

同相牵引供电系统控制策略研究及仿真分析

黄小红,李群湛,杨乃琪,舒泽亮

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 针对电气化铁道的谐波、无功、负序及电分相等问题,讨论了采用 Scott 平衡变压器与综合潮流控制器(IPFC)构成的同相供电系统。提出 IPFC 直流侧电压 PI 均值前馈控制策略,可准确控制变压器副边电流幅值均衡,实现系统负序的完全补偿。为改善传统控制方法谐波含量高、直流侧电压波动大的不足,提出直流侧电流均值前馈控制策略。所提方法使系统具有良好的动态特性、稳定性及较小的稳态误差,且在牵引和再生制动工况下均适用。仿真分析验证了所提方法的有效性与正确性。

关键词: 同相牵引供电系统; 综合潮流控制器; 滞环比较控制; 前馈控制; PI 均值前馈控制; 电流均值前馈控制; 再生制动; 补偿; 电气化铁道

中图分类号: TM 922.3;U 224

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.008

0 引言

电气化铁道的谐波、无功、负序及电分相等问题一直受到各界关注。由于牵引负荷单相、非线性,且具有随机波动性的特点,造成电力系统三相不平衡,负序、谐波和无功严重影响公用电网的电能质量^[1-2]。文献[3-5]讨论了采用高压大容量的静止无功补偿器 SVC(Static Var Compensator)、有源滤波器 APF(Active Power Filter)对电气化铁路负序、谐波和无功进行综合补偿的方案。日本在新干线投运的铁路功率调节器 RPC(Railway static Power Conditioner),实现了无功功率、负序和谐波电流的综合补偿^[6]。然而,受牵引供电模式和系统结构的限制,以上工作均无法消除电分相环节。电分相环节给电力机车快速平稳运行带来安全隐患,制约了高速、重载铁路的发展^[2]。

为进一步提高电气化铁路的供电性能,更好地适应高速铁路的发展要求,文献[7-8]提出了同相供电系统理论,并针对无源补偿装置实现同相供电做了大量的研究。近年来,基于平衡变压器和综合潮流控制器 IPFC(Integrated Power Flow Controller)的同相供电系统成为研究的热点^[9-16],它可有效消除电分相环节,并可实现负序、谐波和无功的动态补偿,因此正逐步得到人们的青睐。

关于 IPFC 的控制方法,通常采用的是比例积分(PI)和滞环比较控制策略,其负序和谐波的补偿效果有限,直流侧电压波动较大,值得进一步改进。本文首先介绍了 Scott 平衡变压器与 IPFC 构成的同相供电系统,分析了负序和谐波电流补偿原理,并基于

电流内环的滞环比较控制理论,提出了直流侧电压 PI 均值前馈控制策略,使负序得到改善。为进一步降低谐波分量,稳定直流侧电压,提出直流侧电流均值前馈控制方法,使系统的动态特性进一步提升、稳态误差进一步减小。控制方法在牵引和再生制动工况下均适用。最后通过仿真分析验证了本文所提控制方法的有效性与正确性。

1 同相供电系统结构及补偿原理

如图 1 所示,IPFC 接于 Scott 平衡变压器副边 α 、 β 2 个端口,将原有的两相牵引供电方式转变为仅由 α 端口供电的单相方式,实现不同变电所供电的区段接触网电压同相位且无电分相环节的同相供电系统。

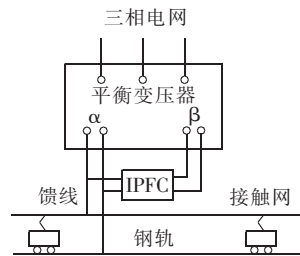


图 1 同相牵引供电系统

Fig.1 Co-phase traction power supply system

平衡变压器两侧的电流变换关系为^[1]:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{K}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $K = \frac{U_\alpha}{\sqrt{3} U_A}$ 。由式(1)易知,当 I_α 和 I_β 谐波含量较低时,注入到电力系统的谐波含量亦低。

牵引侧各端口电流在三相系统中造成的总负序电流 $I^{(-)}$ 为^[17]:

$$I^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{s=1}^S K_s I_s e^{-j(2\psi_s + \varphi_s)} \quad (2)$$

其中, K_s 为牵引变压器副边端口电压与一次侧线电压之比; I_s 为牵引变压器副边端口电流有效值; ψ_s 为牵引变压器副边端口接线角; φ_s 为牵引变压器副边端口的功率因数角。对于 Scott 平衡变压器, $S=2$, $K_1=K_2=K$, $\psi_1=90^\circ$, $\psi_2=0^\circ$, 故可得:

$$I^{(-)} = \frac{K}{\sqrt{3}} [I_1 e^{-j(180^\circ + \varphi_1)} + I_2 e^{-j\varphi_2}] \quad (3)$$

式(3)表明, 当 $I_1=I_2$, $\varphi_1=\varphi_2$ 时, 负序为 0, 原边电流 I_A 、 I_B 、 I_C 对称, 可完全消除对电力系统的影响。

IPFC 的构成如图 2 所示, 其核心为 2 个背靠背连接的电压源变流器, 中间通过直流电容耦合并提供直流电压。 T_1 、 T_2 是变比为 k 的降压变压器, 起降低电压等级和隔离的作用。为滤除直流环节的偶次谐波, 常在 C 所在支路并入 LC 滤波器组。

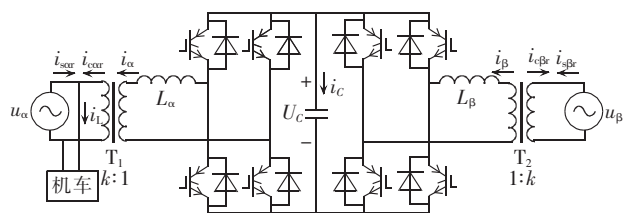


图 2 IPFC 结构
Fig.2 Structure of IPFC

设 IPFC 的 2 个端口电压为:

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t \\ u_\beta(t) = \sqrt{2} U_1 \sin (\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

负载电流为:

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

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

考虑到消除负序、谐波和无功, 结合式(3)和(4), α 、 β 端口电流的期望值设为:

$$\begin{cases} i_{s\alpha}(t) = \sqrt{2} I_{sr} \sin \omega t \\ i_{s\beta}(t) = \sqrt{2} I_{sr} \sin (\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

在一个电源周期内, 电源提供的能量应为负载消耗的能量与 IPFC 损耗的能量之和, 即:

$$\int_0^T p_s(t) dt = \int_0^T p_L(t) dt + \Delta W_{\text{loss}} \quad (7)$$

其中, $p_s = u_\alpha(t) i_{s\alpha}(t) + u_\beta(t) i_{s\beta}(t)$, 为电源输出瞬时功率; $p_L(t) = u_\alpha(t) i_L(t)$, 为负载瞬时功率; ΔW_{loss} 为 IPFC 损耗的能量。

将式(4)~(6)代入式(7), 可得:

$$I_{sr} = \frac{1}{2U_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_\alpha(t) i_L(t) dt + \frac{I_{\text{loss}}}{2} = \frac{I_{lp}}{2} + \frac{I_{\text{loss}}}{2} \quad (8)$$

其中, T 为电源周期, $I_{lp} = I_1 \cos \varphi_1$, 为负载电流有功分

量; I_{loss} 为 ΔW_{loss} 对应的损耗电流分量。所以, IPFC 两端口补偿电流期望值为:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}(t) \\ i_{c\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 IPFC 的控制策略

为提高 IPFC 补偿装置的综合补偿性能, 本文在传统电压外环、电流内环控制方法的基础之上, 基于均值滤波算法, 提出了直流侧电压 PI 均值前馈控制和直流侧电流均值前馈控制策略, 有效地提高了系统的动态特性及稳定性, 减小了稳态误差, 构建出如图 3 所示的 IPFC 控制系统框图。鉴于滞环比较具有动态响应快、鲁棒性好等优点, 满足同相供电 IPFC 的要求^[9], 因此电流内环采用滞环比较控制策略。两变流器分别单独控制, 通过 β 侧变流器闭环 PI 控制稳定直流侧电容电压, 以直流侧电压 PI 均值前馈控制稳定 α 、 β 侧指令参考电流, 以直流电容电流均值前馈控制改善动态特性及稳态误差, 达到了良好的综合性能。

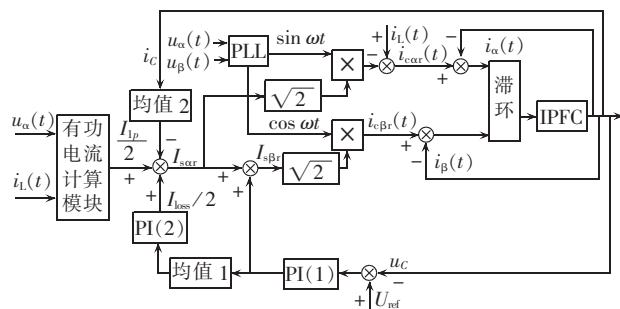


图 3 IPFC 控制框图

Fig.3 Block diagram of IPFC control

2.1 直流侧电压 PI 均值前馈控制

由式(8)知, α 、 β 侧电源需提供一半的负载有功电流 $\frac{I_{lp}}{2}$ 及一半的 IPFC 损耗电流 $\frac{I_{\text{loss}}}{2}$ 。 $\frac{I_{lp}}{2}$ 由有功电流计算模块实现, 采用均值积分器完成有功电流的分离^[18], 这里不予介绍。 $\frac{I_{\text{loss}}}{2}$ 则通过直流侧电压 PI 均值前馈控制得到。

考虑 IPFC 电路结构, 当忽略电路损耗时, 根据瞬时功率平衡原理, 可得:

$$\frac{u_\beta}{k} i_\beta - \frac{1}{2} L_\beta \frac{di_\beta^2}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{du_c^2}{dt} + \frac{1}{2} L_\alpha \frac{di_\alpha^2}{dt} + \frac{u_\alpha}{k} i_\alpha \quad (10)$$

由于机车负载谐波电流主要表现为奇次谐波, 由式(9)可得变流器交流侧电流为:

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{2} I_{11} \sin \omega t + \sqrt{2} I_{12} \cos \omega t + \sum_{m=3,5,7,\dots} \sqrt{2} I_m \sin (m\omega t + \varphi_m) \\ i_\beta = \sqrt{2} I_{11} \sin (\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

其中, I_{11} 为负荷有功电流的一半, I_{12} 为负荷无功电

流, I_m 为谐波电流, φ_m 为谐波电流初相位。

将式(4)和(11)代入式(10)可得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}C\frac{du_c^2}{dt} &= E\sin(2\omega t + \chi) + \\ &\frac{U_1}{k}\sum_{m=3,5,7,\dots} I_m\{\cos[(m+1)\omega t + \varphi_m] - \\ &\cos[(m-1)\omega t + \varphi_m]\} - \\ &\omega L_{\alpha} I_{11}\sum_{m=3,5,7,\dots} I_m\{(m+1)\sin[(m+1)\omega t + \varphi_m] - \\ &(m-1)\sin[(m-1)\omega t + \varphi_m]\} - \\ &\omega L_{\alpha} I_{12}\sum_{m=3,5,7,\dots} I_m\{(m+1)\cos[(m+1)\omega t + \varphi_m] + \\ &(m-1)\cos[(m-1)\omega t + \varphi_m]\} - \\ &\omega L_{\alpha}\sum_{m=3,5,7,\dots}\sum_{n=3,5,7,\dots} mI_mI_n\{\sin[(m+n)\omega t + \\ &\varphi_m + \varphi_n] - \sin[(m-n)\omega t + \varphi_m - \varphi_n]\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $E = \sqrt{A^2 + B^2}$, $\chi = \arctan \frac{B}{A}$, $A = \omega I_{11}^2(L_{\beta} - L_{\alpha}) +$
 $\omega L_{\alpha} I_{12}^2 - \frac{U_1 I_{12}}{k}$, $B = \frac{2U_1 I_{11}}{k} - 2\omega L_{\alpha} I_{11} I_{12}$ 。

由式(12)知,等式右侧均为偶次谐波。故 u_c 可表示为:

$$u_c = \pm \sqrt{\sum_{m=2,4,6,\dots} E_m \sin(m\omega t + \chi_m)} \quad (13)$$

u_c 的脉动频率为偶次倍频,波形接近正弦波。所以可采用 2 倍频均值算法(即图 3 中“均值 1”模块)滤除脉动分量,得到 IPFC 损耗电流 I_{loss} 。为降低直流偶次脉动频率及脉动频率对交流环节的影响,常在直流环节并入 LC 滤波器组,如图 4 所示。

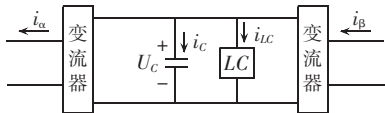


图 4 直流环节结构
Fig.4 Structure of DC link

2.2 直流侧电流均值前馈控制

根据图 2 和图 4,对直流环节列写 KCL 方程可得:

$$\begin{aligned} i_c + i_{LC} &= i_{\alpha} - i_{\beta} \quad (14) \\ \text{电路达到稳态时,可得:} \\ i_{LC} &= i_{\alpha} - i_{\beta} - i_c = \\ &\sqrt{2} I_{11} \sin \omega t + \sqrt{2} (I_{11} + I_{12}) \cos \omega t + \\ &\sum_{m=3,5,7,\dots} \sqrt{2} I_m \sin(m\omega t - \varphi_m) - i_c \end{aligned} \quad (15)$$

从式(15)可看出,除 i_c 项外,其余项为基波和奇次谐波,故通过直流电容电流工频均值算法(即图 3 中“均值 2”模块)实现 LC 滤波器组的前馈控制,提高了系统的动态特性,减小了稳态误差。

3 仿真分析

为证明本文所提控制方法的正确性,建立了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型。IPFC 参数为 $k=10$,

$L=1\text{ mH}$, $C=5\text{ mF}$,直流侧电压给定值为 $U_{ref}=5\text{ kV}$ 。牵引网电压为 27.5 kV ,负载电流^[9] $i_L=200\sin(\omega t-36.8^\circ)+42\sin(3\omega t-60^\circ)+30\sin(5\omega t+150^\circ)\text{ A}$,其中 3 次、5 次谐波含量分别为 21%、15%,功率因数为 0.8(滞后),容量为 $4800\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。再生制动时电流取为 $-i_L$ 。

原、副边电流仿真波形如图 5 所示。由图 5(a)可见, i_{α} 、 i_{β} 呈较标准的正弦波,幅值大小相等。对比图 5(b),传统控制方法得到的正弦波发生明显畸变,幅值大小不等。 α 、 β 侧电流反馈至三相电力系统的电流波形如图 5(c)、(d)所示。易见,图 5(c)中原边三相电流有较好的对称性,而传统控制方法波形(见图 5(d))对称性较差。进行傅里叶分析,得到 2 种控制方法下原、副边电流基波值及谐波含量见表 1。

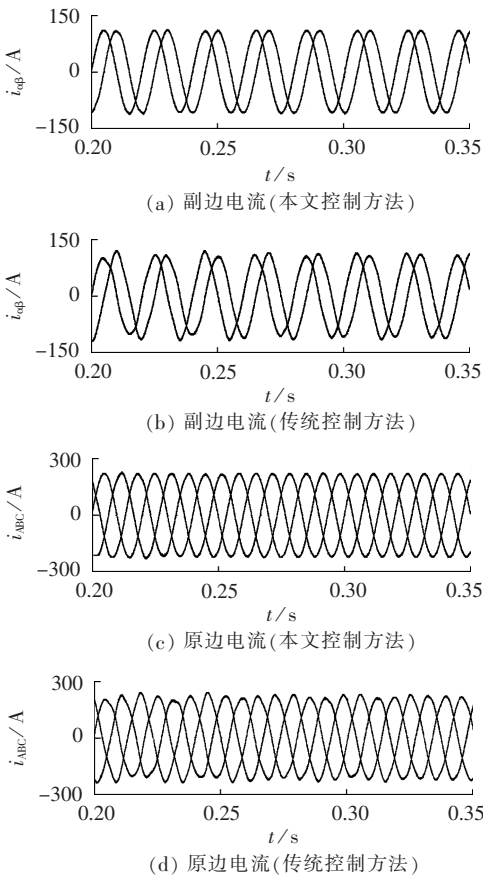


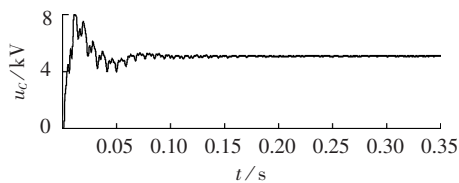
图 5 2 种控制方法下原、副边电流波形
Fig.5 Waveforms of primary and secondary currents for two control schemes

表 1 原、副边电流的傅里叶分析
Tab.1 FFT analysis for primary and secondary currents

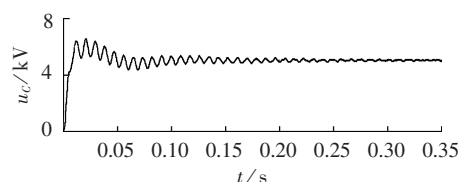
原、副边	基波值/A		THD/%	
	传统方法	本文方法	传统方法	本文方法
α 侧	108.8	108.3	2.11	0.65
β 侧	107.8	108.3	2.00	0.79
A 相	215.2	216.6	2.40	0.75
B 相	217.1	216.7	1.57	0.76
C 相	216.8	216.5	2.11	0.65

从表 1 可以看出,通过本文控制方法得到的电流谐波含量低, α 、 β 侧及原边 A、B、C 相的谐波畸变率 THD 均降到 0.8% 以下,且原、副边各相基波值近乎相等。而传统控制方法不仅谐波含量远高于 0.8%,各相基波大小也存在一定差异。所以,本文控制方法在抑制谐波、改善波形对称性方面有明显的优势。

图 6 为采用 2 种方法得到的直流侧电压波形。可见,本文控制方法中,电压在 0.1 s 时趋于稳定,到 0.25 s 时,电压变化量仅为 15 V,稳态误差很小;而传统控制方法中,电压在 0.1 s 及以后时刻仍处于波动,到 0.25 s 时的波动量达 300 V。所以,本文控制方法有效增强了系统的动态特性和降低了稳态误差。



(a) 本文控制方法



(b) 传统控制方法

图 6 直流侧电压
Fig.6 DC link voltage

图 7 反映了再生制动时直流侧电压情况。0.25 s 时列车由牵引状态过渡至再生制动状态,经过约 0.05 s 电压再次达到稳定。状态转换过程中并未对直流电容造成过大的电压冲击。图 8 为三相电力系统由牵引状态过渡到制动情况下的电流波形。可见,在制动工况下,本文控制方法有较好的适应性。

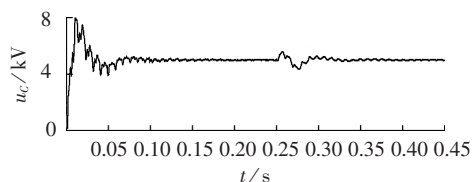


图 7 再生制动时直流侧电压
Fig.7 DC link voltage of regenerative braking

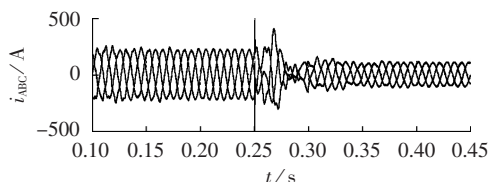


图 8 再生制动时原边电流
Fig.8 Primary current of regenerative braking

4 结论

为解决电气化铁道的谐波、无功、负序及电分相

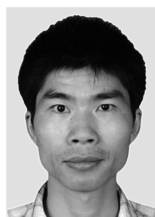
等问题,本文研究了 Scott 变压器与 IPFC 构成的同相供电系统,重点探讨了 IPFC 的控制策略。在传统控制方法基础之上,提出直流侧电压 PI 均值前馈控制和直流侧电流均值前馈控制策略,有效实现了谐波、无功、负序的补偿,稳定了直流侧电压,提高了系统的动态特性及稳定性,减小了稳态误差,对改善电气化铁道牵引供电系统电能质量、取消电分相起到积极的作用。

参考文献:

- [1] 夏焰坤,李群湛,赵元哲,等. 基于瞬时无功理论和平衡变压器的牵引变电所电流平衡补偿方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):42-45.
XIA Yankun,LI Qunzhan,ZHAO Yuanzhe,et al. Compensation based on instantaneous reactive current detection theory and balance transformer for traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):42-45.
- [2] 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):61-65.
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):61-65.
- [3] CHI Meidan,WU Mingli. The switching transient simulation of SVC used in electric railway traction substation[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing,China;The UK-China Network of Clean Energy Research,2009:1-5.
- [4] 王跃,杨君,王兆安,等. 电气化铁路用混合电力滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):23-27.
WANG Yue,YANG Jun,WANG Zhaoan,et al. Study on hybrid power filter used in electrified railway system[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):23-27.
- [5] 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.
- [6] MORIMOTO H,ANDO M,MOCHINAGA Y,et al. Development of railway static power conditioner used at substation for shinkansen[C]//Power Conversion Conference. Osaka,Japan;The Industry Applications Society of the IEE Japan,2002:1108-1111.
- [7] 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.
- [8] 李群湛,贺建闽. 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.
LI Qunzhan,HE Jianmin. Electrified rail way feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(4):9-11.
- [9] 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.
- [10] 张友鹏,董海燕. 基于 Y/△平衡变压器的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 101-104.
ZHANG Youpeng, DONG Haiyan. Co-phase traction power supply system based on Y/△ balanced transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 101-104.
- [11] 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.
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.
- [12] 江睿,刘光晔,邹宇. 电气化铁路用 Yd11 型变压器两相平衡协调控制系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 85-90.
JIANG Rui, LIU Guangye, ZOU Yu. Two-phase-balance coordinated control system of Yd11 traction transformer for electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 85-90.
- [13] 张秀峰,连级三,高仕斌. 基于三相变四相变压器的新型同相牵引供电系统[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 19-23.
ZHANG Xiufeng, LIAN Jisan, GAO Shibin. A new cophase traction power supply system based on three-phase to four-phase transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 19-23.
- [14] 魏光. 基于 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.
- [15] 马庆安,李群湛,解绍锋,等. AT 供电系统同相供电 PR 控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 154-159.
MA Qing'an, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Design of PR regulator for co-phase AT-feeding traction power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 154-159.
- [16] 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.
- [17] 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: 6-17.
- [18] 陆秀令,张松华,曹才开,等. 单相电路谐波及无功电流新型检测方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 163-166.
LU Xiuling, ZHANG Songhua, CAO Caikai, et al. New detecting method for harmonics and reactive currents in single phase circuit[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 163-166.

作者简介:



黄小红

黄小红(1978-),男,湖北广水人,讲师,博士研究生,研究方向为牵引供电系统分析、电气化铁路电能质量分析与控制(E-mail: hhwjy15534@163.com);

李群湛(1957-),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,主要从事牵引供电系统理论及电能质量的分析与控制等相关科研与教学工作。

Control strategy of co-phase traction power supply system and simulative analysis

HUANG Xiaohong, LI Qunzhan, YANG Naiqi, SHU Zeliang

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

Abstract: Aiming at the problems in the negative sequence, harmonics, reactive power and electrical separation of electric railroad, the co-phase traction power supply system composed of Scott transformer and IPFC (Integrated Power Flow Controller) is discussed. A scheme of PI-mean feedforward control at IPFC DC voltage side is presented to properly control the amplitude equilibrium of transformer secondary current for the complete compensation of system negative sequence. A scheme of DC current-mean feedforward control is also given to suppress the harmonic content and smooth the DC voltage. The proposed control strategy has better dynamic performance and stability, as well as smaller steady-state error, suitable for both traction and regenerative braking conditions. Simulative results verify its correctness and effectiveness.

Key words: co-phase traction power supply system; integrated power flow controller; hysteresis comparison control; feedforward control; PI-mean feedforward control; current-mean feedforward control; regenerative braking; compensation; electric railroads