

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.020

# 一种简化型三电平高速铁路功率调节器

马伏军, 罗 安, 熊桥坡, 孙运宾, 邓才波

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

**摘要:** 为了治理电力系统负序、无功和谐波电流等电能质量问题, 研究了一种简化型三电平铁路功率调节器, 它由 1 个两相三线制逆变器、2 个输出电感和 2 个单相降压变压器组成。与三相有源电能质量补偿器相比, 该调节器只需要一对三电平开关臂, 减少了器件数量、降低了装置成本。通过分析两相三线制逆变器的开关控制原理, 提出了一种电压外环比例-积分控制和电流内环无差拍控制的双环控制方法。为了实现直流侧动态均压, 研究了一种低成本、可靠性高的均压电路, 并提出了一种基于电流闭环的均压控制方法。最后, 仿真和实验结果验证了所提出补偿结构及方法的正确性。

**关键词:** 高速铁路; 两相三线逆变器; 负序补偿; 均压电路; 电能质量

## 0 引言

由于铁路牵引网的单相供电方式会给供电网引入大量的负序电流和谐波电流<sup>[1-3]</sup>, 将直接威胁供电网的安全运行。随着高速铁路的大规模建设和电力机车发车密度的增大, 由此给电网带来的电能质量问题会越来越突出。

针对电气化铁路的负序、谐波电流等电能质量问题, 国内外学者已进行了一定的研究。文献[4-5]将静止无功补偿器(SVC)安装在牵引变压器的两供电臂进行系统的无功和负序电流补偿, 但是其动态补偿能力有限且会产生谐波。采取混合型有源滤波器能够实现对电气化铁路的无功和谐波电流补偿<sup>[6-7]</sup>, 但不能有效补偿负序电流。为此, 一些高压大容量的静止同步补偿器(STATCOM)装置<sup>[8-9]</sup>被安装在牵引系统的三相高压侧进行负序和谐波电流的综合补偿, 但其容量大、成本高。针对铁路供电系统的两相供电特性, 日本学者提出了铁路功率调节器(RPC)<sup>[10-13]</sup>, 包括背靠背式两电平 H 桥逆变器和一个共用的直流电容, 直流电容给两逆变器提供稳定直流电压。两逆变器通过输出电抗和降压变压器连接到牵引变压器的两牵引供电臂。RPC 的两逆变器通过采用合理的控制方法, 能够实现两供电臂间功率的双向流动, 并且能进行无功补偿和谐波抑制。文献[14]提出一种三相有源电能质量补偿器(APQC), 采用 Scott 变压器将两单相电压变换为三

相平衡电压, 再将一个普通三相逆变器通过输出电感与三相平衡电压连接, 通过对三相逆变器的控制, 实现有功转移、无功和谐波电流补偿。与 RPC 相比, 利用三相逆变器取代两单相逆变器, 减少了一个开关臂。

本文综合 RPC 与 APQC 的优点, 提出一种简化型三电平铁路功率调节器(STRPC)。该系统保留了 APQC 中逆变器开关器件少的优势, 采用一个两相三线制三电平逆变器, 与 RPC 和 APQC 相比, 结构上更为精简。同时, 采用一种直流侧电容的均压电路<sup>[15-16]</sup>, 来维持两电容电压的平衡。本文提出了该逆变器的电流无差拍控制方法, 并构建了系统的电压和电流双环控制框图, 最后通过仿真和实验证明了本文提出的拓扑结构和控制方法的正确性。

## 1 新型 STRPC 的结构分析

为了改善高速铁路的电能质量水平, 保证牵引网的高效、可靠运行, 本文研究了一种基于两相三线制逆变器的新型 RPC, 如图 1 所示。由于三相 V/V 牵引变压器具有结构简单、容量利用率高等优点, 被国内高速铁路供电系统广泛采用, 故本文的补偿对象选择 V/V 牵引供电系统。定义图 1 中 V/V 变压器副边右端为  $\alpha$  相供电臂, 另一边为  $\beta$  相供电臂。

图 1 中, 简化型功率调节器通过 2 个单相变压器的原边分别与两供电臂连接, 且调节器的直流侧电容中点通过降压变压器与原边铁轨的接地相耦合。为了实现直流侧电容的均压并减少逆变器控制上的复杂性, 本文采用了一种直流侧均压电路, 由 2 个容量很小的功率开关管和 1 个平衡电感组成。

因此,这种结构与 APQC 比较,在完成相同功能的前提下,其只需要一对功率开关臂,减少了硬件电路,而且能有效保证直流侧电容电压的均衡与稳定,降低了成本。

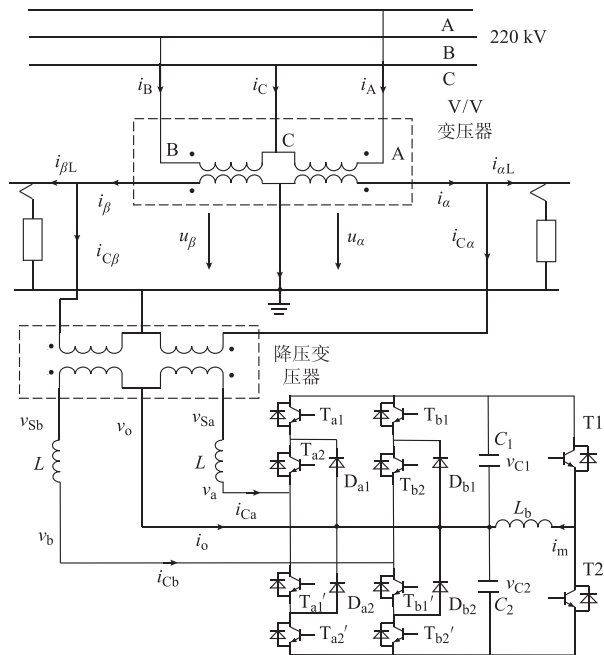


图 1 新型 STRPC 补偿系统  
Fig. 1 Compensation system of STRPC

两相三线制三电平逆变器见图 1。功率开关管所承受的电压为直流母线电压的一半。根据三电平逆变器的开关控制原理,在每个开关臂中,有 3 个有效的开关状态,并可以在交流侧产生 3 种电压<sup>[17-19]</sup>。3 种开关功能对应的各桥臂输出状态为:

$$g_x = \begin{cases} 1 & \text{如果 } T_{x1} \text{ 和 } T_{x2} \text{ 闭合} \\ 0 & \text{如果 } T_{x1}' \text{ 和 } T_{x2} \text{ 闭合} \\ -1 & \text{如果 } T_{x1}' \text{ 和 } T_{x2}' \text{ 闭合} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$  为  $a$  或  $b$ 。

如果假设直流侧两电容电压是相等的,则交流端输出电压如下:

$$\begin{cases} v_{ao} = v_a - v_o = g_a \frac{u_{dc}}{2} \\ v_{bo} = v_b - v_o = g_b \frac{u_{dc}}{2} \\ v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} = (g_a - g_b) \frac{u_{dc}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $v_a, v_b, v_o$  为三电平逆变器的交流端输出电压; $u_{dc}$  为直流电压。

由于 2 个开关臂的控制相互独立,不会相互影响各自开关臂的输出电压,故该三电平逆变器共有 9 种状态输出。根据图 1 的拓扑结构,有如下电压和电流关系:

$$\begin{cases} L \frac{di_{Ca}}{dt} = v_{Sa} - v_o - v_{ao} = v_{Sao} - v_{ao} \\ L \frac{di_{Cb}}{dt} = v_{Sb} - v_o - v_{bo} = v_{Sbo} - v_{bo} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_{Sa}$  和  $v_{Sb}$  分别为交流电源电压。

## 2 参考信号检测及补偿原理分析

为了治理高速 V/V 牵引系统的负序和谐波电流等电能质量问题,必须首先求取补偿系统的负序与谐波电流参考信号。根据文献[20]所述的 V/V 牵引系统下的 RPC 补偿器的参考信号检测方法,可以求得补偿器的参考指令信号为:

$$\begin{cases} i_{Ca} = i_{ae} - i_{aL} \\ i_{Cb} = i_{be} - i_{bL} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{aL}$  和  $i_{bL}$  为两供电臂的负载电流; $i_{ae}$  和  $i_{be}$  为补偿后期望的两供电臂稳态电流; $i_{Ca}$  和  $i_{Cb}$  分别为给定的基波与谐波电流。

通过采用合适的控制方法来控制新型 STRPC 的两相输出电流,使其完全跟踪  $i_{Ca}$  和  $i_{Cb}$ ,就可以实现负序、无功与谐波电流的完全补偿和控制。为深入分析 STRPC 的有功转移、无功和谐波电流补偿原理,建立 STRPC 的单边供电臂等效模型,如图 2 所示。将机车负载等效成阻抗  $Z_d$  和谐波电流源  $i_{dn}$ 。由于电网阻抗较小,此处忽略其影响。设牵引供电臂的  $n$  次电压为  $u_{Sn}$ ,为了补偿  $n$  次电流,逆变器交流侧的输出电压为  $u_{Nn}$ ,流入逆变器的电流为  $i_{Cn}$ 。

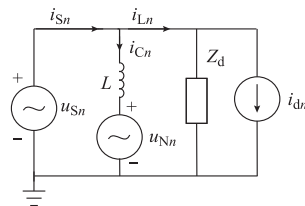


图 2 单边供电臂的等效电路  
Fig. 2 Single-phase equivalent model of power supply arm

假设  $u_{Sn} = U_{Sn} \sin n\omega t$ ,  $u_{Nn} = U_{Nn} \sin(n\omega t - \theta_n)$ , 其中, $\theta_n$  为  $u_{Sn}$  和  $u_{Nn}$  的相角差, $\omega$  为基波角频率。根据  $L di_{Cn}/dt = u_{Sn} - u_{Nn}$ ,可以推得:

$$i_{Cn} = \frac{1}{n\omega L} (U_{Nn} \cos(n\omega t - \theta_n) - U_{Sn} \cos n\omega t) \quad (5)$$

则逆变器吸收的基波有功和无功功率分别为:

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_{S1} (\sin \omega t) i_{C1} dt = \frac{U_{S1} U_{N1} \sin \theta_1}{2\omega L} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_1 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_{S1} (\cos \omega t) i_{C1} dt = \frac{U_{S1} U_{N1} \cos \theta_1 - U_{S1}^2}{2\omega L} \quad (7)$$

式中:  $T_1$  为基波周期。

由式(6)可知, 当  $0^\circ < \theta_1 < 180^\circ$  时, 有  $\bar{P}_1 > 0$ , 表示能量由逆变器的交流侧向直流侧电容传送; 当  $-180^\circ < \theta_1 < 0^\circ$  时, 有  $\bar{P}_1 < 0$ , 表示能量由逆变器的直流侧向交流侧电网传送。同时根据式(7)可知, 通过合理控制逆变器的输出电压, 可以控制逆变器向电网发出或吸收对应的无功功率。

关于谐波电流补偿, 由于牵引供电网的谐波电压畸变率一般很小, 忽略电网谐波电压, 根据式(5)则可以计算出逆变器补偿的谐波电流为:

$$i_{Cn} = \frac{U_{Nn} \cos(n\omega t - \theta_n)}{n\omega L} \quad (8)$$

可知, 通过采用合理闭环控制方法将逆变器在谐波域控制成一个受控电流源, 跟踪补偿负载谐波电流  $i_{dn}$ , 则装置可以实现负载谐波电流的补偿。

### 3 STRPC 的控制方法

针对该 STRPC, 为了实现系统有功转移、无功和谐波电流的补偿, 并维持系统的安全可靠运行, 本文提出了电压和电流的双环控制方法, 电网外环采用比例-积分 (PI) 调节来稳定电压, 电流内环采用基于开关模型的无差拍控制方法来实现电流的快速跟踪。最后通过采用三电平正弦脉宽调制 (SPWM) 方法驱动开关管以获得期望的电压和电流信号。由于直流侧是由 2 个电容串联在一起构成, 如果开关管控制不合理或者没有配合好, 则两直流侧电压不相等, 这样会引起输出电流的畸变, 甚至更大的电压不平衡, 将会影响装置的补偿效果和安全可靠运行。这里采用了一种直流侧均压电路, 并提出了一种动态均压控制方法。

#### 3.1 电压和电流双环控制

为了维持直流侧电压的稳定并弥补功率开关管的损失, 采用一个 PI 调节器来实现直流侧电压的稳定控制:

$$I_{out} = k_{PI} \Delta u_{dc} + k_{II} \int \Delta u_{dc} dt \quad (9)$$

式中:  $k_{PI}$  和  $k_{II}$  分别为比例和积分系数;  $I_{out}$  为电压调节器输出电流的幅值。

如果开关管功率损失由各自的开关臂共同承担, 则将  $I_{out}$  分别乘以各自的同步信号, 可以得到两开关臂的调压指令信号:

$$\begin{cases} i_{da} = I_{out} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ i_{db} = I_{out} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

假设降压变压器的变比为  $K_s$ 。根据式(4), 则可以推得新型 STRPC 两开关臂的负序、谐波电流指令信号:

$$\begin{cases} i_{Ca}^* = K_s i_{Ca} \\ i_{Cb}^* = K_s i_{Cb} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11), 则可以求得电流内环总的参考信号为:

$$\begin{cases} i_{ar} = i_{Ca}^* + i_{da} \\ i_{br} = i_{Cb}^* + i_{db} \end{cases} \quad (12)$$

为了实现内环电流的快速无差跟踪, 本文推导一种无差拍的电流控制方法, 具有能够快速、准确跟踪指令信号的能力。根据式(2)和式(3)所述逆变器的电压和电流关系, 可以得到如下的无差拍公式:

$$\begin{cases} v_{ao} = d_a \frac{u_{dc}}{2} = v_{Sao} - L \frac{di_{Ca}}{dt} = v_{Sao} - L \frac{i_{ar} - i_{Ca}}{T} \\ v_{bo} = d_b \frac{u_{dc}}{2} = v_{Sbo} - L \frac{di_{Cb}}{dt} = v_{Sbo} - L \frac{i_{br} - i_{Cb}}{T} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $d_a$  和  $d_b$  为两开关臂的占空比信号;  $T$  为控制周期。

由式(13)可以推导出  $d_a$  和  $d_b$  的表达式如下:

$$\begin{cases} d_a = \left( v_{Sao} - L \frac{i_{ar} - i_{Ca}}{T} \right) \frac{2}{u_{dc}} & -1 < d_a < 1 \\ d_b = \left( v_{Sbo} - L \frac{i_{br} - i_{Cb}}{T} \right) \frac{2}{u_{dc}} & -1 < d_b < 1 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(14), 通过采用三电平 SPWM 方法, 驱动三电平开关管可获得期望的电压和电流信号。STRPC 双环控制框图如图 3 所示。图中,  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  分别为开关管  $T_{a1}$  和  $T_{a2}$  的脉宽调制驱动信号, 其他以此类推。

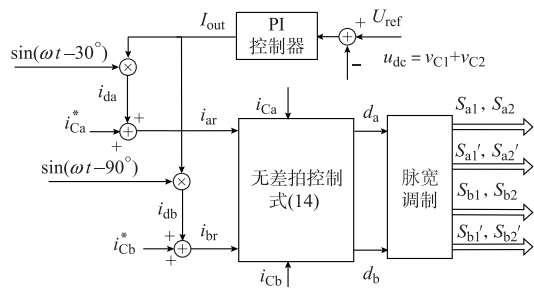


图 3 STRPC 的电压和电流双环控制框图  
Fig. 3 Voltage and current dual-loop control diagram of STRPC

#### 3.2 直流侧电路的均压控制方法

为了维持两电容电压的动态平衡, 保证补偿系统的正常稳定运行, 本文采用了一种均压电路, 由小容量的开关管  $T1$ ,  $T2$  和储能电感  $L_b$  构成。通过采用基于电流闭环的控制方法来调节开关管  $T1$  和  $T2$  的导通实现直流侧电压平衡。均压控制方法如图 4 所示。

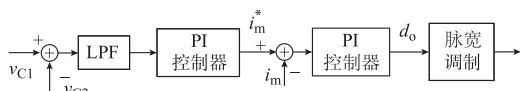


图4 基于电流闭环的均压控制方法  
Fig. 4 Voltage-balance control method based on current closed-loop control

首先检测两直流侧电容电压差,通过一个低通滤波器(LPF)滤除交流成分,得到电容电压差的直流成分。然后通过PI控制器调节输出一个值,即为调节电容电压差的期望电流信号 $i_m^*$ ,之后与反馈的直流电流信号 $i_m$ 作差,进行PI调节后输出占空比信号 $d_o$ 。最后利用高频脉宽调制得到T1和T2的开关驱动信号。当 $v_{C1} > v_{C2}$ 时, $d_o > 0.5$ ,使T1导通时间长,将电容 $C_1$ 的能量释放到电感,之后转移到 $C_2$ ,反之亦然。稳态平衡时,有 $d_o = 0.5$ 。通过电流的闭环控制,直流电流 $i_m$ 不会突变,且电压稳定后,直流电流 $i_m$ 很小,一般只有几安,所以均压电路的开关管和平衡电感的容量非常小。这样,通过小容量、低成本的均压控制电路,可实现直流侧电压的稳态平衡,提高了逆变器补偿性能和系统可靠性。

## 4 仿真和实验验证

### 4.1 仿真验证

为了证明本文所提出的STRPC的拓扑结构和控制方法的正确性,利用PSIM6软件搭建如图1所示的220 kV系统电路图,进行仿真验证。

假设 $\beta$ 相供电臂机车负载功率为9.6 MW, $\alpha$ 相供电臂机车负载功率为0。高速机车负载采用脉宽调制整流控制方式,功率因数接近1,电流畸变率约为13.6%。本文采用电阻和谐波电流源模拟电力机车。V/V牵引变压器的变比为220 kV:27.5 kV,降压变压器的变比为27.5 kV:1 kV,逆变器交流侧电感值为0.5 mH,两直流侧电容为50 mF,均压平衡电感为5 mH,系统的控制频率为15 kHz。

补偿前后系统的电流和电压变化波形如图5所示。从图5中可以看到,在投入STRPC以前,即0.2 s前,只有 $\beta$ 相供电臂有电流, $\alpha$ 相供电臂电流为0,高压电网侧只有B、C相有电流且互为反相,如图5(a)中0.1~0.2 s所示。此时三相电流的不平衡度约为100%,含有大量的负序电流。在0.2 s时投入STRPC, $\alpha$ 相供电臂通过STRPC转移一定的有功功率到 $\beta$ 相供电臂,并根据指令信号在相应供电臂补偿指定量无功和谐波电流来补偿负序电流并抑制谐波电流。根据无差拍控制方法,功率调节器能快速响应和跟踪指令信号,输出相应的基波和谐波电流,实现两牵引臂的有功转移、无功和谐波电流

的补偿,补偿后原边三相电流几乎完全对称,如图5(a)中0.2 s后所示。三相电流不平衡度由原来的100%下降为4.3%。由于死区时间、检测精度和开关频率的影响和限制,电流闭环控制不可能实现完全跟踪和完全补偿。STRPC投入前后的两相输出电流如图5(b)所示。图5(c)为直流侧两电容电压的动态变化波形。在STRPC投入前,两电容电压不相等,通过采用电流闭环的均压控制方法,电压差迅速减小至0。在STRPC投入后,两电容电压稳持稳定在2.5 kV左右,实现了直流侧电压的稳态平衡。

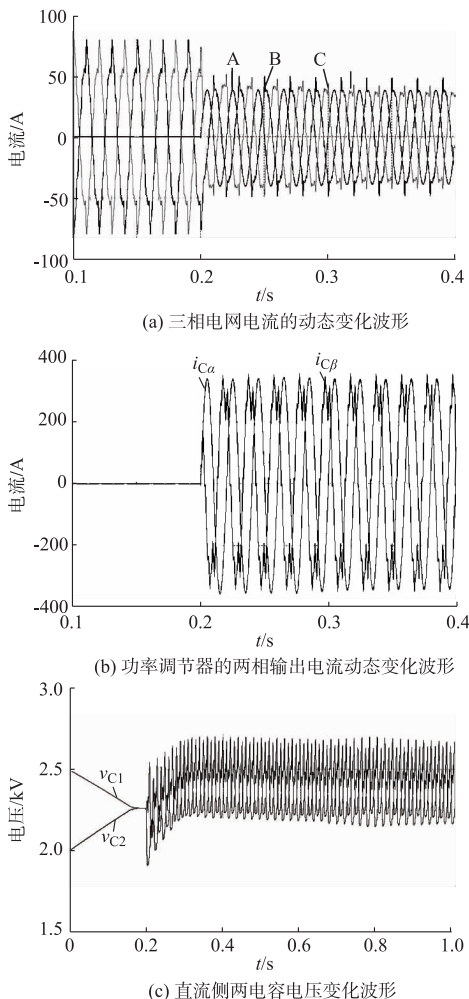
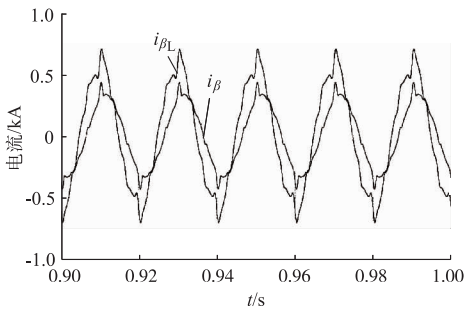


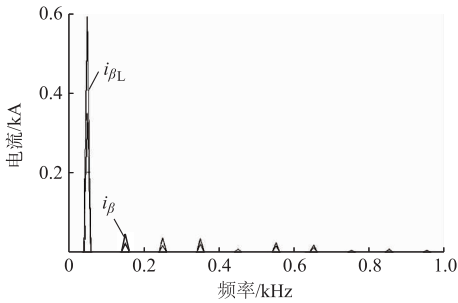
图5 补偿前后系统的电流和电压变化波形  
Fig. 5 Voltage and current waveforms with and without compensation

$\beta$ 相供电臂的电网电流和负载电流的对比如图6所示。可以看出,补偿前负载电流畸变严重,谐波含量大。通过STRPC的补偿,谐波电流明显减少,从频谱图可以看到补偿后电网电流谐波含量低于负载电流谐波含量,牵引臂电流畸变率从补偿前的13.6%下降到5.8%,补偿效果明显。





(a)  $\beta$ 相供电臂的电网电流和负载电流波形



(b)  $\beta$ 相供电臂的电网电流和负载电流频谱图

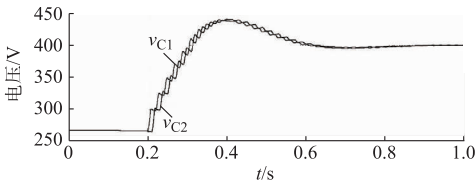
图 6  $\beta$ 相供电臂的电网电流和负载电流的对比  
Fig. 6 Comparison between source and load currents  
of  $\beta$ -phase power supply arm

4.2 低压实验平台验证

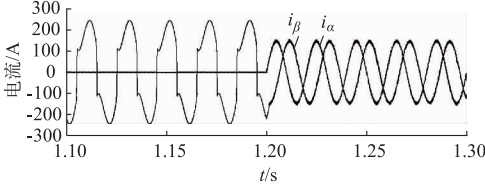
为了进一步验证所提出补偿系统的有效性,搭建了 380 V 电压等级的高速铁路功率补偿模拟实验平台。采用 2 台容量均为 100 kVA 的单相降压变压器连接的方式模拟 V/V 牵引变压器。研制了一台容量为 40 kVA 的模拟实验机车,用不可控整流负载代替高速铁路机车负载,功率因数接近 1。假设只有  $\beta$  相供电臂有负载,其他实验参数如下:V/V 牵引变压器的变比为 380 V : 220 V,降压变压器的变比为 220 V : 220 V,逆变器交流侧电感及其电流为 0.5 mH/200 A,两直流侧电容及其电压为 20 mF/400 V,均压平衡电感及其电流为 5 mH/10 A,系统的控制频率为 15 kHz。本文首先利用软件搭建仿真模型进行验证,仿真波形如图 7 所示。

仿真首先通过三相不可控整流器将功率调节器直流侧充电到 534 V,然后在 0.2 s 时利用功率调节器的  $\alpha$  相开关臂进行脉宽调制整流充电到 800 V,如图 7(a)所示。直流侧电压稳定后,在 1.2 s 时联合 2 个逆变器并网,进行一个开关臂的整流稳压,另一个开关臂的逆变输能,并补偿相应的无功和谐波电流,从而实现系统的负序和谐波电流补偿,如图 7(b)和图 7(c)所示。装置投入前后直流侧电压变化波形如图 7(d)所示,稳态时两电容电压稳定在 400 V 左右。可以看到,装置补偿后,三相电流几乎平衡,系统的不平衡度和  $\beta$  相供电臂电网电流畸变

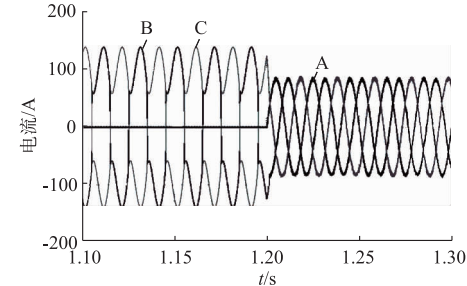
率分别从 100%和 13.2%下降到 3.8%和 4.4%。



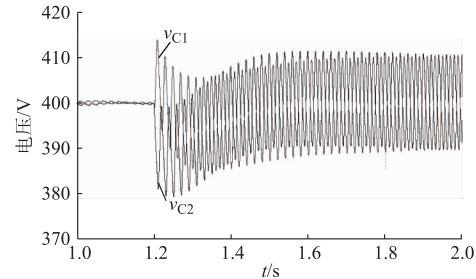
(a) 直流侧电容充电过程



(b) 补偿前后两牵引臂电流和调节器输出电流动态变化波形



(c) 补偿前后三相电网电流动态变化波形



(d) 补偿前后直流侧电压动态变化波形

图 7 仿真结果  
Fig. 7 Simulation results

实验平台控制系统采用 TI2812 数字信号处理器(DSP)作为核心处理器,控制周期为 15 kHz,检测和控制算法在 DSP 中数字实现。现场采集的实验数据波形如图 8 所示。

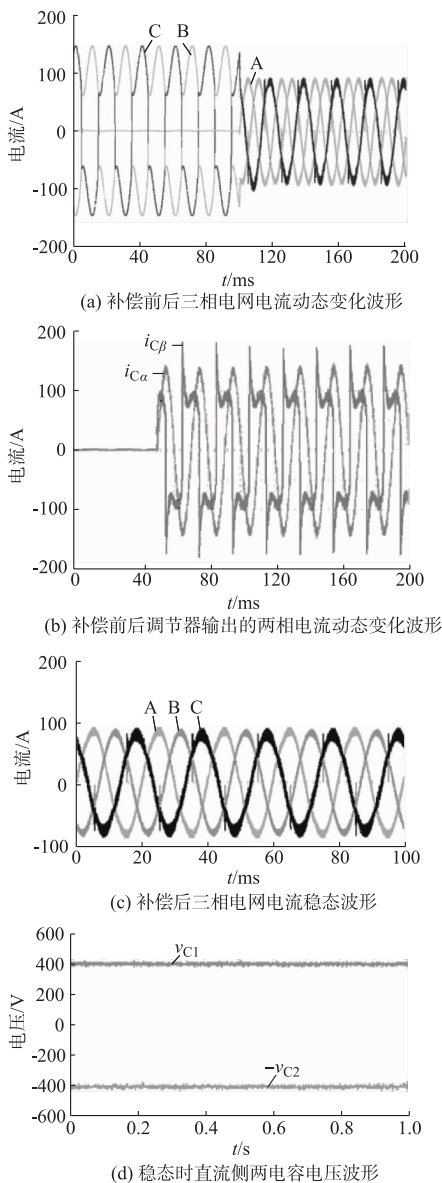


图 8 实验结果  
Fig. 8 Experimental results

从图 8(a)可以看出,补偿前由于只有  $\beta$  相供电臂有负载,三相电流中 A 相电流为 0,三相电流严重不对称,负序电流含量很大。在投入 STRPC 之后,调节器能迅速跟踪期望的有功、无功和谐波电流参考信号,并可实现对负序和谐波电流的快速补偿,如图 8(a)和图 8(b) 所示。从图 8(c)可以看出,补偿稳定后,三相电流波形基本对称,负序和谐波电流含量明显减少,两直流电容电压稳定在 400 V 左右,如图 8(d)所示。三相电流的不平衡度和  $\beta$  相供电臂电网电流畸变率分别从 100% 和 12.6% 下降到 7.3% 和 5.8%。可以看出,补偿装置具有较好的动态补偿效果。

通过仿真和实验验证可知,本文所提出的补偿

结构及其方法能有效抑制高速铁路供电系统三相电流中的负序和谐波电流。

## 5 结语

本文研究了一种基于两相三线制三电平逆变器的 STRPC。与 APQC 相比,减少了功率开关器件的数量和硬件复杂度,降低了系统成本。在分析逆变器开关模型的基础上,本文推导了一种电流内环的差拍控制方法,可以实现电流的快速无差跟踪。为了实现直流侧电容均压,本文研究了一种小容量低成本均压电路,提出了一种基于电流闭环的控制方法,实现了直流侧动态均压,提高了补偿系统的稳定性能。由于功率调节器的主电路参数设计涉及装置的成本高低和补偿性能好坏,有必要进一步研究主电路参数的多目标优化问题,使系统成本和性能优化。

## 参考文献

- [1] 郭知彼. 电气化铁路电能质量的综合治理[J]. 变流技术与电力牵引, 2006, 12(2): 71-80.  
GUO Zhibi. Comprehensive control for power quality in electrified railway[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2006, 12(2): 71-80.
- [2] 万庆祝, 朱桂萍, 陈建业, 等. 平衡单相牵引负荷补偿容量优化设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 63-67.  
WAN Qingzhu, ZHU Guiping, CHEN Jianye, et al. Optimum design of compensation capacity for balancing the single-phase traction load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 63-67.
- [3] 孙卓, 朱东起, 姜新建. 牵引变电所新型电能质量调节器的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 41-44.  
SUN Zhuo, ZHU Dongqi, JIANG Xinjian. A new traction substation power quality compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 41-44.
- [4] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 牵引变电所电能质量混合动态治理技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 48-55.  
ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Hybrid dynamic power quality compensation technology for traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 48-55.
- [5] 赵伟, 罗安, 曹一家, 等. 三相-两相牵引变电所用无功动态补偿与谐波治理混合系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 107-114.  
ZHAO Wei, LUO An, CAO Yijia, et al. Hybrid var and harmonic dynamic compensator and application to three-two phase traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 107-114.
- [6] 邓礼宽, 姜新建, 朱东起, 等. APF 和 SVC 联合运行的稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 29-32.  
DENG Likuan, JIANG Xinjian, ZHU Dongqi, et al. Stability control of a combined system of APF and SVC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 29-32.
- [7] 赵允斌, 陈乔夫, 张长征, 等. 适用于高压大容量工况的新型并联有源滤波器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 61-65.

- ZHAO Youbin, CHEN Qiaofu, ZHANG Changzheng, et al. A novel parallel active power filter for high voltage and large capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 61-65.
- [8] 朱永强, 刘文华, 宋强. D-STATCOM 不平衡负荷补偿电流的优化设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 65-70.
- ZHU Yongqiang, LIU Wenhua, SONG Qiang. Optimal design of compensation currents for D-STATCOM used for unbalanced load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 65-70.
- [9] ZHU Guiping, CHEN Jianye, LIU Xiaoyu. Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC [C]// Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, June 3-5, 2008, Singapore: 1958-1963.
- [10] MOCHINAGA Y, HISAMIZU Y, TAKEDA M, et al. Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway [C]// Proceedings of Power Conversion Conference, April 19-21, 1993, Yokohama, Japan: 641-646.
- [11] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K. A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway [C]// Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, German: 1869-1873.
- [12] MORIMOTO H, ANDO M, MOCHINAGA Y, et al. Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen [C]// Proceedings of the Power Conversion Conference, April 2-5, 2002, Osaka, Japan: 1108-1111.
- [13] 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 Trans on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.
- [14] SUN Zhuo, JIANG Xinjian, ZHU Dongqi, et al. A novel active power quality compensator topology for electrified railway[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(4): 1036-1042.
- [15] TANAKA T, ISHIBASHI K, ISHIKURA N, et al. A half-bridge inverter based active power quality compensator for electrified railways [C]// Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, December 5-8, 2010, Singapore: 1590-1595.
- [16] KAKIGANO H, MIURA Y, LSE T, et al. DC voltage control of the DC micro-grid for super high quality distribution [C]// Proceedings of Power Conversion Conference, April 2-5, 2007, Nagoya, Japan: 518-525.
- [17] 姚文熙, 吕征宇, 费万民. 基于 PWM 分解的三电平逆变器 SVPWM 的 DSP 实现方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 50-53.
- YAO Wenxi, LÜ Zhengyu, FEI Wanmin. Three-level SVPWM method based on two-level PWM cell in DSP [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 50-53.
- [18] 王翀, 邢岩, 方宇, 等. 理想电网条件下可再生能源发电三电平并网逆变器[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 58-62.
- WANG Chong, XING Yan, FANG Yu, et al. Three-level grid connected inverter for renewable generation in ideal power grid condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 58-62.
- [19] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 三电平 LLC 谐振型 DC/DC 变换器的分析和设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 67-71.
- GU Yilei, LÜ Zhengyu, QIAN Zhaoming. Analysis and design of a three level LLC resonant DC/DC converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 67-71.
- [20] 马伏军, 罗安, 吴传平, 等. 基于板桥结构的新型高速铁路功率调节器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 1-8.
- MA Fujun, LUO An, WU Chuanping, et al. A novel power conditioner based on half-bridge for high-speed electrified railway system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 1-8.

马伏军(1985—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电气化铁路电能质量、电力电子技术及其控制。E-mail: mafujun2004@163.com

罗安(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电气化铁路电能质量、特高压电源、控制理论和电力有源滤波技术。E-mail: an\_luo@hnu.cn

熊桥坡(1988—),男,博士研究生,主要研究方向:配电网电能质量补偿技术、电力电子技术及其控制。E-mail: 403864117@qq.com

## A Simplified Three-level Power Conditioner for High-speed Railway System

MA Fujun, LUO An, XIONG Qiaopo, SUN Yunbin, DENG Caibo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to manage the power quality of railway, a simplified three-level railway power regulator is presented. The regulator consists of two-phase three-wire converter, two step-down transformers and two output inductors. Compared with active power quality compensator (APQC), this regulator only needs a pair of three-level switch arms, which reduces the switch number and the system cost. Base on the switch control mode analysis, a voltage and current dual-loop control is established. It is composed of an outer loop proportional-integral control and an inner loop deadbeat control. To achieve dynamic balance of the DC-link voltage, a voltage-balanced circuit and its control method are researched. Simulation and experimental results verify the correctness of the proposed structure and the control method.

This work is supported by National Key Project of Science and Technology.

**Key words:** high-speed railway; two-phase three-wire converter; negative sequence compensation; voltage-balanced circuit; power quality