

DOI: 10.7667/PSPC150734

基于 YNvd 平衡变压器和模拟负载的同相供电试验系统

赵元哲, 朱鹏, 李群湛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为了更深入开展同相供电系统的研究, 提出了一种由新型 YNvd 平衡牵引变压器、模拟负载以及综合潮流控制器(IPFC)构成的同相供电试验系统方案。分别介绍了 YNvd 平衡变压器、IPFC 和模拟负载的结构和工作原理, 通过对 IPFC 与模拟负载制定相应的控制策略, 以实现同相供电系统的仿真模拟。研究表明, 该试验系统能够模拟牵引负荷特性, 实现能量循环利用, 模拟同相供电系统, 消除了系统负序电流, 实现了谐波和无功的动态补偿, 验证了同相供电系统的可行性。

关键词: 同相供电; 综合潮流控制器; YNvd 平衡变压器; 模拟负载; 能量反馈

Co-phase supply test system based on YNvd balanced transformer and simulated load

ZHAO Yuanzhe, ZHU Peng, LI Qunzhan

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

Abstract: In order to do further research on co-phase power supply system, a test system based on YNvd balanced transformer, simulated load and integrated power flow controller (IPFC) is proposed. By mean of analysis on structures and principles of YNvd transformer, IPFC and simulation load, establishing control strategy on IPFC and simulation load, the system is simulated dynamically. The results illustrate that this scheme can well simulate the traction load and cycle the energy, simulate co-phase system, eliminate the system negative sequence, and compensate harmonic and reactive power real-timely, which verifies the feasibility of co-phase power supply system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307142) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. SWJTU2682014CX020).

Key words: co-phase power supply system; IPFC; YNvd balanced transformer; simulated load; energy feedback

0 引言

负序、谐波、无功等是电气化铁路长期存在的问题, 电分相的存在更使得列车的取流频繁切断, 造成列车速度与牵引力的较大损失^[1]。近年来我国高速重载铁路快速发展, 这些问题日趋突出, 严重影响着铁路运行的安全性、可靠性和经济性。为解决这些问题, 文献[2]提出了基于无功对称补偿的同相供电方案。随着电力电子器件在铁路系统的大量应用, 文献[3-6]提出了基于潮流控制器的同相供电方案。同相供电系统基本消除了负序, 并能动态补偿谐波和无功, 取消了变电所出口处的电分相, 是

较理想的新型供电方案。

同相供电系统结构如图 1 所示, 引入新型的 YNvd 平衡变压器, 其将公共电网三相电压转变为两相对称电压, 其中 α 相直接给牵引负荷供电, β 相则通过 IPFC 与 α 相并联, 由此牵引变压器两相电压可同时为牵引负荷供电, 并取消了变电所出口处的电分相, 如果各变电所间相邻两臂输出相同的电压相位相同, 可以取消图中所示的分区所处的电分相装置, 改由分段绝缘器取代, 从而实现全线贯通供电。

由于电气化铁路供电系统的特殊性, 不适于在实际运行线路开展针对同相供电方案的各项研究, 为了深入研究同相供电系统, 本文提出了一种适应于低压公共电网下的同相供电试验系统。

基金项目: 国家自然科学基金(51307142); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU2682014CX020)

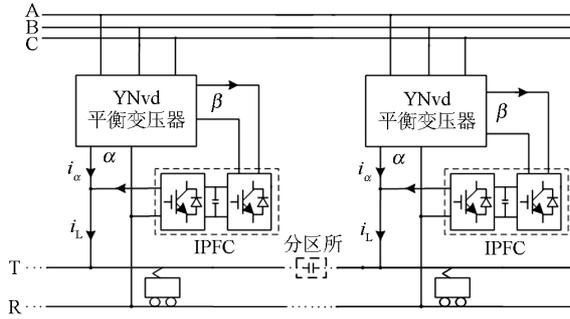


图1 同相供电系统
Fig. 1 Co-phase power supply system

1 同相供电试验系统

同相供电试验系统建立在三相 380 V 电网中，由 YNvd 平衡变压器、IPFC 和模拟负载组成，构成一个环网系统，系统如图 2 所示，YNvd 平衡变压器作为牵引变压器提供两相电压，模拟负载可模拟牵引负荷特性，并实现电能的循环利用。

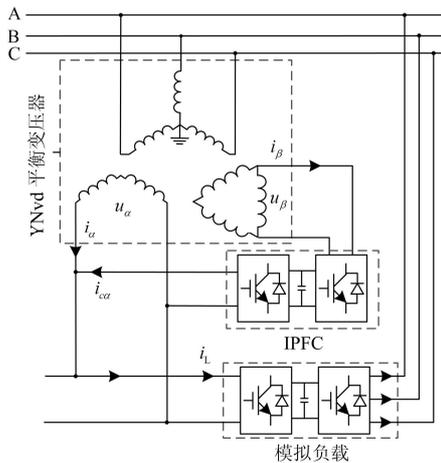


图2 同相供电试验系统
Fig. 2 Co-phase power supply test system

1.1 YNvd 平衡变压器

YNvd 平衡变压器是新型三相-两相牵引变压器，采用普通三相三柱式铁心，具有铁心利用率高、结构简单、制造和维护方便等优点；其高压侧中性点可以抽出，提高了系统可靠性，并可适用于超高压系统^[7-8]。YNvd 平衡变压器原理图如图 3 所示^[7]。

ω_A 、 ω_B 、 ω_C 分别为变压器一次侧三相绕组； ω_{a1} 和 ω_{c1} 构成二次侧 α 相； ω_{a2} 、 ω_{b2} 和 ω_{c2} 构成二次侧 β 相。平衡变压器工作时，二次侧输出两相电压相互垂直、幅值相等。为此，使 YNvd 平衡变压器各绕组关系为

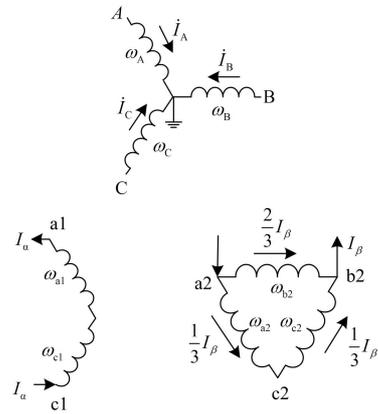


图3 YNvd 平衡变压器
Fig. 3 YNvd balanced transformer

$$\omega_A : \omega_B : \omega_C : \omega_{a1} : \omega_{c1} : \omega_{a2} : \omega_{b2} : \omega_{c2} = K : K : K : \frac{1}{\sqrt{3}} : \frac{1}{\sqrt{3}} : 1 : 1 : 1 \quad (1)$$

其中， K 为变压器一二次侧电压比。

变压器一二次侧的电压关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可以看出，次边两相电压大小相等，且相位相差 90° 。

变压器一二次侧电流关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据对称分量法可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \sqrt{3} + j & -1 + j\sqrt{3} \\ \sqrt{3} - j & -1 - j\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可知，当相负荷电流对称时，即 $\dot{I}_\alpha = j\dot{I}_\beta$ ，平衡变压器能完全消除负序电流，一次侧三相电流完全对称。

1.2 综合潮流控制器(IPFC)

IPFC 由 2 个背靠背的单相全桥变流器、直流电容 C 、交流电感 L 组成，中间直流电容作为能量交换环节，在两个端口间实现有功功率的传递^[8-9]，如图 4 所示。

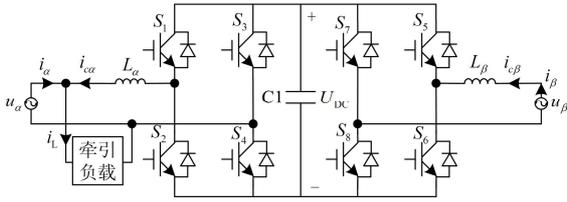


图 4 IPFC 主电路结构

Fig. 4 Circuit of IPFC

在实际牵引供电系统下，变压器二次侧额定电压为 27.5 kV，考虑电力电子开关器件的耐压水平，在变压器二次侧端口与 IPFC 之间一般设置变比为 $N:1$ 的降压变压器。在本试验系统中，二次侧额定电压较低 660 V，因此省掉降压变压器。

设 YNvd 平衡变压器二次侧两端口电压为

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = U \sin \omega t \\ u_\beta(t) = U \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中， U 为 YNvd 平衡变压器二次侧输出电压峰值。

设牵引负荷电流为

$$i_L(t) = i_i(t) + i_h(t) = I_{ip} \sin \omega t + I_{iq} \cos \omega t + i_h(t) \quad (6)$$

式中： $i_i(t)$ 是牵引负荷基波电流； $i_h(t)$ 是谐波电流； I_{ip} ， I_{iq} 分别为牵引负荷有功电流和无功电流幅值； φ_1 是电流 i_i 和电压 u_α 的夹角。

IPFC 的 α 相输出电流为 $i_{c\alpha}$ ，其包括牵引负荷一半的有功电流以及无功补偿电流和谐波补偿电流， β 相输入电流为 $i_{c\beta}$ ，其为牵引负荷一半的有功电流，并通过 IPFC 直流环节将有功率传输到 α 相。因此，IPFC 两端口的电流为

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} I_{ip} \sin \omega t + I_{iq} \cos \omega t + i_h \\ \frac{1}{2} I_{ip} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据图 4 中电流关系可以得到 YNvd 平衡变压器次级边两端口输出电流为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ -i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} I_{ip} \sin \omega t \\ \frac{1}{2} I_{ip} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知，YNvd 平衡变压器次变两相值只输出有功电流，且大小相等。

将式(8)代入式(3)中，得到

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} I_1 \cos \varphi_1 \sin \omega t \\ \frac{1}{2} I_1 \cos \varphi_1 \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{3K} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + 30^\circ) \\ \sin(\omega t - 90^\circ) \\ \sin(\omega t + 150^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知，YNvd 平衡变压器一次侧三相电流大小相等，无负序电流产生。可见，通过 IPFC 补偿装置和 YNvd 牵引变压器，牵引负荷产生的负序、无功和谐波将得到了完全补偿。

1.3 模拟负载

模拟负载由牵引电流模拟单元与能量反馈单元构成，牵引电流模拟单元与 YNvd 平衡变压器 α 端口相连，模拟牵引电流特性，能量反馈单元与三相公共电网相连，将牵引电流模拟单元吸收的有功功率反馈三相电网。其主电路如图 5 所示，包括输入电感、单相全桥整流器、直流电容、三相半桥逆变器以及输出电感^[10-11]。直流环节调节整流变流器和有源逆变回馈之间的能量交换，稳定模拟负载直流侧电压。

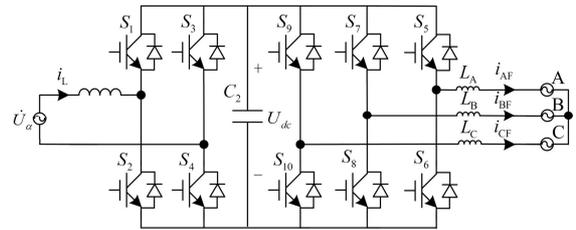


图 5 模拟负载主电路

Fig. 5 Circuit of simulation load

模拟负载中牵引电流模拟单元接入 α 相，其端口电压为

$$u_\alpha(t) = U \sin \omega t \quad (10)$$

通过对图 5 中 S1-S4 的控制，既可使模拟负载所需的牵引负荷电流，其电流与式(6)相同，为

$$i_L(t) = I_{ip} \sin \omega t + I_{iq} \cos \omega t + i_h(t) \quad (11)$$

牵引负荷模拟单元吸收的瞬有功功率为

$$p_L = u_\alpha(t) i_L(t) \quad (12)$$

模拟负载三相侧 A 相电压为

$$u_A(t) = U_2 \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (13)$$

式中， U_2 为三相侧的电压峰值。

为保证模拟负载两端能量守恒，模拟负载吸收和反馈回三相电网的有功功率应相等，为不产生负

序, 其三相输出电流 i_{AF} , i_{BF} , i_{CF} 功率因数为 1 且大小相等, 将 A 相输出电流设为

$$i_{AF}(t) = I_F \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (14)$$

式中, I_F 为三相电流峰值。

能量反馈单元 A 相发出的有功功率为

$$p_A = u_A(t)i_{AF}(t) \quad (15)$$

在一个周期内, 模拟负载两端功率守恒, 得到

$$\frac{1}{T} \int_0^{2\pi} p_L dt = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} (p_A + p_B + p_C) dt = \frac{3}{T} \int_0^{2\pi} p_A dt \quad (16)$$

由式(16)得到

$$UI_1 \cos \varphi = 3U_2 I_F \quad (17)$$

$$I_F = \frac{UI_1 \cos \varphi}{3U_2} = \frac{I_1 \cos \varphi}{3K} \quad (18)$$

由式(18)可以得到模拟负载三相输出电流为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{AF} \\ \dot{I}_{BF} \\ \dot{I}_{CF} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} I_1 \cos \varphi_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t + 30^\circ) \\ \sin(\omega t - 90^\circ) \\ \sin(\omega t + 150^\circ) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中的能量反馈三相电流与式(9)中 YNvd 平衡变压器三相输入电流相等, 在模拟牵引复合特性的同时, 电能也可以得到循环利用。

2 控制策略

综合潮流控制器与模拟负载的核心是电压型 PWM 变流器, 因此需要通过合理的控制策略控制 IPFC 和模拟负载, 得到所需的电流, 以满足同相供电系统试验需求, 并达到电能的循环利用。

2.1 IPFC 控制策略

要实现变电所电流的平衡补偿, IPFC 需要准确高效的控制方法跟踪给定的补偿参考电流, 为了保证潮流控制器的稳定工作, 直流电容环节必须有一个稳定的直流电压, 因此, 采用电压电流双环控制^[9], 如图 6 所示。

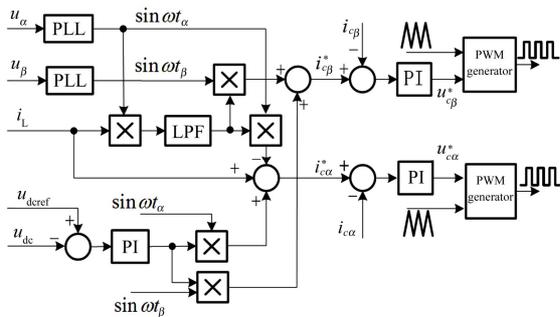


图 6 IPFC 控制策略

Fig. 6 Control diagram of IPFC

图 6 中, 电压外环作用稳定直流电压, 实际直流电压与给定直流电压相比较, 经 PI 调节后得到有功电流分量, 叠加变流器的有功指令, 得到两变流器的实际补偿指令电流 i_{ca}^* 和 i_{cb}^* 。电流内环控制变流器实际电流跟随指令电流, 电压环输出的电流指令与实际电流相比较, 经 PI 调节得到调制电压, 再与三角波比较产生触发脉冲信号, 从而控制 IPFC 输出所需电流。

2.2 模拟负载控制策略

模拟牵引负载包括牵引电流模拟单元和能量反馈两个部分, 对两单元独立控制。

a) 牵引电流模拟单元

本文中采用电流 PI 控制方法^[12], 如图 7 所示。

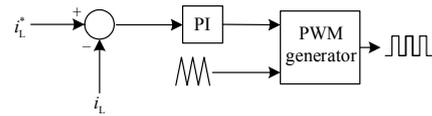


图 7 牵引电流模拟单元控制框图

Fig. 7 Control diagram of traction current simulated unit

图 7 中, 实际牵引电流 i_L 与指令电流 i_L^* 相比较, 再经 PI 调节得到调制电压再与三角波比较产生所需的触发脉冲信号。

b) 能量反馈单元控制策略

能量反馈单元为三相半桥逆变电路, 需要以接近单位功率因数实现逆变, 并控制直流侧电容电压稳定在给定值^[13]。本文采用电压电流双环控制, 如图 8 所示。

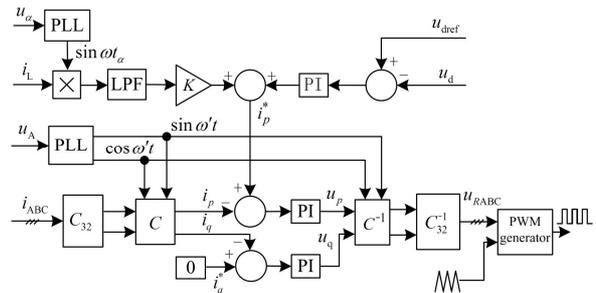


图 8 能量反馈单元控制框图

Fig. 8 Control diagram of energy feedback unit

直流电压 u_d 与给定电压 u_{dref} 差值经 PI 调节器调节, 与实际牵引负载电流计算得到有功分量相加, 得到有功指令电流 i_p^* 。能量回馈单元反馈的三相电流经变换矩阵得到有功直流分量 i_p 和无功直流分量 i_q , 分别与有功指令电流 i_p^* 和无功指令电流 i_q^* 比较, 通过 PI 调节后经变换逆矩阵得到三相调制电压, 最后与三角波比较产生触发脉冲^[11-12]。为保证能量反

馈单元以单位功率因数逆变, 无功指令电流设为 0。

3 仿真验证

对同相供电试验系统进行仿真分析, 将系统接入三相公共电网, YNvd 平衡变压一次侧电压 220 V, 二次侧电压 660 V; IPFC 参数设为 $L_\alpha = L_\beta = 5 \text{ mH}$ ^[13], $C_1 = 10 \text{ mF}$, 直流侧电压给定值 $U_{dc} = 1300 \text{ V}$, 模拟负载参数设为 $L_L = L_{ABC} = 8 \text{ mH}$, $C_2 = 10 \text{ mF}$, 直流侧电压给定值 $U_{dc} = 1300 \text{ V}$ 。

设定牵引负载电流的功率因数为 0.866(滞后), 含有 3 次、5 次谐波, 因此模拟负载指令电流为

$$i(t) = 200 \sin(\omega t - 30) + 40 \sin(3\omega t - 60) + 20 \sin(5\omega t + 150)$$

模拟负载跟踪指令电流模拟的牵引负荷如图 9 所示, 能量反馈单元反馈回三相公共电网电流如图 10 所示。

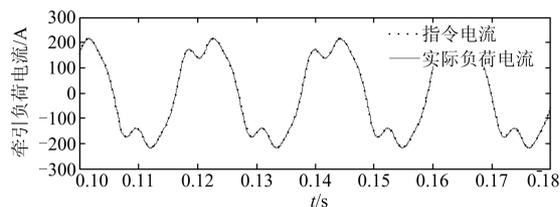


图 9 牵引负荷电流

Fig. 9 Traction load current

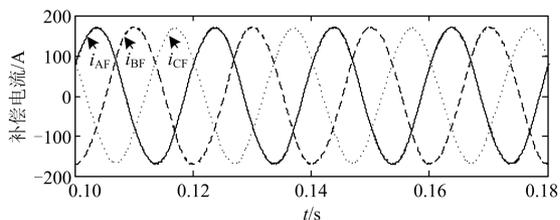


图 10 能量反馈三相电流

Fig. 10 Energy feedback currents

由图 9、图 10 可知, 牵引电流模拟单元能够较好的跟踪指令电流模拟处设定的牵引负荷电流, 能量反馈单元发出三相平衡的有功电流, 把单相侧吸收的能量以单位功率因数反馈回三相电网。

模拟负载模拟出的牵引负荷电流产生的负序、无功和谐波由 IPFC 进行补偿, 其补偿电流如图 11 所示, 补偿后 YNvd 平衡变压器一二次侧电流如图 12、图 13 所示。

由图 11 可知, IPFC 的 α 端口可实时的补偿牵引负荷所需的无功和谐波电流, 并输出一半的有功电流, β 端口提供牵引负荷一半的有功电流。

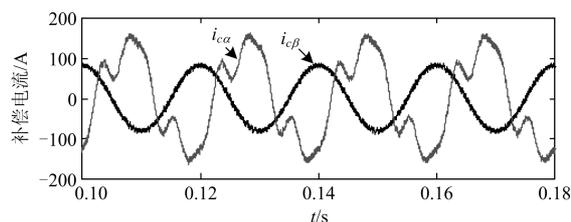


图 11 IPFC 补偿电流

Fig. 11 Compensated currents of IPFC

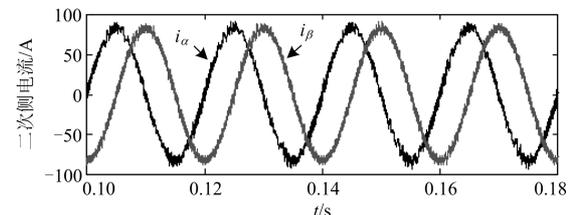


图 12 YNvd 平衡变压器二次侧端口输出电流

Fig. 12 Output currents of YNvd balanced transformer

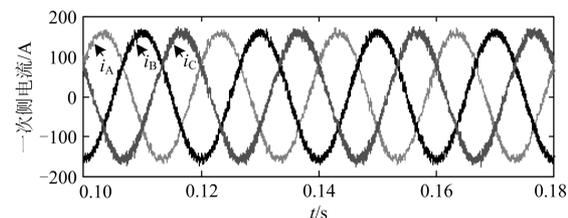


图 13 YNvd 平衡变压器一次侧输入电流

Fig. 13 Input currents of YNvd balanced transformer

由图 12、图 13 可知, 经 IPFC 补偿后, YNvd 变压器二次侧输出大小相等、相位相差 90° 的两相对称有功电流, 一次侧输入三相电流对称, 牵引供电系统相对电力系统是一个纯阻性负载, 负序、无功。

4 结论

本文提出了一种基于 YNvd 平衡变压器、IPFC 与模拟负载构成的同相供电试验系统, 该系统能够在试验室环境下对同相供电系统进行有效的模拟和深入优化研究。通过对试验系统的理论分析与建模仿真, 可以得到: (1) YNvd 平衡变压器能将三相系统变换为对称两相系统, 是一种新型的平衡变压器; (2) 模拟负载能够模拟出期望的牵引负荷特性, 可实现电能的有效利用; (3) 同相供电系统可消除因单相负荷产生的负序电流, 实现谐波和无功动态补偿的功能, 还能取消变电所出口处电分相, 是适用于高速重载铁路的新型供电系统。

参考文献

- [1] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南

交通大学出版社, 2007.

[2] 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): 23-31.
LI Qunzhan, ZHANG Jinsi, HE Weijun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction[J]. Journal of the China Railway Society, 1988, 10(4): 23-31.

[3] 张晨萌, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 基于 V/V 牵引变压器的同相供电系统电能质量混合补偿研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 496-503.
ZHANG Chenmeng, CHEN Baichao, YUAN Jiaxin, et al. Research on a hybrid compensation system for v/v co-phase railway power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 496-503.

[4] 吴萍, 李群湛. 基于 YNvd 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.

[5] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.

[6] 许志伟, 罗隆福, 张志文, 等. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 265-272.
XU Zhiwei, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A novel power quality integrated compensator for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 265-272.

[7] 陈民武, 李群湛, 解绍锋, 等. YNvd 接线变压器的阻抗匹配与运行特性[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 555-560.
CHEN Minwu, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Impedance matching and operation characteristics of YNvd-connected transformer[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(4): 555-560.

[8] SHU Zeliang, XIE Shaofeng, LI Qunzhan, et al. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.

[9] 潘汉广, 王军, 宋勇辉. 多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 136-142.
PAN Hanguang, WANG Jun, SONG Yonghui. Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 136-142.

[10] 冯金博, 解绍锋, 邢晓乾, 等. 电气化铁路同相供电试验系统模拟牵引负载方案研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(6): 29-33.
FENG Jinbo, XIE Shaofeng, XING Xiaoqian, et al. Study on simulated scheme of traction load in electrified railway cophase power supply test system[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(6): 29-33.

[11] 苏天诺, 邹明轩, 彭光强, 等. 基于统计综合法和三电平特性的高速动车组暂态负荷建模[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 257-262.
SU Tiannuo, ZOU Mingxuan, PENG Guangqiang, et al. Transient load modeling of high speed multiple units based on the statistical syntheses method and three-level characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 257-262.

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

[13] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.
CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.

收稿日期: 2015-05-04; 修回日期: 2015-07-03

作者简介:

赵元哲(1987-), 男, 博士研究生, 研究方向为牵引供电系统电能质量分析与治理、车网异常电磁暂态研究; E-mail: yuanzhezhaoy@gmail.com

朱鹏(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统电能质量分析; E-mail: 1004739134@qq.com

李群湛(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为牵引供电系统理论、电能质量与控制。Email: lqz3431@263.net

(编辑 张爱琴)