高速和重载电气化铁路 V 型接线牵引变压器负序补偿研究

夏焰坤,李群湛,解绍锋,易　东,郭　锴
(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:为解决 V 形接线形式牵引变电所引起的负序问题,首先分析了 V 型接线形式负序产生机理。在此基础上提出基于潮流控制器(PFC)的补偿方法,该方法采用 2 个单相背靠背连接的变流器在变压器次边 2 个端口进行功率交换和补偿,容易实现异相供电补偿模式和同相供电补偿模式,同时分析了基于 PFC 装置的负序补偿原理及电流检测方法,其中电流检测方法采用瞬时无功功率理论。最后对补偿方案进行了仿真验证,仿真结果表明所提方法能取得良好的补偿效果。

关键词:V 形接线牵引变压器;补偿;负序;潮流控制器;同相供电;电流检测;电气化铁路
中图分类号:U 223.5　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.013

0　引言

我国电气化铁路采用单相工频交流供电方式,该方式具有供电系统结构简单、供电电压高的特点,但相对于三相电力系统是一种不对称供电方式,存在负序问题。电力机车负荷是大功率非线性负载,存在功率大、无功含量高、谐波大的特点。因此负序、无功和谐波是电气化铁路牵引供电系统早期面临的三大问题[1-2]。

随着现代电力电子技术的发展,我国通过引进-消化-吸收-再创新的办法,目前已开发出具有自主知识产权的大功率交直交型和谐号高速动车组和和谐号重载机车。交直交型机车具有功率因数高(接近 1)、低次谐波含量少的特点,极大改善了电气化铁路的电能质量问题。然而,随着大功率机车的投入运营,负序问题将会长期存在。负序能够引起电力系统发电机转子过热、振动,引起继电保护装置误动等一系列问题[3-4]。

负序大小与牵引变压器接线形式有关[1,5],为改善负序变电所广泛采用三相-两相平衡变压器(scott、阻抗匹配平衡变)和三相-两相非平衡变压器(Vv、YN,d11)。其中由两单相变压器通过外部连接组合成 Vv、Vx 接线牵引变压器,因其结构简单、投资小,在我国高速和重载电气化铁路中得到广泛应用。因此有必要研究 V 型接线变压器的负序特点。

目前国内外对电气化铁路引起的负序、无功和谐波等问题的治理进行了研究和工程应用[6-10],主要分无源治理和有源治理。无源治理以三相 SVC 装置为代表,通过动态投入电容和电抗,在补偿负序的基础上,兼补无功、谐波等,但存在动态响应慢、补偿装置容量大、占地面积大等问题;有源治理以三相静止同步补偿器(STATCOM)和单相潮流控制器(PFC)为代表,是目前提出的一种先进的治理方式,具有动态响应快、补偿装置容量小、占地面积小的特点,世界上多个国家进行了工程试验。但是针对我国铁路广泛采用的 V 型接线牵引变压器供电方式[11-12],目前研究较少。

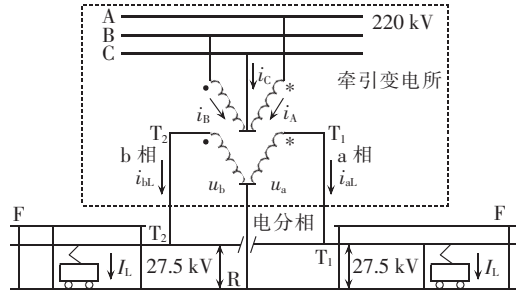
本文着重分析了我国电气化铁路采用的 V 型接线牵引变压器供电方式,在此基础上分析了负序产生机理及治理措施。针对机车负载单相供电的特点,提出基于 PFC 的补偿结构,并探讨了其异相和同相补偿结构及检测方法。最后,针对所提出的补偿结构和方法进行了相关仿真验证。

1　V 型接线变压器供电方式

目前 V 型接线牵引变压器构成的牵引供电系统主要包含 3 种供电方式:直供方式、55 kV 自耦变压器(AT)供电方式、2×27.5 kV AT 供电方式,如图 1 所示。

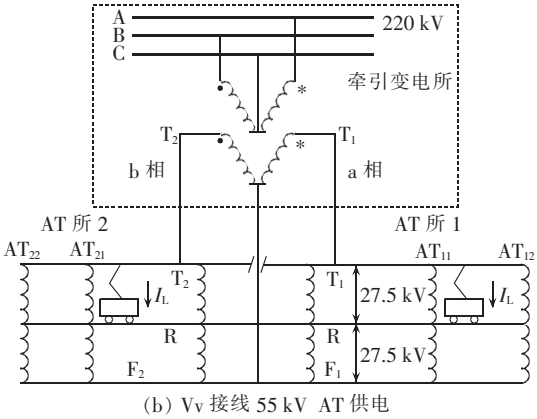
图 1(a)为直接供电方式,其中 T 为牵引网,R 为钢轨,F 为回流线。回流线与钢轨并联能起到降低钢轨电位、减小对外界干扰的作用。该接线方式结构简单、投资小,在我国普速电气化铁路中有大量应用。

图 1(b)和图 1(c)分别为 55 kV AT 供电方式和 2×27.5 kV AT 供电方式,AT 采用中点抽头。二者的主要差别在于变压器的次边结构,2×27.5 kV AT 供

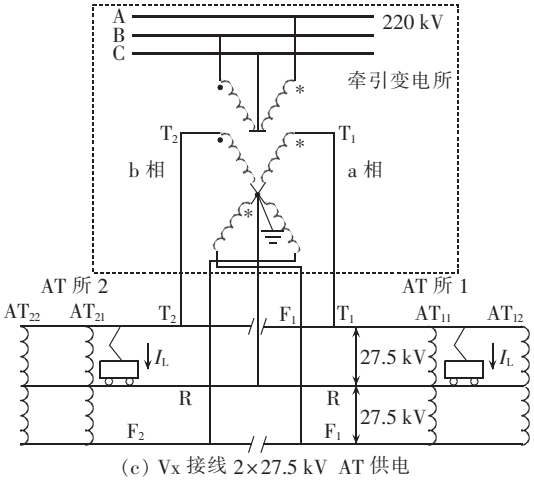


(a) Vv 接线直接供电

收稿日期:2012-11-05;**修回日期**:2013-11-19
基金项目:国家科技支撑计划(2007BAA12B05);铁道部科技研究开发计划项目(2012J012-E)
Project supported by the National Science and Technology Support Program of China(2007BAA12B05) and the Science and Technology Research Program of Railway Ministry(2012J012-E)



(b) Vv 接线 55 kV AT 供电



(c) Vx 接线 2×27.5 kV AT 供电

图 1 V 型接线供电方式

Fig.1 V-connection power supply mode

电方式将变压器次边作中点抽头,省去 55 kV AT 变电所内的第一个 AT。目前这 2 种 AT 供电方式在我国高速和重载电气化铁路上均有应用。

2 V 型接线变压器负序产生原理及补偿

2.1 负序产生及补偿分析

由上节 V 型接线供电方式可以看出,直接供电方式和 55 kV AT 供电方式变压器端口接线相同,都可称作 Vv 接线形式,主要差别在于端口电压不同。而 2×27.5 kV AT 供电方式变压器次边包含中心抽头,常称作 Vx 接线形式,负载侧功率计算与前 2 种有差别。本文先分析 Vv 接线负序机理,Vx 接线形式特点将在第 2.4 节讨论。

如图 1(a)所示,不考虑高速铁路交直交型机车负载谐波含量,功率因数假定为 1。以电力系统三相侧 A 相电压为基准,次边两臂电流分别为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{i}_{aL}&=I_a e^{-j30^\circ}\\ \boldsymbol{i}_{bL}&=I_b e^{-j90^\circ}\end{aligned}\tag{1}$$

其中,I_a、I_b 为供电臂电流基波有效值。则相应的系统原边侧电流为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{i}_A&=I_a e^{-j30^\circ}/K\\ \boldsymbol{i}_B&=I_b e^{-j90^\circ}/K\\ \boldsymbol{i}_C&=-(\boldsymbol{i}_A+\boldsymbol{i}_B)\end{aligned}\tag{2}$$

其中,K 为变压器变比。可得原边和次边电压和电流矢量关系如图 2 所示。

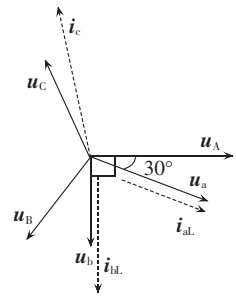


图 2 电压和电流矢量图

Fig.2 Vector diagram of voltage and current

由图 2 可以看到,次边两相电流矢量相角差别为 60°,次边三相电流不平衡,始终存在负序分量。

根据文献[13],次边两相电流在原边引起的正、负序电流大小分别为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{i}_A^{(+)}&=\frac{1}{K}(I_a+I_b)e^{-j0^\circ}\\ \boldsymbol{i}_A^{(-)}&=\frac{1}{K}(I_a e^{-j2\psi_a}+I_b e^{-j2\psi_b})\end{aligned}\tag{3}$$

将 a 相接线角 $\psi_a=30^\circ$ 和 b 相接线角 $\psi_b=90^\circ$ 代入上式,则得到电流不平衡度:

$$\varepsilon_I=\frac{|\boldsymbol{i}_A^{(-)}|}{|\boldsymbol{i}_A^{(+)}|}=\frac{\sqrt{I_a^2+I_b^2-I_aI_b}}{|I_a+I_b|}\tag{4}$$

由式(4)可得到 Vv 接线变压器电流不平衡度曲线,如图 3 所示,横坐标为两臂电流比 $n=I_a/I_b$,取值范围为 0~3。

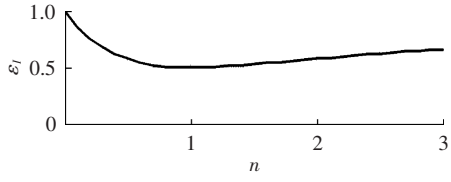
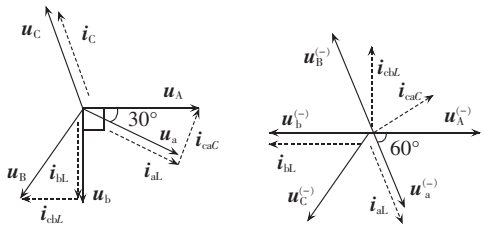


图 3 电流不平衡度曲线

Fig.3 Curve of current unbalance degree

由图 3 可得出结论:Vv 接线变压器引起的负序在两臂电流 $I_a=I_b$ 时,有最小值 0.5,其中任一相电流为 0 时,有最大值 1。因此补偿系统的最低要求应使两臂有功电流平衡,并要在此基础上补偿感性和容性无功功率:$I_{caC}=I_{cbL}=\frac{1}{2}(I_a+I_b)\tan30^\circ$,使得三相侧负序分量为 0,补偿量为 $\frac{1}{2}(I_a+I_b)\frac{2}{\sqrt{3}}$,如图 4 所示,其中已经令 $I_a=I_b$。

针对 V 型接线变压器存在的负序问题,根据牵引变电所内是否取消电分相环节,可以从 2 个方面进行治理:异相供电结构负序补偿(保留电分相)和同相供电结构负序补偿(取消电分相)。



(a) 补偿矢量关系　　(b) 负序图

图 4 补偿矢量关系及负序图

Fig.4 Compensation vector and negative sequence diagram

2.2 异相供电补偿结构和原理

异相供电补偿即在现有变压器次边两相供电方式基础上增加综合补偿装置,见图 5。系统原有结构不改变,次边两相间(变电所内)分相装置仍然存在。图 5 给出了一种基于 PFC 的补偿结构,PFC 通过背靠背结构连接 2 个供电臂。PFC 由降压变压器、开关管和直流侧电容组成,能够实现两供电臂之间有功功率的双向流动,并能在两供电臂端口分别补偿无功功率。

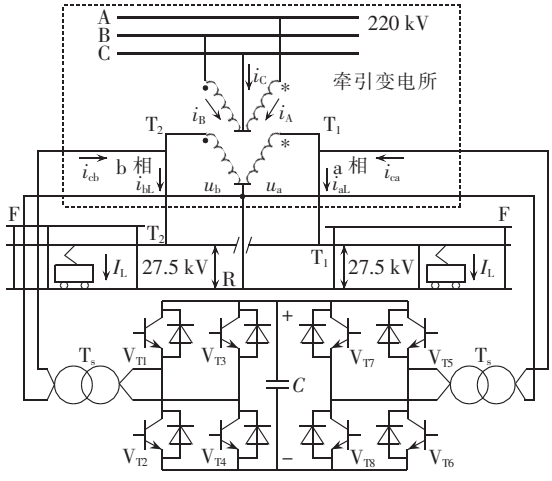


图 5 异相供电时补偿系统结构

Fig.5 Structure of compensation system in out-phase power supply mode

由第 2.1 节可知,补偿的前提在于首先检测负载两端口电流大小,计算出平均电流,然后在此基础上补偿相应无功分量,即可消除负序。系统电流检测方法如图 6 所示。

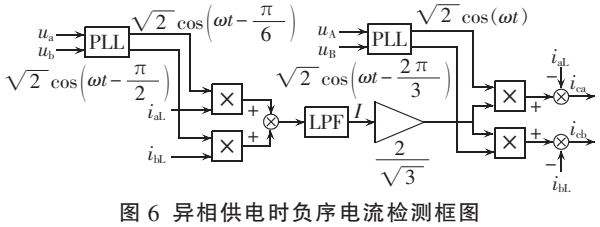


图 6 异相供电时负序电流检测框图

Fig.6 Block diagram of negative sequence current detection in out-phase power supply mode

检测方法基本原理如下。

以原边 A 相电压为基准,变压器次边两供电臂电压为:

$$\begin{aligned} u_{\mathrm{a}} &= \sqrt{2}\,U_{\mathrm{a}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right) \\ u_{\mathrm{b}} &= \sqrt{2}\,U_{\mathrm{b}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

两电压经过锁相环(PLL)锁相后得到电压同步信号$\sqrt{2}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)$和$\sqrt{2}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$。

不考虑次边无功和谐波电流分量,则两供电臂电流为:

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{aL}} &= \sqrt{2}\,I_{\mathrm{a}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right) \\ i_{\mathrm{bL}} &= \sqrt{2}\,I_{\mathrm{b}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

根据单相瞬时功率理论,容易得到两单相系统有功电流之和为:

$$\begin{aligned} &\sqrt{2}\,I_{\mathrm{a}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)\sqrt{2}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)+ \\ &\sqrt{2}\,I_{\mathrm{b}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)\sqrt{2}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)= \\ &I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}}+I_{\mathrm{a}}\cos\left(2\omega t-\frac{\pi}{3}\right)+I_{\mathrm{b}}\cos(2\omega t-\pi) \end{aligned} \tag{7}$$

上式包含直流分量和 2 次谐波分量。经过低通滤波器(LPF)后,2 次谐波分量被滤除,再乘以 0.5,即得到两臂电流平均值 $I=\frac{1}{2}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})$。

负序完全补偿情况下,两臂提供的电流有效值为$\frac{1}{2}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})\cdot\frac{2}{\sqrt{3}}$,再乘以 u_{A} 和 u_{B} 对应的同步电压信号$\sqrt{2}\cos(\omega t)$和$\sqrt{2}\cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)$,得到两臂电流瞬时值为:

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{a}} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})\cos(\omega t) \\ i_{\mathrm{b}} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})\cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \tag{8}$$

上式两臂电流包含有功电流和相应的无功电流分量,相应的补偿电流指令为:

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{ca}} &= i_{\mathrm{a}}-i_{\mathrm{aL}}=\frac{\sqrt{2}}{2}(I_{\mathrm{b}}-I_{\mathrm{a}})\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)+ \\ &\quad\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right) \\ i_{\mathrm{cb}} &= i_{\mathrm{b}}-i_{\mathrm{bL}}=\frac{\sqrt{2}}{2}(I_{\mathrm{a}}-I_{\mathrm{b}})\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)+ \\ &\quad\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}(I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{b}})\cos(\omega t-\pi) \end{aligned} \tag{9}$$

PFC 装置在计算出补偿电流 i_{ca} 和 i_{cb} 后,经过电

流跟踪控制算法和开关调制方式，及时补偿三相系统中的负序分量，使得三相侧电流完全对称，从而消除了负序，装置控制原理见图7。图7中采用直接电流控制方式[14-15]，在电流检测基础上增加了PFC直流侧电压控制环节和电流闭环PI比较环节。直流侧电压 U_d 通过PI环节实时跟踪指令电压 U_{dref} 以维持直流侧电压稳定。同理，变流器输出的补偿电流通过PI实时跟踪补偿电流指令，以得到系统需要的补偿电流，跟踪后的电流误差通过三角载波控制方式，产生PFC需要的驱动信号。

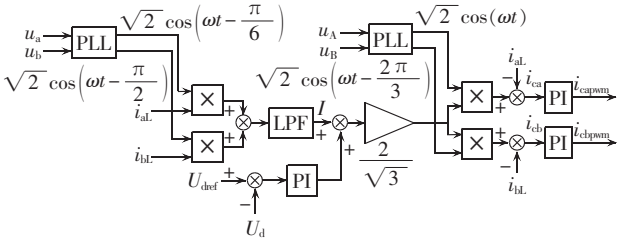


图7 异相供电时控制框图

Fig.7 Block diagram of control in out-phase power supply mode

2.3 同相供电补偿结构和原理

由于牵引变压器次边两供电臂电压相位不同，需要安装电分相装置，变电所之间分区所也存在电分相环节。电分相是电气化铁路接触网中的供电死区，也是薄弱环节。列车经过电分相时，总要经过减速、断电等一系列过分相操作，引起列车速度损失，同时存在过电压、过电流等不安全因素。近年来随着高速电气化铁路的发展，对取消变电所内的电分相环节、实现同相供电方式方面，铁路领域相关专家进行了深入研究。由Vv接线变压器构成的同相供电系统结构如图8所示。

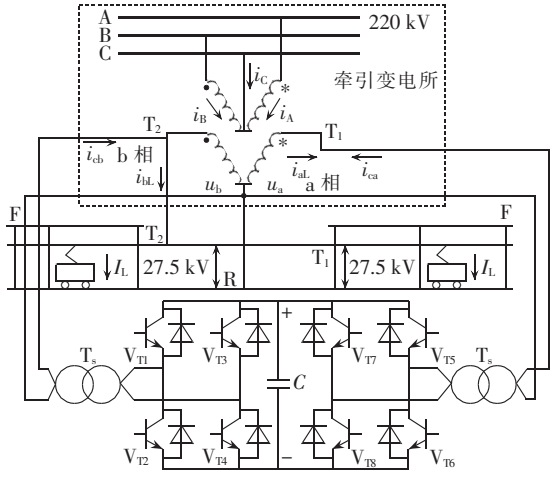


图8 同相供电时补偿系统结构

Fig.8 Structure of compensation system in co-phase power supply mode

图8中变压器次边a相不直接与牵引网相连，a相和b相接PFC装置，整个牵引网直接连接在一起。显然，除牵引网取消电分相之外，从补偿系统角度看来，同相供电方式只是异相补偿方式的一种特殊情况，是 $i_{aL}=0$ 的情况，相应两臂平均电流为b相负载电流的一半，即a相侧通过PFC装置实时传递负载有功电流的一半给b相，并要在两臂补偿相应无功分量。在图6基础上令 $i_{aL}=0$，得到同相供电时系统电流检测框图如图9所示。

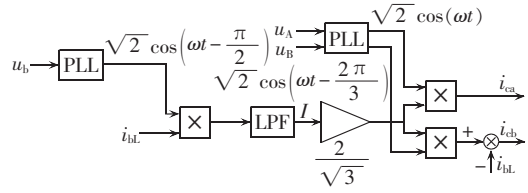


图9 同相供电时负序电流检测框图

Fig.9 Block diagram of negative sequence current detection in co-phase power supply mode

两供电臂补偿电流指令为：

$$\begin{aligned} i_{ca}&=\frac{\sqrt{2}}{2}I_b\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)+\\ &\quad\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}I_b\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\\ i_{cb}&=i_b-i_{bL}=-\frac{\sqrt{2}}{2}I_b\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)+\\ &\quad\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}I_b\cos(\omega t-\pi) \end{aligned} \tag{10}$$

同相供电时补偿系统控制结构与图7类似，亦采用电压和电流环闭环控制方式。

2.4 Vx接线补偿分析

Vx接线变压器次边绕组采取中心抽头的方法，次边电流分配比Vv接线变压器复杂，次边结构如图10所示。忽略AT漏抗，假定机车端电压为27.5 kV，两机车取流均为100 A，容易得到图中电流分配关系。

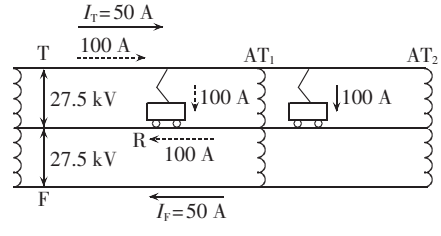


图10 Vx接线次边电流分配

Fig.10 Secondary current distribution for Vx-connection

显然在第1个AT段内，相当于直接供电方式，靠近变压器侧F线不流过电流。在第2个AT段内，供电方式与55 kV AT供电方式相当，认为第1个AT内钢轨R中无电流流过。这样，Vx接线变压器次边负载总功率为 $27.5I_T+27.5I_F$(kW)。因此在计算Vx接线变压器两臂电流有效值时，要同时检测T线和F线电流。变压器负序特性和Vv接线相同，当PFC装置接在两臂T和F段进行异相和同相供电补偿

时,相应的检测电流部分需要作出修正,补偿系统结构和检测方法与 Vv 接线类似,在此不再赘述。

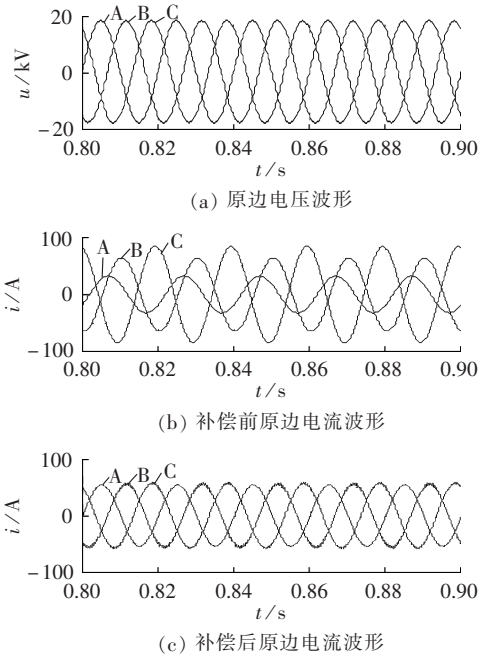
3　仿真分析

为验证本文所分析负序补偿原理和检测方法的正确性,在 MATLAB/Simulink 平台上进行了仿真验证。其中电力系统侧电压为 220 kV,牵引网额定电压 27.5 kV,PFC 装置采用单相背靠背结构,降压变压器电压比为 27 500∶930,中间直流侧电压设定为 3000 V,控制系统采用电压电流双闭环结构,电压环 PI 参数中比例系数为 0.4,积分系数为 10,电流环 PI 参数中比例系数为 0.3,积分系数为 400,三角载波频率选用 1000 Hz。机车负载采用恒功率源表示。

下面分别就异相供电补偿和同相供电补偿进行仿真分析。

3.1　异相供电补偿仿真

图 11 给出了 a 相机车负荷有功功率为 5 MW、b 相机车负荷有功功率为 10 MW 时的仿真结果。在未补偿的情况下,原边 220 kV 三相电流不对称,其不对称度达到 57.7%,存在大量负序电流分量注入到电力系统。同样负荷条件下变电所采用 PFC 补偿后,原边电流平衡,负序电流得到治理。此时补偿后原边电流比未补偿时小。



(a) 原边电压波形

(b) 补偿前原边电流波形

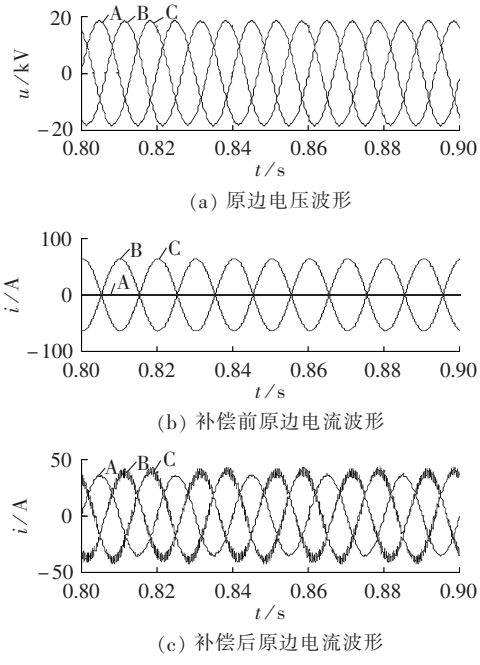
(c) 补偿后原边电流波形

图 11　异相供电时补偿前后原边电流

Fig.11 Primary current before and after compensation in out-phase power supply mode

3.2　同相供电补偿仿真

图 12 给出了同相供电时机车负荷有功功率为 10MW 时的仿真结果。在未补偿的情况下,原边 220 kV 三相电流不对称,其不对称度达到 100%,存在大量负序电流分量注入到电力系统。同样负荷条件下变电所采用 PFC 补偿后,PFC 从 a 相传递功率给 b 相,系统原边电流平衡,负序电流得到治理。



(a) 原边电压波形

(b) 补偿前原边电流波形

(c) 补偿后原边电流波形

图 12　同相供电时补偿前后原边电流

Fig.12 Primary current before and after compensation in co-phase power supply mode

通过上述 2 种情况下仿真分析可知,PFC 装置能够很好地治理 V 型接线变压器引起的负序电流,为高速和重载电气化铁路电能质量治理提供了一种良好的解决途径,同时也验证了本文理论的正确性。

4　结论

a. 针对 Vv 型接线牵引变压器在异相和同相供电模式情况下,提出补偿方案和电流检测方法。从补偿角度看,同相补偿只是异相补偿的特例。

b. 讨论了 Vx 接线变压器次边电流分配情况,并提出相应电流检测措施。

c. 仿真结果验证了本文所提负序补偿方案和检测方法的有效性,为我国高速电气化铁路今后进行负序治理提供参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] 李群湛. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011:98-100.

[3] 张雪原,吴广宁,边姗姗,等. 一种新型牵引供电网构想[J]. 铁道学报,2007,29(3):100-106.
ZHANG Xueyuan,WU Guangning,BIAN Shanshan,et al. A new traction grid on main railway[J]. Journal of the China Railway Society,2007,29(3):100-106.

[4] 姚金雄,张涛,林榕,等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术,2008,32(9):61-64.
YAO Jinxiong,ZHANG Tao,LIN Rong,et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures[J]. Power System Technology,2008,32(9):61-64.

[5] 周勇,刘中元,王绪雄. 牵引变压器负序电流的分析[J]. 变压器,2003,40(2):11-13.
ZHOU Yong,LIU Zhongyuan,WANG Xuxiong. Analysis of negative phase-sequence current in traction transformer[J]. Transformer,2003,40(2):11-13.

[6] 于坤山,周胜军. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京:中国电力出版社,2011:203-252.

[7] 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(8):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(8):32-37.

[8] 张刚毅,李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):142-145.
ZHANG Gangyi,LI Qunzhan. Transfer from out-phase power supply to in-phase power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):142-145.

[9] 邱大强,李群湛,余俊祥. 混合式电铁电能质量调节器补偿原理及容量分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):59-64.
QIU Daqiang,LI Qunzhan,YU Junxiang. Compensation principle of hybrid power quality conditioner for electric railroads and capacity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):59-64.

[10] 邱大强,李群湛,周福林,等. 基于背靠背SVG的电气化铁路电能质量综合治理[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):36-39.
QIU Daqiang,LI Qunzhan,ZHOU Fulin,et al. Comprehensive power quality control of electric railway based on back to back SVG[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):36-39.

[11] 魏光. 采用V型接线的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):60-65.
WEI Guang. Cophase traction power supply system based on V connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):60-65.

[12] 吴传平,罗安,徐先勇,等. 采用V/v变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):111-117.
WU Chuanping,LUO An,XU Xianyong,et al. Integrative compensation method of negative phase sequence and harmonic for high-speed railway traction supply system with V/v transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):111-117.

[13] 李群湛. 电气化铁道并联补偿技术及其应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1993:13-15.

[14] 谭甜源,姜齐荣,李刚,等. 基于电流跟踪控制的三电平DSTATCOM装置的控制方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(4):61-65.
TAN Tianyuan,JIANG Qirong,LI Gang,et al. Industry application of three-level DSTATCOM based on direct current control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(4):61-65.

[15] 徐锋,王辉,杨韬仪. 兆瓦级永磁直驱风力发电机组变流技术[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):57-61.
XU Feng,WANG Hui,YANG Taoyi. Research on power conversion technique in MW-level direct-driven wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):57-61.

作者简介:

夏焰坤

夏焰坤(1984-),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要研究方向为牵引供电系统分析和电能质量分析与控制(**E-mail**:yankunjtdx@126.com);

李群湛(1957-),男,河北元氏人,教授,博士,长期从事电力系统分析、牵引供电理论、电能质量与控制等方面的教学与科研工作(**E-mail**:lqz3431@263.net);

解绍锋(1976-),男,河北定州人,副教授,主要研究方向为牵引供电系统电能质量分析。

Negative sequence compensation of high-speed and heavy-haul electric railroad with V-connection transformer

XIA Yankun,LI Qunzhan,XIE Shaofeng,YI Dong,GUO Kai

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

Abstract: Aiming at the negative sequence problem of traction substation with V-connection transformer,its generation mechanism is analyzed,based on which,the compensation method based on PFC(Power Flow Controller) is proposed. It applies two back-to-back inverters at two ports of transformer secondary side for power exchange and compensation,which eases the implementation of both out-phase and co-phase power supply compensation modes. The principle of negative sequence compensation based on PFC and the method of current detection are analyzed. The instantaneous reactive power theory is adopted in the current detection. Simulative results confirm the effectiveness of the proposed compensation scheme.

Key words: V-connection transformer; compensation; negative sequence; power flow controller; co-phase power supply; current detection; electric railroads