

## AT 供电系统同相供电 PR 控制器设计

马庆安, 李群湛, 解绍锋, 徐英雷

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 提出 AT 供电系统的基于 PR 控制器的同相供电设计方案。该方案采用 Scott 变压器以降低变压器和背靠背 H 型变流器的容量, 选择了自适应 EPLL 以提高锁相环的响应速度, 基于 PR 控制器设计了 H 型变流器的控制系统。充分考虑了由开关频率引起的 H 型变流器的时间延迟, 并基于 Naslin 多项式设计了 PR 控制器参数。仿真结果证明, 所提方案能达到无功和负序补偿要求, 抗负荷扰动的能力较强, 谐波补偿能力非常小, 适合于运行交-直-交动车组的牵引供电系统。

**关键词:** AT 供电系统; 同相供电; PR 控制器; 补偿; 电能质量

**中图分类号:** U 223.6+3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.027

## 0 引言

在现有的电气化铁路中, 为降低牵引负荷对电力系统的负序影响, 各牵引变电所均与电力系统实行换相联接, 从而导致电分相环节的存在<sup>[1]</sup>。由于其机械、电气方面的弱点, 电分相成为高速铁路运行的薄弱环节<sup>[2]</sup>。目前, 国内外一般采用自动过分相技术。然而, 车载自动过分相方式电力机车速度损失大, 而地面自动过分相方式投资较大, 并对供电系统和电力机车造成一定的电气冲击<sup>[3]</sup>。文献<sup>[4]</sup>提出了同相供电技术。同相供电就是在所讨论的区段上各牵引臂均由同一相电压供电而仅使用分段绝缘器的一种供电方式。若不采取特殊措施, 各牵引变电所注入电力系统的负序电流叠加后, 将严重影响电力系统的电能质量。一般均在各牵引变电所采取必要的补偿措施。

关于同相供电技术的文献非常多。就电流控制而言, 或采用了 PI 控制<sup>[3,5-7]</sup>, 或采用了滞环控制<sup>[8-16]</sup>。滞环控制实现简单, 鲁棒性强, 但开关频率、开关损耗不固定, 谐波频谱分布广, 而常频的滞环控制实现较复杂<sup>[17]</sup>。PI 控制在跟踪交流信号时存在稳态幅值和相位误差<sup>[18]</sup>, 导致电压和电流不严格同相以致功率因数降低。

PR 控制器具有对交流信号的良好跟踪能力, 为此本文采用了基于 PR 控制器的电流跟踪方案。仿真结果表明, 本文方法能在 20 ms 内实现对负荷电流的跟踪, 且能实现单位功率因数。

## 1 系统结构与补偿策略

## 1.1 系统结构

牵引变电所布置如图 1 所示。这里采用 Scott 接

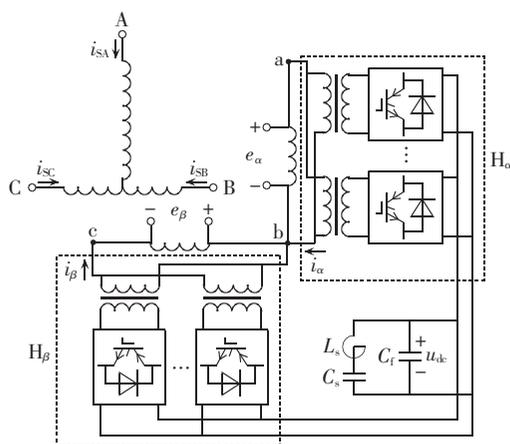


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

线变压器是由于其结构简单、补偿设备容量利用率高<sup>[19]</sup>。若一次侧需中性点接地, 可改为 YNvd 接线变压器。这 2 种接线变压器端口特性相同, 可互换<sup>[19]</sup>。该 Scott 接线变压器一次侧接入电力系统, 二次侧额定电压均为 55 kV。e<sub>a</sub>、e<sub>b</sub> 分别为该变压器二次侧绕组端电压。AT 牵引网接到 bc 端子, 图 1 未示出。背靠背有源补偿设备 H<sub>α</sub>、H<sub>β</sub> 分别连接到 ab、bc 端口。i<sub>α</sub>、i<sub>β</sub> 分别为 H<sub>α</sub>、H<sub>β</sub> 产生的补偿电流。由于高速铁路负荷较大, H<sub>α</sub>、H<sub>β</sub> 均由相同的多个单相变流器单元并联组成。各变流器单元均经隔离变压器连接到所在端口。由于单相变流器直流侧的 2 次谐波电压较为严重, 在直流侧设置了由 L<sub>s</sub>、C<sub>s</sub> 组成的 2 次谐波谐振支路与支撑电容器 C<sub>f</sub> 并联。

## 1.2 补偿策略

一般高速铁路为交-直-交型电力机车/动车组, 其功率因数接近于 1, 含有少量的低次谐波。牵引网有少量的无功损耗, 因此牵引变电站馈出电流含有少量的无功分量和低次谐波分量。因牵引负荷和 H<sub>β</sub> 在同一端口, H<sub>β</sub> 需具备无功功率补偿功能及通过 H<sub>α</sub> 为负荷传递 1/2 的有功功率。由于 H<sub>β</sub> 的无功补偿容

收稿日期: 2012-11-09; 修回日期: 2013-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1134205); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU11BR169)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1134205) and the Fundamental Research Fund of the Central Universities(SWJTU11BR169)

量很小,  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$  的容量可设计得相等, 从而可达到牵引变压器两端口的负荷功率相等, 且功率因数为 1。

## 2 控制系统

### 2.1 控制系统结构设计

同相供电控制系统结构如图 2 所示, 其中,  $n$  为每端口变流器单元数。直流电压经一阶低通滤波器 (LPF) 后与指令信号比较并送入 PI 控制器, 其输出与锁相环 (PLL) 正弦、余弦信号相乘后产生电容器充电电流指令以维持直流电压恒定。电容器  $C_f$  由  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$  同时充电, 有利于暂态过程中维持牵引变压器两端口的电流平衡、缩短电容器充电时间, 可等值为  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$  为电容值  $C_f/2$  的电容器充电, 有别于其他文献。该电流指令与补偿电流指令信号  $i_{\alpha ref}$ 、 $i_{\beta ref}$  相加后除以  $n$  得单个变流器单元的电流指令信号, 并将其与变流器单元的反馈电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  比较, 由 PR 控制器产生变流器电压指令  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ , 并通过 SPWM 方式产生交流电压。此时, 各变流器单元相互独立, 可提高系统可靠性。

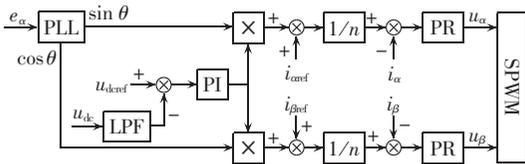


图 2 控制系统结构

Fig.2 Structure of control system

### 2.2 PLL 选择

准确的电压相位检测对控制系统至关重要, PLL 已成为控制系统最重要的组成部分<sup>[20-22]</sup>。适用于单相的 PLL 种类非常多, 文献<sup>[22-25]</sup>对各种 PLL 进行了大量的比较研究。其中, 增强型锁相环 (EPLL) 具有较好的动、静态性能而得到广泛应用, 其结构如图 3 所示,  $\mu_1$  控制幅值响应速度,  $\mu_2$ 、 $\mu_3$  控制相位响应速度。文献<sup>[26]</sup>通过添加自适应环节改进了动态性能。EPLL 幅值传递函数为<sup>[26]</sup>:

$$G_A(s) = \frac{\mu_1/2}{s + \mu_1/2} \quad (1)$$

相位传递函数为:

$$G_\phi(s) = \frac{\mu_3 A_0 s + \mu_2 A_0}{2s^2 + \mu_3 A_0 s + \mu_2 A_0} \quad (2)$$

其中,  $A_0$  为输入信号  $u$  的幅值。

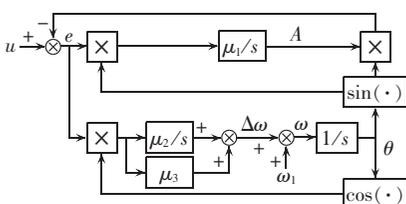


图 3 EPLL 结构

Fig.3 EPLL structure

由式(1)、(2)可知, 幅值传递函数与输入信号幅值无关, 因此, 其动态性能可由  $\mu_1$  直接单独确定; 而相位传递函数的极点与输入信号幅值有关, 一般可先把输入电压信号规格化, 再确定  $\mu_2$ 、 $\mu_3$  参数。

文献<sup>[26]</sup>建议取  $\mu_1 = \mu_3 = \mu$ ,  $\mu_2 = \mu^2/8$ , 此时阻尼系数  $\xi$  为 0.707, 可取得响应速度和超调的最佳折中<sup>[27]</sup>。取  $\mu = K\omega_1$ , 其中  $\omega_1$  为基波频率,  $0.5 \leq K \leq 1.5$ <sup>[26]</sup>。K 越大, EPLL 响应也越迅速, 但稳态性能越差。为不降低稳态性能而又能提高响应速度, 文献<sup>[26]</sup>提出一种自适应方案, 即用  $\bar{\mu}_2$  代替  $\mu_2$ 。

$$\bar{\mu}_2 = \frac{\mu_2 A^2}{A^2 + \lambda e^2} \quad (3)$$

其中,  $A$  为  $A_0$  的估计值;  $e$  为输入信号  $u$  的估计误差;  $\lambda$  为调节常数,  $50 \leq \lambda \leq 100$ 。从而使参数  $\bar{\mu}_2$  随误差变化而变化。当误差很大时,  $\bar{\mu}_2 \approx 0$ , PI 控制近似为纯比例控制; 当误差接近于 0 时, 仍为一般的 PI 控制器以消除稳态误差。考虑到牵引网的电压波动较大, 本文选择  $K=1$ , 从而  $\mu=314$ , 并取  $\lambda=50$ , 可获得较好的暂态性能。

### 2.3 电流检测

准确、快速的谐波、无功电流检测对有源补偿设备有重要作用<sup>[28-29]</sup>。文献<sup>[28-29]</sup>对各种电流检测方案进行了综述。自适应陷波滤波器首先由文献<sup>[30]</sup>提出, 文献<sup>[31]</sup>增加了一阶 LPF, 提高了响应速度和稳态性能。LPF 可取为  $L(s) = 1/(1 + \tau s)$ , 其中,  $\tau$  设为  $1/(2\pi \cdot 30)$  可取得较为满意的跟踪特性<sup>[31]</sup>。然而, 本文仅需检出有功电流, 可对自适应陷波滤波器进行简化, 简化后其结构如图 4 所示。其中,  $I_{pm}$  为有功电流峰值;  $i_h$  为谐波电流分量;  $i_p$ 、 $i_{qj}$  分别为基波有功、无功电流分量;  $\sigma$  为学习因子, 本文取  $\sigma=100$ <sup>[31]</sup>。

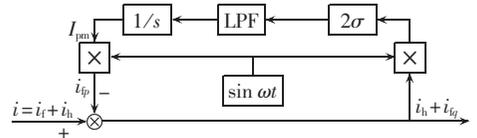


图 4 自适应电流检测结构

Fig.4 Adaptive current detector

无功和谐波电流检测后, 由

$$\begin{cases} i_{\alpha ref} = 0.5 I_{pm} \sin \theta \\ i_{\beta ref} = 0.5 I_{pm} \cos \theta - i_h - i_{qj} \end{cases} \quad (4)$$

得参考电流指令, 以完成无功功率、谐波补偿和有功功率平衡的功能。

### 2.4 电流内环 PR 控制

传统 PI 控制器在对交流信号进行控制时一般会产生相位延迟, 影响了系统的稳态性能<sup>[18]</sup>。PR 控制器可实现对交流信号的良好跟踪, 且无需坐标变换, 非常适合于单相系统<sup>[32]</sup>。带谐波补偿环节的 PR 控制器能实现谐波的补偿, 谐波补偿环节的最高频

率应远低于开关频率<sup>[33]</sup>。为降低损耗,大功率器件的开关频率一般比较低;且交-直-交型电力机车低次谐波电流含量很小,故本文没有使用带谐波补偿的 PR 控制器。

因纯积分环节实现困难,且为避免无限增益引起的稳定性问题,纯积分环节一般用一阶低通环节  $\omega_c/(\omega_c+s)$  代替<sup>[18,34]</sup>,得 PR 控制器传递函数为:

$$G_{PR}(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2} \quad (5)$$

变流器传递函数可表示为<sup>[35]</sup>:

$$H(s) = \frac{e^{-T_d s}}{R + Ls} \quad (6)$$

其中,  $e^{-T_d s}$  为变流器延迟环节,  $T_d \approx 0.75 T_s$ ,  $T_s$  为一个开关周期。

为方便,可将延迟环节用二阶系统近似,得:

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1}{0.5 T_d^2 s^2 + T_d s + 1} \quad (7)$$

电流内环结构如图 5 所示。由式(5)~(7),将系统开环传递函数用三阶传递函数近似,得:

$$G_{PR}(s)H(s) \approx \frac{k_{pv}s^2 + (2\omega_c k_{pv} + k_{iv})s + k_{iv}\omega_1^2}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (8)$$

$$a_0 = \omega_1^2 R$$

$$a_1 = 2\omega_c R + \omega_1^2 (RT_d + L)$$

$$a_2 = R + 2\omega_c (RT_d + L) + \omega_1^2 (0.5 T_d^2 R + LT_d)$$

$$a_3 = (RT_d + L) + \omega_c T_d^2$$

从而得系统闭环传递函数:

$$T(s) \approx \frac{[k_{pv}s^2 + (2\omega_c k_{pv} + k_{iv})s + k_{iv}\omega_1^2]}{[a_3 s^3 + (a_2 + k_{pv})s^2 + (a_1 + 2\omega_c k_{pv} + k_{iv})s + (a_0 + k_{pv}\omega_1^2)]} \quad (9)$$

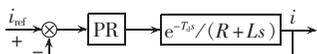


图 5 电流内环结构

Fig.5 Structure of inner current loop

文献[35-37]基于 Naslin 多项式设计了 PR 控制器参数,然而均未考虑变流器的时间延迟。当开关频率较低时,延迟环节将对系统的相位裕度造成很大影响<sup>[38]</sup>。文献[39]表明,对 4 次及以下特征多项式,使用 Naslin 多项式法可在增益裕度、相位裕度、超调、绝对积分误差 IAE、稳定性等方面获得优异性能。

## 2.5 电压外环控制

为降低电压反馈信号中的 2 次及其他更高次谐波,在反馈环节中加入一个一阶 LPF<sup>[33]</sup>,如图 6 所示。若 LPF 截止频率远高于电压环闭环带宽,则可不考虑其影响<sup>[33]</sup>,可得闭环传递函数:

$$T_C(s) = \frac{2k_{pv}s + 2k_{iv}}{C_f s^2 + 2k_{pv}s + 2k_{iv}} \quad (10)$$

这里仍用 Naslin 多项式法设计控制器参数。为此,令式(10)中特征多项式等于  $(s + \omega_{02})^2$ ,得:

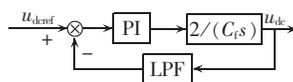


图 6 电压环结构

Fig.6 Structure of voltage loop

$$\begin{cases} k_{pv} = \omega_{02} C_f \\ k_{iv} = \frac{\omega_{02}^2 C_f}{2} \end{cases} \quad (11)$$

把  $\omega_{02}$  看作自变量,则  $k_{pv}$  和  $k_{iv}$  均为  $\omega_{02}$  的函数。为消除内外环动态相互影响,一般要求内环闭环带宽是外环的 10 倍以上<sup>[40]</sup>。为此,先设定一个  $\omega_{02}$  求出相关参数并画出波特图,利用波特图求出闭环带宽,再根据闭环带宽是否合适调节  $\omega_{02}$ 。

## 3 仿真实证

设系统参数如下:Scott 变压器额定容量为 31.5 MV·A,电压等级为 110 kV/55 kV,  $U_k\%$  为 10;隔离变压器额定容量为 4 MV·A,电压等级为 55 kV/1.65 kV,  $U_k\%$  为 10,低压侧串联电感为 1.48 mH,电感电阻为 0.15  $\Omega$ ;变流器开关频率为 1500 Hz;每端口变流器单元数为 3;直流侧支撑电容器为 20 mF,滤波电感为 0.317 mH,滤波电容为 8 mF,品质因数为 50,额定电压为 3.3 kV。可知  $T_d \approx 0.5$  ms。 $\omega_c$  取 10 rad/s。电流环开环传递函数特征多项式的系数如下: $a_0 = 1.480 \times 10^4$ ,  $a_1 = 178.19$ ,  $a_2 = 0.2712$ ,  $a_3 = 1.778 \times 10^3$ 。对各变流器单元,令闭环特征多项式等于  $a_3(s + \omega_{01})^3$ ,可求得  $\omega_{01} = 532.4$  rad/s,  $k_{pv} = 2.569$ ,  $k_{iv} = 1282$ ,其开环、闭环传递函数波特图如图 7、8 所示,相位裕度为 77°,增益裕度无穷大,闭环带宽为 312.4 Hz。由图 7 可见,系统开环传递函数在 50 Hz 处有很大的增益,可减小交流电流跟踪误差,提高对交流电流跟踪能力;在 5、7 次等谐波频率处的增益较 50 Hz 处下

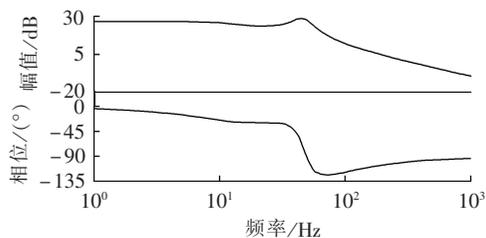


图 7 电流环开环波特图

Fig.7 Open-loop Bode plot of current loop

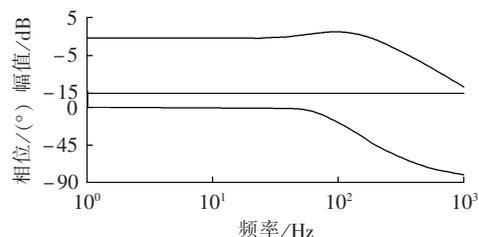


图 8 电流环闭环波特图

Fig.8 Closed-loop Bode plot of current loop

降很多,导致该处的谐波电流不能实现良好跟踪。由图 8 可见,3 次谐波频率处闭环增益接近 1,但相位滞后约为  $40^\circ$ ,导致产生的 3 次谐波电流和指令电流有约  $40^\circ$  的相位差,故 3 次谐波补偿能力非常小。因系统滤波能力不足,故适用于运行交-直-动车组的牵引供电系统。

对电压外环,取  $\omega_{02}=40 \text{ rad/s}$ ,得  $k_{pU}=0.8, k_{iU}=16$ ,对应积分常数  $\tau_i=50 \text{ ms}$ ,系统外环波特图如图 9 所示,对应闭环带宽  $15.7 \text{ Hz}$ 。一阶 LPF 时间常数设为  $1 \text{ ms}$ 。

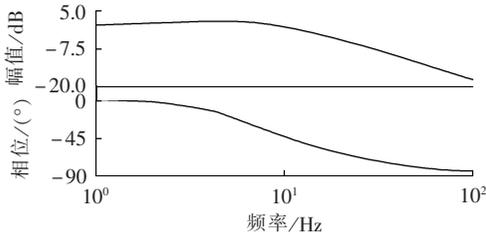


图 9 电压环闭环波特图

Fig.9 Closed-loop Bode plot of voltage loop

本文基于 PSCAD 进行了仿真分析。设动车组电流为:

$$i_L = [500 + 200 u(0.8)](\sin \omega t + 0.3 \cos \omega t) \quad (12)$$

其中,  $u(\cdot)$  为单位阶跃函数。

图 10 为  $27.5 \text{ kV}$  侧动车组交流侧电压、电流波形,其中电流放大了 100 倍。图 11 为 bc 端口检测到的负荷有功电流峰值  $I_{pm}$ ,可见检测时间约为  $20 \text{ ms}$ 。本文使用了 AT 牵引网,故  $I_{pm}$  为动车组有功电流峰值的  $1/2$ 。由图 12(a)可见,经约  $20 \text{ ms}$  牵引变压器高压侧电流达到稳定状态,稳定后三相电流对称。由图 12(b)可见,A 相电压、电流同相,达到了无功功率补偿的目的。由图 13 可见,电容器电压  $u_{dc}$  从  $0.8 \text{ s}$  开始经约 3~4 个周期恢复到设定值。

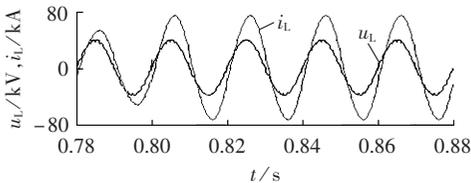


图 10 动车组电压、电流

Fig.10 Voltage and current of electric vehicle

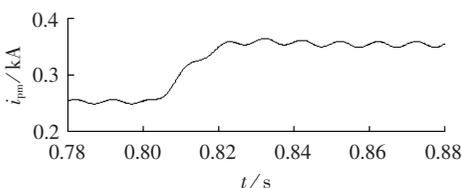
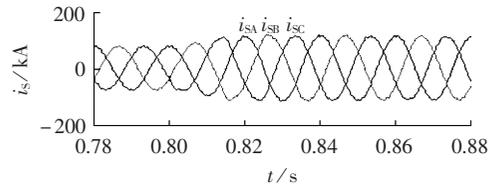
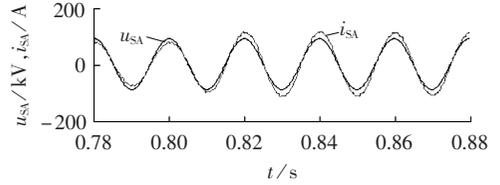


图 11 牵引变压器 bc 端口负荷有功电流峰值  $I_{pm}$   
Fig.11  $I_{pm}$ , peak value of active current at port bc of traction transformer



(a) 牵引变压器一次侧三相电流



(b) 牵引变压器一次侧 A 相电压、电流

图 12 牵引变压器一次侧电压、电流波形

Fig.12 Waveforms of primary voltage and current of traction transformer

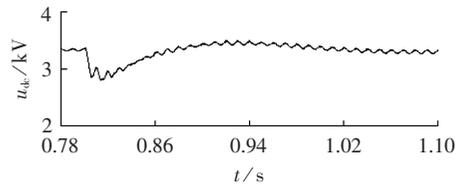


图 13 直流支撑电容器电压  $u_{dc}$

Fig.13  $u_{dc}$ , voltage of DC supporting capacitor

## 4 结论

本文提出了基于 PR 控制器的电流控制方案,充分考虑了变流器的时间延迟,并基于 Naslin 多项式法设计了电流控制器参数。仿真结果证明,本文所提方案能达到无功和负序补偿要求,抗负荷扰动的能力较强,一般在  $20 \text{ ms}$  达到稳态;谐波补偿能力非常小,适合于运行交-直-动车组的牵引供电系统。

## 参考文献:

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1981: 106-122.
- [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.  
LI Qunzhan. On some technical key problems in the development of traction power supply system for high-speed railway in China[J]. Journal of the China Railway Society,2010,32(4): 119-124.
- [3] 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):19-23.  
ZHOU Fulin,LI Qunzhan,QIU Daqiang. Co-phased traction power supply system based on hybrid compensation[J]. Journal of the China Railway Society,2012,34(1):19-23.
- [4] 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.
- [5] 杨博,李群湛,冯金博,等. 基于三电平电压源变流器的同相牵引

- 供电方案研究[J]. 兰州交通大学学报,2010,29(3):86-95.
- YANG Bo,LI Qunzhan,FENG Jinbo,et al. Research on a cophase traction power supply system based on three-level VSC[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2010,29(3):86-95.
- [6] 周建佳,胡成,杨苏飞. 基于UPQC的电气化铁路同相供电方案的研究[J]. 电气技术,2010(1):14-17.
- ZHOU Jianjia,HU Cheng,YANG Sufei. Research on a scheme of cophase power supply system for electrified railways based on UPQC[J]. Electrical Engineering,2010(1):14-17.
- [7] 刘晓菊,李群湛,康健,等. 同相牵引供电系统的补偿原理及再生制动特性[J]. 电网技术,2010,34(12):99-103.
- LIU Xiaoju,LI Qunzhan,KANG Jie,et al. Compensation principle of cophase traction power supply system and its regenerative braking characteristics [J]. Power System Technology,2010,34(12):99-103.
- [8] SHU Zeliang,XIE Shaofeng,LI Qunzhan. 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] 夏焰坤,李群湛,邹大云. 一种基于有源滤波器的同相牵引供电方案[J]. 电网技术,2010,34(10):131-134.
- XIA Yankun,LI Qunzhan,ZOU Dayun. A cophase traction power supply system based on active power filter[J]. Power System Technology,2010,34(10):131-134.
- [10] 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.
- [11] 曾国宏,郝荣泰. 采用有源滤波器实现平衡变换的供电系统研究[J]. 铁道学报,2003,25(1):48-53.
- ZENG Guohong,HAO Rongtai. A novel three-phase balanced traction supply system based on active power filter[J]. Journal of the China Railway Society,2003,25(1):48-53.
- [12] 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.
- [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] 张秀峰,钱清泉,李群湛,等. 基于有源滤波器和AT供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 中国铁道科学,2006,27(6):73-78.
- ZHANG Xiufeng,QIAN Qingquan,LI Qunzhan,et al. A novel cophase power supply system based on active power filter and AT power supply mode[J]. China Railway Science,2006,27(6):73-78.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] KAZMIERKOWSKI M P,MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters:a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1998,45(5):691-703.
- [18] ZMOOD D N,HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,18(3):814-822.
- [19] 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,2006:50-59.
- [20] HAN B,BAE B. Novel phase-locked loop using adaptive linear combiner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):513-514.
- [21] PEDRO R,JOSEP P,JOAN B,et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):584-591.
- [22] RUBENS M,SANTOS F,PAULO F S,et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(8):2923-2932.
- [23] SILVA S M,LOPES B M,CARDOSO F B J,et al. Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems [C]//Conference Record of the IEEE-IAS Annual Meeting. Seattle,USA:IEEE,2004:208-212.
- [24] da SILVA S A O,CAMPANHOL L B G,GOEDTEL A,et al. A comparative analysis of p-PLL algorithms for single-phase utility connected systems[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona,Spain:EPE,2009:1-10.
- [25] CACCIATO M,CONSOLI A,CRISAFULLI V,et al. Robustness evaluation of phase-locked loop algorithms for single-phase distributed generation systems [C]//International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. Pisa,Italy:IEEE,2010:914-919.
- [26] GHARTEMANI M K,KHAJEHODDIN S A,JAIN P K,et al. Problems of startup and phase jumps in PLL systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(4):1830-1838.
- [27] THACKER T,BOROYEVICH D,BURGOS R,et al. Phase-locked loop noise reduction via phase detector implementation for single-phase systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(6):2482-2490.
- [28] ASIMINOAEI L,BLAABJERG F,HANSEN S. Detection is key-harmonic detection methods for active power filter applications [J]. IEEE Industry Applications Magazine,2007,13(4):22-33.
- [29] BHATTACHARYA A,CHAKRABORTY C,BHATTACHARYA S. Shunt compensation-review traditional methods of reference current generation[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2009,3(3):38-49.
- [30] LUO S G,HOU Z C. An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1995,42(1):85-89.

- [31] MIRET J,CASTILLA M,MATAS J,et al. Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter with high harmonic rejection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009 56(8):3117-3127.
- [32] HWANG J G,LEHN P W,WINKELNKEMPER M. A generalized class of stationary frame-current controllers for grid-connected AC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2742-2751.
- [33] CASTILLA M,MIRET J,MATAS J. Linear current control scheme with series resonant harmonic compensator for single-phase grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(7):2724-2733.
- [34] TEODORESCU R,BLAABJERG F,LISERRE M,et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications,2006,153(5):750-762.
- [35] HOLMES D G,LIPO T A,MCGRATH B P,et al. Optimized design of stationary frame three phase AC current regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(11):2417-2426.
- [36] KAZMIERKOWSKI M P,KRISHNAN R,BLAABJERG F,et al. Control in power electronics:selected problems[M]. San Diego, CA, USA:Academic,2002:126-141.
- [37] PHAN V T,LEE H H. Control strategy for harmonic elimination in stand-alone DFIG applications with nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(9):2662-2675.
- [38] PHAN V T,LEE H H. Enhanced proportional-resonant current controller for unbalanced stand-alone DFIG-based wind turbines[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2010,5(3):443-450.
- [39] TAVAZOEI M S,HAERI M. Comparison of the existing methods in determination of the characteristic polynomial[C]//ARAS Conference. Istanbul,Turkey:WASET,2005:130-133.
- [40] ROSAS E,CARDENAS V,ALCALA J,et al. Active and reactive current decoupled control strategy applied to a single-phase BTB converter[C]//6th International Conference on Electrical Engineering,Computing Science and Automatic Control. Toluca,Mexico:[s.n.],2009:1-6.

#### 作者简介:

马庆安(1976-),男,山东曹县人,博士研究生,研究方向为电力系统电能质量控制、牵引供电理论(E-mail:maqingan@163.com);

李群湛(1957-),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,研究方向为牵引供电理论、电能质量与控制等(E-mail:lqz3431@263.net);

解绍锋(1976-),男,河北石家庄人,副教授,博士,研究方向为电能质量、牵引供电系统(E-mail:sfxie@swjtu.cn);

徐英雷(1973-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为电工理论新技术、永磁电机的设计与控制(E-mail:xuyinglei@home.swjtu.edu.cn)。

## Design of PR regulator for co-phase AT-feeding traction power system

MA Qing'an,LI Qunzhan,XIE Shaofeng,XU Yinglei

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

**Abstract:** A co-phase power supply scheme based on PR (Proportional-Resonant) regulator is proposed for AT-feeding traction power supply system, which adopts Scott transformer to reduce the capacities of transformer and back-to-back H-type converters and utilizes adaptive EPLL (Enhanced Phase Locked Loop) to enhance its response. The control system of H-type converters is designed based on PR regulator, which fully considers the time delay of converters caused by the switching frequency. The parameters of PR regulator are tuned based on Naslin polynomial technique. The simulative results show that, the reactive and negative currents are compensated as required and the capability against load disturbance is enhanced. Because of its insufficient capability in harmonic compensation, the proposed scheme is suitable for the traction power supply systems with AC/DC/AC electric vehicles.

**Key words:** AT-feeding traction power system; co-phase power supply; PR regulator; compensation; power quality