{s\beta r}(t) = \sqrt{2} I_{sr} \sin(\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

则电源需输出的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p_s(t) &= u_\alpha(t) i_{scr}(t) + u_\beta(t) i_{s\beta r}(t) = \\ &U_1 I_{sr} [\sqrt{3} - \cos(2\omega t - \psi_L) - \\ &\cos(2\omega t - \psi_L - 180^\circ)] \end{aligned} \quad (8)$$

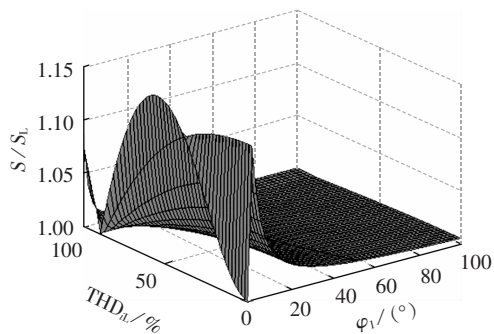
在一个电源周期 T 内,电源提供的能量应等于负载消耗的能量与直流侧的能量变化量之和,即

$$\int_0^T p_s(t) dt = \int_0^T p_L(t) dt + \Delta E_c \quad (9)$$

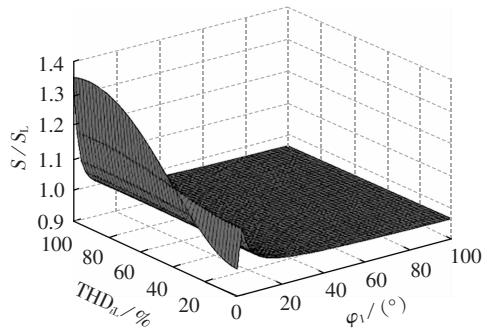
由式(6)和式(8),并考虑到直流侧功率平衡,易得:

$$I_{sr} = \frac{1}{2U_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_\alpha(t) i_L(t) dt + I_{dc} = \frac{I_{lp}}{\sqrt{3}} + I_{dc} \quad (10)$$

由此可得补偿控制目标为:稳态时,IPFC 的 α



(a) 完全补偿



(b) 满意优化补偿

图 6 IPFC 容量与补偿度关系

Fig.6 Relationship between capacity and compensation degree of IPFC

$$\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (29)$$

$$A = -[(1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 60^\circ) + (1 - K_C) \sin \varphi_1]$$

$$B = \cos \varphi_1 + (1 - K_N) \cos(\varphi_1 + 60^\circ)$$

$$C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 120^\circ)$$

$$D = -\frac{1}{2} \cos \varphi_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 30^\circ)$$

$$E = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin \varphi_1$$

$$F = -\frac{1}{2} \cos \varphi_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 270^\circ)$$

$$P = P_A + P_B + P_C = \frac{1}{2} (2B - \sqrt{3} C - D + \sqrt{3} E - F)$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = \frac{1}{2} (-2A + C - \sqrt{3} D + E + \sqrt{3} F)$$

工程实际中, 针对上述模型制定补偿度与电能质量参数对照表。当给定电能质量预期参数时, 即可通过查表快速得出相应的补偿度, 实现满意优化补偿。

4.4 变流器控制

为了解决传统的定时控制瞬时值比较法^[14]存在的局部稳定性问题, 并且消除峰值比较所产生的直流分量, 采用双向互补瞬时值比较法, 如图 7 所示。将控制电路设计成双向对称的 2 路, 即电源电压 $u_s > 0$ 时让补偿电流在其指令信号波形的下方变化, 电源电压 $u_s < 0$ 时让补偿电流在其指令信号波形的上方变化, 这样在一个工频周期中补偿电流就不存在直流分量, 进而可消除电源电流的直流分量。

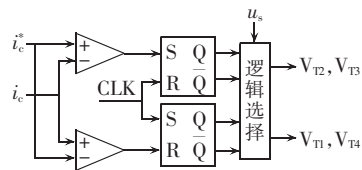


图 7 双向互补瞬时值比较法

Fig.7 Bidirectional complementary instantaneous comparison method

综上所述, 可得 IPFC 控制策略如图 8 所示。其中, 直流电压控制采用能量守恒法^[10]。

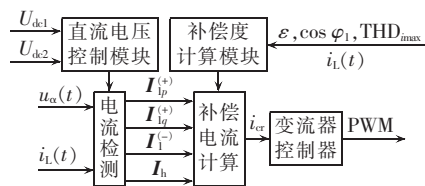


图 8 控制策略框图

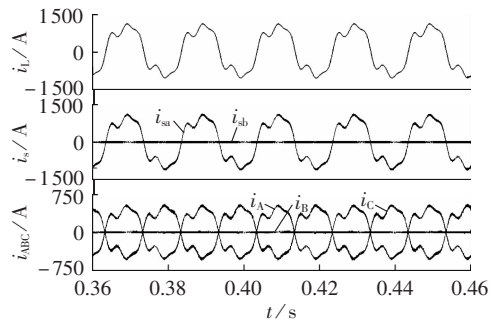
Fig.8 Block diagram of control strategy

5 仿真实证

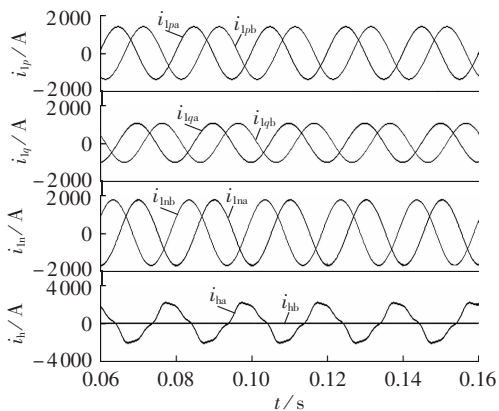
本文对图 1、2 所示的同相供电系统建立了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型。负载采用同时含有无功(功率因数为滞后 0.8)、21 % 3 次谐波、15 % 5 次谐波的非线性电流源, 即 $i_L = 1000 \sin(\omega t - 36.8^\circ) + 210 \sin(3\omega t - 120^\circ) + 150 \sin(5\omega t + 60^\circ)$, 其他设置如前所述。

5.1 带回流线的直接供电方式

补偿前(即未投入 IPFC), 仿真结果如图 9(a) 所示, 机车在电力系统侧产生了大量的负序、谐波及无功。



(a) 补偿前负载电流及 V_v 变压器原、副边电流



(b) 电流检测分量

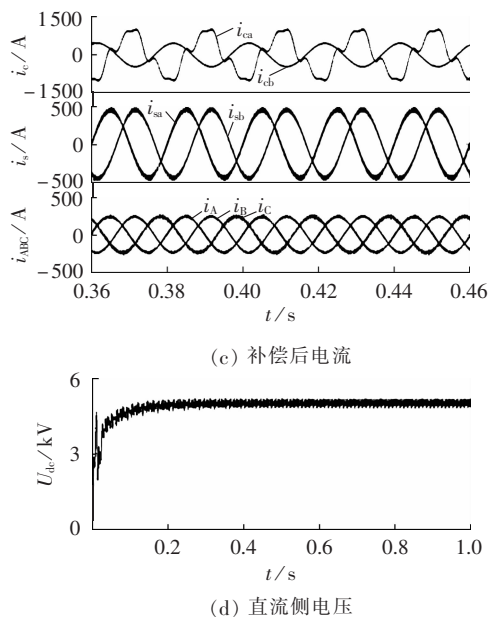


图9 直供方式仿真结果

Fig.9 Simulative results of direct power supply mode

投入 IPFC 后(设补偿度分别为 $K_N=0.982, K_C=1, K_h=0.96$),如图 9(c)所示, V_x 变压器副边电流幅值基本相等,相位相差 120° ,满足式(11),电力系统侧电流三相满意对称(满足国标 $\varepsilon \leq 2\%$, $\cos \varphi_1=1$, $\text{THD}_{\text{imax}} \leq 2$)。

5.2 AT 供电方式

AT 供电方式中电流由阻抗关系分配,接触网、钢轨、正馈线电流分别设为 $i_T=0.9 i_L, i_R=0.6 i_L, i_F=0.3 i_L$,如图 10(a)所示。补偿前 V_x 牵引变压器原、副边电流波形如图 10(b)所示。

补偿后(设补偿度分别为 $K_N=0.982, K_C=1, K_h=0.96$),如图 10(d)所示,电力系统侧电流三相满意对称(满足国标 $\varepsilon \leq 2\%$, $\cos \varphi_1=1, \text{THD}_{\text{imax}} \leq 2$)。

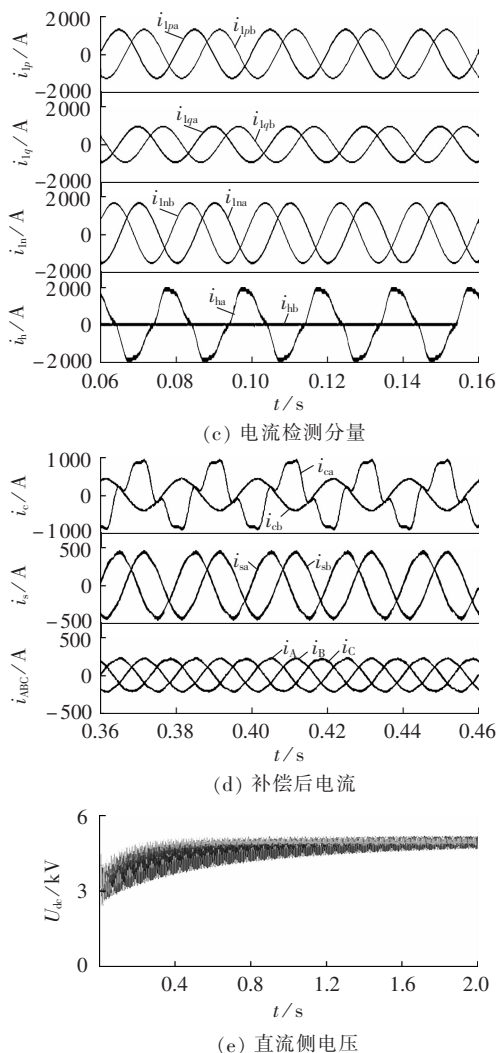
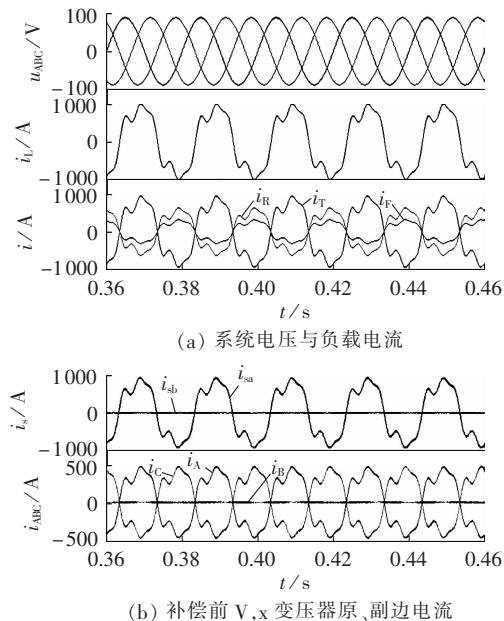


图10 AT供电方式仿真结果

Fig.10 Simulative results of AT power supply mode

6 结论

针对目前使用最普遍的 V 型接线牵引供电系统,提出了整套改造方案。通过分析计算与仿真验证,不仅消除了机车过分相问题,而且在满足经济性的前提下,实现按需满意补偿。在工程实际中,多重化结构及当前电力电子制造水平,已能满足大容量牵引变电所的需求。

参考文献:

- [1] 魏光,李群湛,黄军,等. 新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):80-83.
WEI Guang,LI Qunzhan,HUANG Jun,et al. A new cophase traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):80-83.
- [2] 李群湛,贺建阔. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007:136-137.
- [3] 吕晓琴,章春军,张秀峰. 电气化铁道负序、谐波及无功电流实时检测[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):84-87.
LÜ Xiaoqin,ZHANG Chunjun,ZHANG Xiufeng. Real-time detecting of negative,harmonic and reactive power currents in electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,

- 28(12):84-87.
- [4] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相 AT 牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2006(4):14-18.
ZHANG Xiufeng, LIAN Jisan. A new cophase AT traction power supply system based on scott transformer[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006(4):14-18.
- [5] 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.
ZHANG Xiufeng, GAO Shibin, QIAN Qingquan, et al. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4):32-37.
- [6] 张秀峰, 李群湛, 吕晓琴. 基于有源滤波器的 V_v 接同相供电系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2):98-103.
ZHANG Xiufeng, LI Qunzhan, LÜ Xiaoqin. V_v connection cophase power supply system based on active power filter[J]. China Railway Science, 2006, 27(2):98-103.
- [7] 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.
LÜ Xiaoqin, ZHANG Xiufeng. Cophase traction power supply system based on active filter and V/x connection[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2006, 18(6):73-78.
- [8] 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006:126-128.
- [9] 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, 2006:16-17.
- [10] 魏光. 同相供电装置控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学电气工程学院, 2009.
WEI Guang. Research on control strategy of cophase traction power supply system device[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [11] 曲涛, 任元, 林海雪, 等. GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [12] 侯铁信, 卜正良, 林海雪, 等. GB/T 15543-2008 电能质量 三相电压不平衡[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 周胜军, 于坤山, 谭志强, 等. GB/T 12325-2008 电能质量 供电电压偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 徐明. 有源电力滤波器瞬时值比较控制策略的研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2007.
XU Ming. Study on instantaneous comparison control strategy for active power filter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [15] 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[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10):87-91.
WU Ping, LI Qunzhan. Cophase traction power supply system based on YN-vd connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10):87-91.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

魏 光(1984-), 男, 陕西宁强人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为供变电工程设计、电能质量分析与控制、新型牵引供电系统理论分析(E-mail: tytyw82349810@163.com)。

Cophase traction power supply system based on V connection

WEI Guang

(Electric Railway Design Department, China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The electric traction power supply system of electrified railway has abundant negative sequence, harmonics and reactive power, and the insulator between adjacent power supply sections may cause the traction power loss, for which, a modification scheme of cophase traction power supply is proposed to existing V connection traction power supply system. Based on the analysis of comprehensive compensation, a current detection method without PLL is presented, the integrated power flow controller capacity model and power quality model are established, and the bidirectional complementary instantaneous comparison PWM control is adopted. The structure of multiple main circuits and the control strategy of satisfactory optimization compensation are presented to improve the technical economy of system. The theoretical analysis and simulative results verify its feasibility and correctness.

This work is supported by the Scientific and Technical Supporting Programs of China during the 11th Five-year Plan Period(2007BAA12B05).

Key words: cophase traction power supply system; V connection; satisfactory optimization compensation; bidirectional complementary instantaneous comparison PWM control