基于模块化多电平换流器的牵引供电系统电能质量治理方法

荆 龙¹,唐 芬¹,王之赫¹,李金科¹,吴学智¹,王卫安²

(1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心,北京市 100044;

2. 南车株洲电力机车研究所有限公司,湖南省株洲市 412001)

摘要:针对铁路牵引供电系统高压大功率的特点,基于模块化多电平换流器(MMC)设计了两相三桥臂功率调节装置,以消除铁路牵引供电系统中负序、无功功率及谐波电流。分析了机车负载电流 在旋转坐标系下的特点,使用了一种基于二阶广义积分器及直流积分器的信号提取方法,可以快速 地得到功率平衡及无功功率、谐波消除的补偿信号。设计了静止坐标系下基于 MMC 的两相三桥 臂铁路静止功率调节装置的控制系统,最终,通过实时数字仿真系统(RT-Lab)进行实时仿真及样 机实验,验证了算法的有效性及系统的补偿性能。

关键词: 电能质量; 电气化铁路; 牵引供电; 模块化多电平换流器; 两相三桥臂; 功率平衡; 谐波 抑制; 实时数字仿真系统

0 引言

目前中国电气化铁路建设不断加快,铁路用电量不断增长。由于其特殊的供电方式以及不同电力 机车的复杂运行工况,铁路牵引系统成为电力系统 中一个特殊的负荷。由铁路牵引供电系统产生的负 序、谐波电流和无功功率对电网造成了严重的影 响^[1-3]。现阶段应用于铁路牵引系统的变压器,主要 是 V/v 变压器以及 Scott 变压器^[4-5]。以 Scott 变压 器为例,当二次侧两相负荷电流相等且功率因数都 为1时,一次侧三相电流平衡且功率因数为 1^[4]。 但实际中各座的负载往往是不平衡的,且含有大量 无功功率及谐波,以交直型机车为例,其为典型的单 相整流负载,其有功和无功功率都会随工况的不同 而变化,且会向系统中注入大量 3,5,7,9,11 次等奇 数次谐波。这便造成了一次侧电能质量的问题。

针对负序、无功功率及谐波等问题,国内外学者 提出了很多解决办法。如有源滤波器(APF)、静止 无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM) 等。日本学者于 1993 年提出铁路静止功率调节器 (RPC)的概念^[6],利用 2 个单相背靠背的变流器共 用直流母线,2 个变流器的交流侧分别连接在 2 个 供电臂,实现功率在 M 座和 T 座之间双向流动,达 到功率平衡、无功功率补偿及谐波控制的目的。但 是 RPC 使用传统两电平电压源型变换器(VSC),需 要降压变压器,成本高、重量大;并且在铁路牵引高 压大功率应用时,开关损耗、高次谐波问题严重。

文献[7]提出一种三桥臂有源补偿系统——有 源电能补偿器(APQC),这里简称两相三桥臂拓扑。 3个桥臂输出通过电感分别与变压器 T 座、M 座以 及 N 线(铁轨)相连,比传统 RPC 节省了一个桥臂 的功率模块,但仍属于两电平的拓扑结构,而且在控 制方法上,两相补偿指令分别计算,较复杂;使用低 通滤波器,影响补偿精度;对输出电流的调节使用滞 环比较,开关频率不固定。

在系统控制方面,为了消除负序、抑制谐波电流,文献[8-15]给出了几种控制方式。基本思路都 是对于不平衡负载电流的分离、计算,例如瞬时无功 提取法,得到每相负载有功功率和无功功率,再通过 计算得到各座功率平衡及谐波消除的电流指令。而 这类方法在电流指令提取方面,虽然准确但速度相 对较慢。为了保证补偿信号的实时性及准确性,也 有学者采用了模糊递推、重复预测、遗传因子的递 推、最小二乘法等控制算法,应用在控制器的设计 中^[6,8],这些控制方式在指令的准确性上有了提高, 但在控制程序的编写中相对复杂,增加了工作量。

随着电力电子技术的发展,多电平变换器在铁路牵引电能质量治理方面逐渐成为一种趋势^[16-17]。 德国学者 Marquardt R.提出了级联结构的模块化 多电平换流器(MMC)的拓扑,MMC 具备多电平变

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-10-14。

国家国际科技合作专项资助项目(2013DFA60930);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010JBZ002)。

换器的高度模块化的结构特点,同时具有公共直流 母线,可以直接应用于背靠背的中高压大功率能量 变换场合^[18]。

本文以 Scott 变压器的牵引供电系统为例,设 计了基于 MMC 的两相三桥臂 RPC(MRPC),通过 分析牵引供电系统在两相旋转坐标系下的模型,得 到了旋转坐标下 RPC 的控制目标。利用二阶广义 积分器(SOGI)和直流积分器,将功率平衡、无功功 率补偿及谐波消除的指令同时提取出来,再通过静 止坐标系下的比例谐振(PR)调节器,控制 MMC 输 出电流,达到提高牵引供电系统电能质量的控制目 标。该方法对于功率及谐波的处理更简便,相比于 瞬时无功理论计算速度更快,相比于预测控制等方 式更为实用。最后,通过实时数字仿真系统(RT-Lab)进行实时仿真及样机的实验,验证了 MRPC 的 作用及控制算法的有效性。

1 三桥臂 MRPC

1.1 RPC 补偿原理分析

建立 Scoot 牵引供电系统的数学模型, M 座、 T 座电压可表示为:

$$\begin{cases} u_{\rm M} = U\sin(\omega t) \\ u_{\rm T} = U\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$
(1)

式中:U为供电系统电压幅值; ω为频率。

由于 T 座、M 座电压互差 90°,幅值相等,为正 交系统,故将 Scott 变压器的二次侧看做整个系统 在两相静止坐标系下的反映,以 M 座、T 座合成的 电压矢量为旋转坐标轴,定义旋转坐标系,分析整个 系统的情况。如图 1 所示,将两相负载电流折算到 旋转坐标系下分析。



图 1 不平衡负载在旋转坐标系下的矢量图 Fig.1 Vector graph of unbalance load in synchronous reference frame

设两座电流分别为:

$$\begin{cases}
i_{M} = I_{1} \sin(\omega t - \theta_{1}) \\
i_{T} = I_{2} \sin(\omega t - \theta_{2} - \frac{\pi}{2})
\end{cases}$$
(2)

式中: I_1 , I_2 分别为 M 座、T 座负载电流幅值; θ_1 , θ_2 分别为 M 座、T 座负载功率因数角。则

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix}$$
(3)

式中: i_d , i_q 分别为系统电流在旋转坐标系下的 d轴、q轴分量。

整理可得: $\begin{cases}
i_{d} = -\frac{I_{1}\sin\theta_{1} + I_{2}\sin\theta_{2}}{2} + \frac{I_{1}\cos\theta_{1} - I_{2}\cos\theta_{2}}{2} \cdot \\
\sin 2\omega t - \frac{I_{1}\sin\theta_{1} + I_{2}\sin\theta_{2}}{2}\cos 2\omega t \\
i_{q} = -\frac{I_{1}\cos\theta_{1} + I_{2}\cos\theta_{2}}{2} + \frac{I_{1}\sin\theta_{1} - I_{2}\sin\theta_{2}}{2} \cdot \\
\sin 2\omega t + \frac{I_{1}\cos\theta_{1} - I_{2}\cos\theta_{2}}{2}\cos 2\omega t
\end{cases}$ (4)

旋转坐标系下,由于 d 轴与 M 座、T 座合成的 电压矢量重合, $u_d = U$, $u_q = 0$ 。系统有功和无功功 率便由式(5)确定。

$$\begin{cases} P = 1.5(u_d i_d + u_q i_q) = 1.5u_d i_d = 1.5U i_d \\ Q = 1.5(u_d i_q - u_q i_d) = 1.5u_d i_d = 1.5U i_q \end{cases}$$
(5)

由式(5)可以看出,*i*^a 代表系统有功功率大小, *i*^a 代表系统无功功率大小,本文中将其称为系统有 功电流和无功电流。由式(4)可以看出,系统的有功 电流与无功电流除了直流部分外,都含有代表两座 间有功、无功功率差值的二倍频脉动。脉动量的大 小不仅与 T 座、M 座电流的幅值大小有关,也与每 一座的负载功率因数角有关。

若想消除注入电力系统中的负序电流及无功功率,可以令式(4)中的有功、无功电流的二倍频分量都为0,同时令无功电流的直流量也为0。便可得:

$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ \theta_1 = \theta_2 = 0 \end{cases}$$
(6)

式(6)便是基于 Scott 变压器的牵引供电系统 RPC 装置的控制目标,控制 T 座、M 座电流的幅值 相等且功率因数都为 1。

1.2 MMC 的工作原理

MMC 每相分为上桥臂和下桥臂两部分,分别 由 n 个功率单元 U_{jk} (其中相数j = a,b,c;模块编号 $k=1,2,\dots,2n$)和桥臂电感 L_a 依次串联构成,2 个 桥臂电感的连接点构成对应相桥臂的输出端,功率 单元数量n 取决于实际应用系统的电压等级和选 用的功率开关器件等级。MMC 子模块是典型的两 端口单元,具有 0 和 E 两种输出电平,所有子模块 的直流电压共同支撑 MMC 的母线电压。通过合理 控制开关器件的通断状态,可以控制功率模块在电 路中的投切状态,进而控制输出电压的波形^[19]。

1.3 两相三桥臂 MRPC 系统分析

RPC 的实现方式可以有多种形式,针对电铁牵

引供电系统,RPC 可以利用半桥电路、单相背靠背 四桥臂变流器、两相三桥臂变流器来实现。本文出 于对器件的数量(成本)及控制的方便程度考虑,使 用两相三桥臂变流器作为 MRPC 的拓扑。

图 2(a)为 Scott 供电系统与两相三桥臂 MRPC 拓扑结构图。RPC 系统由 M,T,N 这 3 个桥臂组 成,N 相桥臂接到 AT 变压器的接地端。这样 3 个 桥臂组成了一个带 N 线的两相系统,可以实现两相 之间的有功功率交换,及每一相的无功功率控制。 从而利用三桥臂变流器完成对电铁牵引变低压侧两 相桥臂上负荷的平衡控制^[20-21]。图中: u_T , u_M 分别 为 Scoot 变压器输出的两相电压; i_T , i_M 分别为变 压器总负载电流; i_{TL} , i_{ML} 分别为两相负载电流; i_{TC} , i_{MC} 为 RPC 的补偿电流; Δu_T , Δu_M , Δu_N 分别为 RPC 中 3 个桥臂输出的电压; L_T , L_M , L_N 分别为 MRPC 中 3 个桥臂上的等效电感。两相三桥臂系 统可以简化为图 2(b)的形式。





忽略线路阻抗,根据上下桥臂电压差 $\Delta u_{\rm T}$, $\Delta u_{\rm M}$, $\Delta u_{\rm N}$,可得到桥臂电压差 $u_{\rm M_out}$ 和 $u_{\rm T_out}$ 的表达 式分别为:

$$\begin{cases} u_{T_{out}} = \Delta u_{T} - \Delta u_{N} \\ u_{M_{out}} = \Delta u_{M} - \Delta u_{N} \end{cases}$$
(7)
根据图 2(b)的等效电路得到:

$$\begin{cases} L_{\rm T} \frac{di_{\rm TC}}{dt} + L_{\rm N} \frac{di_{\rm NC}}{dt} + (\Delta u_{\rm T} - \Delta u_{\rm N}) - \frac{1}{2} u_{\rm T} = 0\\ L_{\rm M} \frac{di_{\rm MC}}{dt} + L_{\rm N} \frac{di_{\rm NC}}{dt} + (\Delta u_{\rm M} - \Delta u_{\rm N}) - \frac{1}{2} u_{\rm M} = 0\\ i_{\rm NC} = -(i_{\rm TC} + i_{\rm MC}) \end{cases}$$
(8)

式中:i_{NC}为N线电流。

由式(8)可知,通过控制 3 个桥臂的输出电压, 进而控制两相输出电流的大小,达到两相功率平衡 且消除无功功率和谐波成分的目的,并保持 MMC 直流侧电压恒定。

假设 MRPC 只补偿有功电流,补偿电流 *I*_{TC}, *I*_{MC}幅值应该相同,考虑 T 桥臂与 M 桥臂构成的回路,可得到相量图如图 3 所示。



图 3 MRPC 相量图 Fig.3 Vector graph of MRPC

根据图 3 及 MRPC 的工作原理,可得出直流电 压 U_{dc} 及桥臂输出电流的要求为:

$$\begin{cases} U_{dc} \geqslant \frac{\sqrt{2}}{2} U_{T_{MAX}} + \sqrt{2} L_{T} \frac{di_{TC}}{dt} \\ I_{NC_{MAX}} = \sqrt{2} I_{MC_{MAX}} = \sqrt{2} I_{TC_{MAX}} = \\ \sqrt{2} | I_{ML_{MAX}} - I_{TL_{MAX}} | \end{cases}$$
(9)

式中: U_{T_MAX} 为 T 座电压的最大值; I_{MC_MAX} , I_{TC_MAX} , I_{NC_MAX} 分别为 M, T 和 N 桥臂的最大输出 电流; I_{ML_MAX} , I_{TL_MAX} 分别为 M, T 座负载电流最 大值。

2 系统控制方案

2.1 RPC 补偿指令电流的计算

传统 RPC 控制方式是将 *i*_T 和 *i*_M 的有功和无 功功率分量分别提取出来,通过将两相有功功率分 量之差的 1/2,及每相无功功率分量消除的电流指 令作为各相的补偿信号。相当于从重载的一相上转 移有功功率差值的一半到轻载的一相上,使得变压 器二次侧每相总有功功率相等,并且分别补偿无功 电流使每相功率因数均为 1,便可消除变压器一次 侧的负序及无功功率。该方法实现起来需要分别计 算每相的有功、无功功率数值,再根据功率差计算各 相有功功率补偿指令,同时结合每相无功功率情况, 合成每一相总的补偿指令,计算步骤十分复杂。假 如想消除负载电流的谐波分量,还需要进行相应次 数的谐波提取及补偿电流的修正。

由 1.1 节的分析可知,在旋转坐标系下,负载的 正序有功功率表现为有功电流的直流分量;负载的 正序无功功率表现为无功电流的直流量;负载的负 序电流表现为有功电流及无功电流上的二次脉动。 同样经过分析也可知,机车负载产生的谐波 2n+1 (n=1,2,...)次谐波电流在同步旋转坐标系下表现 为有功电流及无功电流上的 2n(n=1,2,...)次 脉动。

而由 RPC 的工作原理可知, RPC 的加入改变 了两相间有功功率的分配,并不会改变系统总功率, 而系统无功功率、负序及谐波都会被消除。即加入 RPC 补偿后,在旋转坐标系下分析系统总的电流, 有功电流上原有的负序分量及各次脉动应当被消 除,有功电流的直流量应当保持不变;无功电流的直 流量、负序分量及各次脉动都应当被消除,即无功电 流变为 0。

由此可以得出,旋转坐标系下,RPC 输出的有 功电流指令便是负载有功电流负序分量及各次脉动 量;RPC 输出的无功电流指令便是负载的无功电 流。因此,控制上可以采用简化控制方法。以 M座、T座合成电压矢量的角度来定向,两相负载 电流作为两相静止坐标系下的电流,经过 Park 变换,得到旋转坐标系下的负载电流,为了消除有功电 流上的二倍频波动及谐波引起的波动,将有功电流 的直流量提取出来(负载正序功率),与负载电流作 差,得到负载的负序电流及谐波电流之和,作为旋转 坐标系下有功电流补偿量;由于要将无功电流控制 为零,故负载无功电流可直接作为旋转坐标系下的 补偿量。经过 Park 逆变换后,便可得到 MRPC 的 T座、M 座电流指令。

由以上分析可知,旋转坐标系下指令电流计算 的关键在于准确提取有功电流的直流分量,并进一 步计算负序分量和谐波分量。直流信号的提取通常 使用低通滤波的方法,但使用低通滤波提取效果差, 造成的相移滞后问题也比较严重。本文利用 SOGI^[22]及直流积分器构建的直流分量快速提取的 方法计算指令电流,如图4所示。



Fig.4 Block diagram of active instruction current calculation

输入电流经过 SOGI,将二倍频脉动提取出来; 再通过直流积分器,得到输入信号的直流分量;最后 与输入信号作差,得到输入信号的交流分量。由 图4推导出计算环节的传递函数为:

$$\frac{i_{\text{out}}}{i_{\text{in}}} = \frac{1+G_1}{1+G_1+G_2} = \frac{s^3 + \omega_0 k_2 s^2 + \omega_0^2 s}{s^3 + (\omega_0 k_2 + k_1) s^2 + \omega_0^2 s + \omega_0 k_1} \quad (10)$$

式中:*k*₁,*k*₂ 分别为直流积分器增益系数和 SOGI 的阻尼系数;ω。为 SOGI 的响应频率。

设定 $\omega_0 = 200 \pi \operatorname{rad/s}, k_1 = 5, k_2 = \sqrt{2}$ 得到系统的波特图如图 5 所示。



Fig.5 Bode diagram of calculation link

通过波特图可知,系统在 100 Hz 及以上处的增益为 1,对频率为 0 的直流信号增益为 0;而且对于 100 Hz 及以上的高频信号,相移也为 0°,说明使用 二阶广义积分以及直流积分的信号处理环节能够有 效地滤除信号的直流分量,且 100 Hz 及以上交流分量的幅值及相位都不受影响。由前面的分析可知, 需要补偿的负序量与谐波量分布在 100,200, 300 Hz 等频率处,故可以通过该方法准确地提取出 负序功率信号和谐波电流信号,从而实现有功指令 电流的快速计算。

2.2 MRPC 控制实现

实际控制中,以 M 座电压定向电压矢量角度。 通过两相负载电流的检测、变换得到旋转坐标系下 有功、无功电流信号。对于有功电流信号 *i*_d 分离出 直流分量并计算出交流分量,与无功电流 *i*_q 一起经 过反变换,得到两相静止坐标系下的指令信号 *i*_{TC}和 *i*_{MC}。

MRPC 3 个桥臂的指令电流均为交流量,通过 调节器,得到 3 个桥臂的指令电压,即可实现桥臂输 出电流的无差调节。对于想要消除的谐波电流,只 要在静止坐标系下的电流调节环节中,加入相应谐 振频率的调节器即可。3 个桥臂的指令电压再通过 载波移相调制策略及子模块电容均压、桥臂环流抑 制措施^[23],得到 MMC 各个子模块的脉宽调制 (PWM)脉冲信号,控制 MRPC 工作。 理想情况下,有功功率通过 MRPC 在两相之间 转移,MRPC 装置本身不会吸收或释放有功功率, 故 MRPC 直流侧电压不应当发生变化,从有功电流 指令是纯交流量也可得到这一结论。但实际系统 中,由于损耗及控制上的差异,会造成 MRPC 直流 电压发生变化,故系统中应当包含直流电压稳定环 节。引入直流电压反馈,经过比例-积分(PI)调节 器得到直流电压控制的修正量,叠加到有功电流指 令当中,就可以通过有功电流微小的直流偏置,起到 对直流环节充放电的作用,实现直流电压的稳定。 比较传统的 RPC 系统及控制方法,这种两相三 桥臂的拓扑结构可以把 2 个独立的能量传输装置当 成一个整体来控制;旋转坐标系下,采用补偿系统整 体负序有功、无功功率及谐波的控制方式,不必分别 计算两座的有功电流、无功电流及谐波电流;使用基 于 SOGI 与直流积分器直接提取出负序量与谐波, 不必分频提取各次分量,大大简化了指令电流的计 算,并能方便地实现直流电压的稳定控制。综上所 述,可以得到系统的控制框图如 6 所示。



图 6 MRPC 控制框图 Fig.6 Control block diagram of MRPC

3 仿真与实验研究

由于电铁牵引供电系统电压高、容量大,且 MMC级数多,拓扑复杂,难以通过实际系统进行验 证。本文首先使用了 MMC 研究最常用的验证工 具——RT-Lab 实时仿真器,验证了之前的研究工 作。使用 RT-Lab 验证高效方便,仿真结果与实际 非常接近^[24]。

仿真中系统拓扑见图 2(a), Scott 变压器将 110 kV的三相电转换为 2 个独立的单相 55 kV T 座与 M 座。并通过自耦变压器将 55 kV 变换为 27.5 kV给电力机车供电。直流侧电压根据式(9)的 要求设置为 65 kV, MMC 级数为 25 级, 每相50 个 子模块, 输出电平数为 51 电平。根据 MMC 的工作 原理可知, 每个子模块直流电压为 2.6 kV。每个子 模块的开关频率为 500 Hz, MRPC 等效开关频率为 25 kHz。仿真中 RPC 系统子模块的电容为 25 mF, 桥臂电感取值为 5 mH, 交流输出电感为 4 mH。

仿真中,在2个供电臂上接入SS4型交直机车, 其主电路拓扑为晶闸管相控整流,因此各座负载为 典型的整流负载,运行时,功率因数不为1,且会向 各座供电臂注入大量低次谐波。各座负载情况如 表1所示。

0.05 s 后 MRPC 开始工作,系统整体的补偿仿 真结果如图 7 所示。

表 1 各座负载情况表 Table 1 Load of each phase



由图 7(a)可以看出,两座负载电流幅值不同且 畸变严重,补偿前后,机车负载的实际电流并没有变 化;由图 7(c)可以看出,补偿前三相电流严重不对 称且包含大量谐波,补偿后负序电流被消除,波形变 为正弦;由图 7(d)可以看出,补偿前由于 M 座、 T 座的负载不相同,有功功率及无功功率都存在由 负序电流引起的二倍频波动,而且无功功率上还包 含直流分量,说明总无功功率不为 0,补偿后有功功 率、无功功率上的波动都被消除,并且系统总无功功 率为 0;MRPC 工作前后变压器一次侧 A 相电流总 谐波畸变率(THD)如表 2 所示。可以看出,MRPC 工作后,系统三相电流平衡,无功功率被消除,且 3, 5,7,9 次等奇次谐波电流大幅度下降,整体的 THD 也满足要求。

表 2 MRPC 启动前后各次谐波电流含量及 THD Table 2 THD and each order of harmonic current comparison with/without MRPC

方法	谐波电流含量/%				TUD/0/
	3次	5次	7次	9次	- IIID/ /0
未加控制	33.17	24.01	15.02	9.91	43.46
加入控制	0.41	0.58	0.32	0.36	2.59

利用一台 10 kW 的 9 电平三相 MMC 样机、 Scott 变压器与 RLC 可调负载进行了实验。实验系 统接线如图 2(a)所示。利用 Scoot 变压器两相互差 90°的 220 V 电压, M 座负载有功功率为 3 kW, 无功 功率为 1 kW; T 座负载有功功率为 6 kW, 无功功率 为 2 kW。实验结果如图 8 所示。



从图 8 可以看出:补偿前三相电流不平衡严重, 且各相无功功率均不为 0;补偿后三相电流幅值基 本一致,互差 120°,且 A 相电压与 A 相电流同相,说 明补偿装置消除了负序电流与无功功率。

4 结语

本文针对基于 Scott 变压器的电铁牵引供电系统,利用 MMC 设计了两相三桥臂的 RPC 装置;对 负载电流进行了分析,在旋转坐标系下利用 SOGI 及直流积分器实现了补偿指令的快速计算;构建了 基于静止坐标系的 MRPC 控制系统。与传统的 RPC系统及控制方法相比,该方案硬件上节省了一 个桥臂的开关器件,且更适合高压大容量应用,软件 上实现简单,控制效果好。

最终通过 RT-Lab 实时仿真及实验验证了指令 电流算法和系统控制方法的有效性,以及 MRPC 装 置的补偿效果,两相三桥臂 MMC 能够实现两相间 的功率转移,并且能够补偿负载的无功功率及谐波, 因此能够保证一次侧的电能质量,大大减小了电铁 牵引供电系统对电力系统的影响。

参考文献

- [1] 张定华,桂卫华,王卫安,等.新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J].电工技术学报,2009,24(3): 193-196.
 ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway [J]. Transactions of China
- Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 193-196.
 [2] 周剑,卢志海,厉吉文.电气化铁路对电力系统的影响[J].继电器,2004,32(11):33-36.
 ZHOU Jian, LU Zhihai, LI Jiwen. The impact of electrified railway on electric power system[J]. Relay, 2004, 32(11): 33-36.
- [3] KUO H Y, CHEN T H. Rigorous evaluation of the voltage unbalance due to high-speed railway demands[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1385-1389.
- [4] 阳贵明,李光.Scott 接线牵引变压器特性仿真研究[J].湖南工业 大学学报,2012,26(3):72-75.
 YANG Guiming, LI Guang. Simulation study on the characteristics of Scott traction transformer [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(3): 72-75.
- [5] 万庆祝.牵引供电系统中负序问题研究[D].北京:清华大学, 2008.
- [6] 马伏军,罗安,吴传平,等.V/V 牵引供电系统中铁路功率调节器的控制方法研究[J].中国电机工程学报,2011,31(13):63-70.
 MA Fujun, LUO An, WU Chuanping, et al. Control methods of railway static power regulator for V/V electrified traction railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 63-70.
- [7] 施大发,吴传平.基于两相三线制变流器的高速铁路负序和谐波综合补偿新方法[J].电工技术学报,2012,27(7):257-266.
 SHI Dafa, WU Chuanping. A novel integrated compensation method of negative sequence and harmonic for high-speed railway based on two-phase three-wire converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 257-266.
- [8] 马伏军,罗安,徐先勇.大功率混合型电气化铁路功率补偿装置
 [J].电工技术学报,2011,26(10):93-102.
 MA Fujun, LUO An, XU Xianyong. High-power hybrid power quality compensation system in electrified railway [J].
 Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 93-102.
- [9] 江睿.电气化铁路两相牵引供电系统的平衡协调控制[D].长沙: 湖南大学,2011.

- [10] 李湘峰,周龙华,王飞.电气化铁道用多电平电能质量调节器及 其控制研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):104-110.
 LI Xiangfeng, ZHOU Longhua, WANG Fei. Study on multi-level power quality compensator for electrified railway
 [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 104-110.
- SENINI S T, WOLFS P J. Novel topology for correction of unbalanced load in single phase electric traction systems [C]// IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, June 23-27, 2002, Queensland, Australia: 1208-1212.
- [12] MORIMOTO H, ANDO M, MOCHINAGA Y, et al. Development of railway static power conditioner used at substation for shinkansen[C]// Power Conversion Conference the Industry Applications Society of the IEEE, April 2-5, 2002, Osaka, Japan: 1108-1111.
- [13] MOHAMMADI H P, BINA M T. A transformerless mediumvoltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(5): 1534-1545.
- [14] 马伏军,罗安,熊桥坡,等.一种简化型三电平高速铁路功率调 节器[J].电力系统自动化,2012,36(16):108-114.
 MA Fujun, LUO An, XIONG Qiaopo, et al. A simplified three-level power conditioner for high-speed railway system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 108-114.
- [15] 马伏军,罗安,王刚,等.一种铁路功率调节器的改进单周控制 方法[J].电力系统自动化,2012.36(5):96-102.
 MA Fujun, LUO An, WANG Gang, et al. An improved one-cycle control method of railway power static conditioner
 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 96-102.
- [16] 田旭,魏应冬,姜齐荣.基于模块化结构的电气化铁路统一电能质量控制器[J].电力系统自动化,2012,36(15):101-106.
 TIAN Xu, WEI Yingdong, JIANG Qirong. A railway unified power quality controller based on modular structure for electric railway[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 101-106.
- [17] KOURO S, ET A. Recent advances and industrial applications of multilevel converters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [18] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high

voltage-modular multilevel converter [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 1-5.

- [19] ILVES K, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. A new modulation method for the modular multilevel converter allowing fundamental switching frequency[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(8): 3482-3494.
- [20] 威庆茹,张春朋.一种用于电铁牵引变电站负荷平衡的新型补 偿器[J].现代电力,2012,29(3):38-41.
 QI Qingru, ZHANG Chunpeng. A novel compensator used in traction substation for load balancing [J]. Modern Electric Power, 2012, 29(3): 38-41.
- [21] 王卫安,桂卫华.两相牵引供电系统电能质量有源综合治理技术研究[J].铁道学报,2013,35(9):3-7.
 WANG Weian, GUI Weihua. Comprehensive active power quality compensation technology for two phase traction power supply system[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 3-7.
- [22] 薛尚青,蔡金锭.基于二阶广义积分器的基波正负序分量检测 方法[J].电力自动化设备,2011,31(11):69-73.
 XUE Shangqing, CAI Jinding. Detection of fundamental positive and negative sequence components based on secondorder generalized integrator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 69-73.
- [23] 杨晓峰,模块组合多电平变换器(MMC)研究[D].北京:北京交 通大学,2012.
- [24] LUCANDRE G, LI Wei, JEAN B, et al. Validation of a 60-level modular multilevel converter model-overview of offline and real-time HIL testing and results [C]// IPST 2011 International Conference on Power Transients, June 14-17, 2011, Delft Netherlands: 14-17.

荆 龙(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向:电力电
 子技术。E-mail: ljing@bjtu.edu.cn

唐 芬(1984—),女,通信作者,博士,主要研究方向:电 力电子与电力传动、风力发电、微网系统控制等。E-mail: fent@bjtu.edu.cn

王之赫(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向:直流 输电技术。E-mail: 12121562@bjtu.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

A Power Quality Compensating Method for Traction Power Supply System Based on MMC

JING Long¹, TANG Fen¹, WANG Zhihe¹, LI Jinke¹, WU Xuezhi¹, WANG Weian²

National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
 CSR Zhuzhou Institute Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: For the high voltage and power of traction power supply system of railway, a two-phase three-leg power conditioning unit is designed based on the modular multilevel converter (MMC) to eliminate the harmonic, reactive power, as well as the negative sequence current. The load current characteristic in the synchronous reference frame, and the compensation signal is calculated through second-order generalized integrator (SOGI) and DC integrator. A control system of MMC railway static power conditioner is designed in the stationary frame. Finally, the effectiveness of the algorithm and the compensation system.

This work is supported by International Science & Technology Cooperation Program of China (No. 2013DFA60930) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2010JBZ002).

Key words: power quality; electric railway; traction power supply; modular multilevel converter (MMC); two-phase three-leg; power balance; harmonic suppression; real-time digital simulation system