

DOI: 10.7667/PSPC161059

基于 MMC 的同相供电潮流控制器控制策略研究

肖刚¹, 张译文², 郭育华², 王莉²

(1. 四川航天职业技术学院, 四川 成都 610100; 2. 西南交通大学磁浮技术与
磁浮列车教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 模块化多电平换流器(MMC)与平衡变压器相结合的潮流控制器(PFC), 可节省传统牵引供电系统中的匹配变压器, 满足高压大功率的应用。首先介绍了系统工作原理, 重点研究了其中单相 MMC 背靠背换流器两端的补偿电流。提出了一种综合控制策略, 包括变流器两端补偿电流的提取算法, 子模块电容电压均衡控制, 环流抑制策略以及 PWM 调制方法。最后在 Matlab/Simulink 中搭建了系统模型, 分别对交直交型电力机车的牵引和再生制动工况进行仿真, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 同相供电; 模块化多电平换流器; 潮流控制器; 控制策略

Study on the control strategy of power flow controller based on MMC in co-phase power supply system

XIAO Gang¹, ZHANG Yiwen², GUO Yuhua², WANG Li²

(1. Sichuan Aerospace Polytechnic, Chengdu 610100, China; 2. Key Laboratory of Magnetic Suspension
Technology and Maglev Vehicle, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A novel power flow controller (PFC), which combines modular multilevel converter (MMC) with balancing transformer, can save the matching transformer in traditional traction power supply system and meet the requirement in high-voltage and high-power application. Firstly, this paper introduces the operating principle of the system, especially the desired compensating currents of single-phase back-to-back converter. Then it puts forward an integrated control strategy, which includes the algorithm of extracting the compensation current, the control of the capacitor voltage of the sub module, circulating current suppression strategy, and the PWM method. Finally, a simulation model is constructed in Matlab/Simulink, AC-DC-AC electric locomotive at traction/braking mode are simulated respectively. The simulation results verify its effectiveness.

Key words: co-phase power supply system; modular multilevel converter; power flow controller; control strategy

0 引言

牵引供电系统普遍存在负序、无功、谐波以及过电分相等电能质量问题。文献[1-2]提出的由平衡变压器和综合潮流控制器(IPFC)结合构成的新型同相牵引供电系统可以解决这些问题。2010年我国首套同相供电装置于成昆线眉山牵引变电所, 2014年世界首套单三相组合式同相供电装置于山西重载综合实验段沙峪牵引变电所均成功投入试运行。标志着我国自主研发的同相供电技术及装备已经进入工程化应用阶段。

在高速铁路发展背景下, 电力机车功率逐步提

升, 所需同相供电补偿装置容量高。而模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 具有输出电压电平数多、可模块化设计、开关损耗低等特性^[3-4], 可提升变流器的电压等级和容量。因此 MMC 在牵引系统中的应用前景广阔。

文献[5-7]研究了单相 MMC 变流器在新型牵引供电系统中的应用, 并提出了基于 MMC 的铁路功率调节器(MMC-RPC), 通过构造虚拟交流量实现直接功率控制策略, 并进行了环流抑制。

平衡变压器与单相 MMC 结构的潮流控制器结合的同相供电系统适应牵引系统电压等级高、容量大的环境。与传统的同相供电系统相比, 可节省其中的匹配变压器, 降低成本, 减小装置占地面积。针对此装置中的单相背靠背 MMC, 本文提出了一

种综合控制策略, 可实现 MMC 子模块直流电容电压均衡、抑制部分环流, 最终满足公网对三相电流无功、负序和谐波的要求。

1 原理分析

1.1 系统结构

平衡变压器与单相模块化多电平背靠背变流器结合的同相供电系统结构如图 1 所示。公网电压接入牵引供电系统的平衡变压器后, 将 A、B、C 三相对称电压转变成了两相幅值、频率相同, 相位相差 90° 的正交电压 u_α 和 u_β 。两个完全相同的单相 MMC 背靠背连接构成了同相供电系统中的潮流控制装置。由于 MMC 拓扑结构在高压大功率应用中的良好性能, 使得该潮流控制装置可直挂于平衡变压器两侧。这里将带机车负载的一侧记为平衡变压器与变流器的 α 端口, 另一侧为 β 端口。

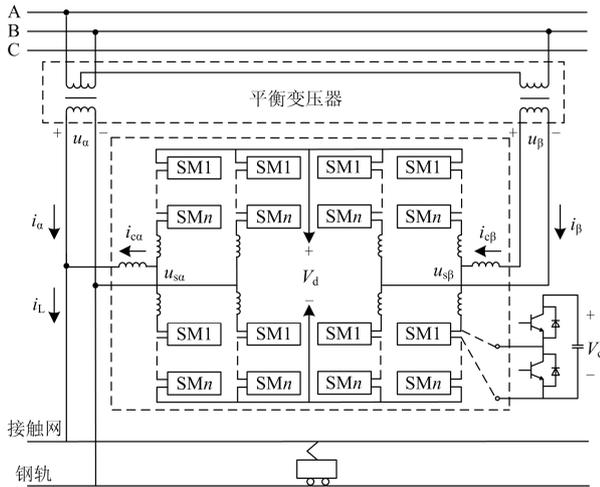


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

单相 MMC 与 PWM 变流器相同, 能量可以双向传递, 通过控制 MMC 的端口电压 $u_{s\alpha}$ 和 $u_{s\beta}$, 改变端口电流即补偿电流 $i_{c\alpha}$ 和 $i_{c\beta}$ 的大小和方向。根据同相供电补偿原则, 可以基本消除公网侧的三相不平衡, 取消电分相环节。

1.2 补偿原理

图 1 中的单相 MMC 交直交变流器直挂于平衡变压器 α 、 β 两端, 通过采取适当的控制策略, 便可实现有功功率的传递和无功功率、谐波的补偿。为简化分析, 将负载电流分解为有功、无功和谐波 3 种分量, 即

$$i_L = I_p \sin \omega t + I_q \cos \omega t + i_h \quad (1)$$

式中: i_L 为负载电流; $I_p \sin \omega t$ 为负载电流基波有功分量; $I_q \cos \omega t$ 为负载电流基波无功分量; i_h 为负载电流谐波分量。

根据平衡变压器性能^[8], 设 α 、 β 两端口电压与期望的输出电流分别为

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

式中: u_α 和 u_β 分别为 α 、 β 两端口电压; U 为电压有效值。

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_\beta = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_α 和 i_β 分别为 α 、 β 两端口电流; I 为电流有效值。

结合式(1)~式(3), 得到负载的瞬时功率和平衡变压器输出功率分别为

$$p_s(t) = u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t) \quad (4)$$

$$p_L = u_\alpha i_L = UI_p - UI_q (\sin 2\omega t + \cos 2\omega t) + u_\alpha i_h \quad (5)$$

忽略损耗, 有 $\int_0^T p_s dt = \int_0^T p_L dt$, 得到

$$I = \frac{I_p}{2} \quad (6)$$

此时, 变流器 α 、 β 两端口补偿电流期望值为

$$\begin{cases} i_{c\alpha} = \frac{1}{2} I_p \sin \omega t + I_q \cos \omega t + i_h \\ i_{c\beta} = \frac{1}{2} I_p \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

因此, 为使电网电压和电流的三相不平衡度、功率因数和谐波含量在标准范围内, 按照上述推导的补偿原则知, 当电力机车处在牵引工况下时, 能量从背靠背变流器的 β 端流向 α 端, 要求 β 端输入电流为负载电流有功分量的一半, α 端变流器输出电流为负载电流有功分量的另一半, 并补偿机车负载的全部无功和谐波分量。而处在制动回馈工况时电流大小不变, 仅方向发生改变, 能量由 α 向 β 传递。

2 控制策略

2.1 指令电流的提取

为将负载电流中的有功、无功、谐波分离, 设计了背靠背变流器两端口指令电流的提取算法。

利用锁相环(PLL)分别得到 u_α 的相位信息 $\sin \omega t$ 、 $\cos \omega t$ 和 u_β 的 $\sin(\omega t - 90^\circ)$ 。负载电流式(1)两边同乘 $\sin \omega t$ 得到,

$$i_L \sin \omega t = \frac{1}{2} I_p (1 - \cos 2\omega t) + \frac{1}{2} I_q \sin 2\omega t + i_h \sin \omega t \quad (8)$$

式(8)经过低通滤波器后得到负载电流中的有

功分量 $I_p/2$ 。

无功分量的提取方法类似, 有

$$i_L - I_p \sin \omega t = I_q \cos \omega t + \sum_{n=2}^{+\infty} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (9)$$

将式(9)两边与 $\cos \omega t$ 相乘得,

$$(i_L - i_p) \cos \omega t = \frac{I_q}{2} (1 - \cos 2\omega t) + i_h \cos \omega t \quad (10)$$

再次经过低通滤波器后分离出其中无功电流有效值的一半 $I_q/2$ 。

最后分离出谐波分量

$$i_h = i_L - I_p \sin \omega t - I_q \cos \omega t \quad (11)$$

按 2.2 节所述, 组合成变流器 α 、 β 端口需输出的电流为

$$\begin{cases} i_{\text{ref}\alpha} = \frac{I_p}{2} \sin \omega t + I_q \cos \omega t + i_h \\ i_{\text{ref}\beta} = \frac{I_p}{2} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

2.2 综合控制策略

适用于本文 MMC 同相供电潮流控制器的综合控制策略由 4 部分组成, 如图 2 所示。

(1) 指令电流的提取, 按照 3.1 节的算法将负载电流 i_L 分离为有功、无功和谐波分量并如式(12)分别合成变流器 α 和 β 端的指令电流。

(2) 瞬态直接电流控制, 使变流器端口电流跟踪其指令值, 把两者进行比较, 求出偏差电流, 通过比例调节器后形成变流器端口电压参考值。

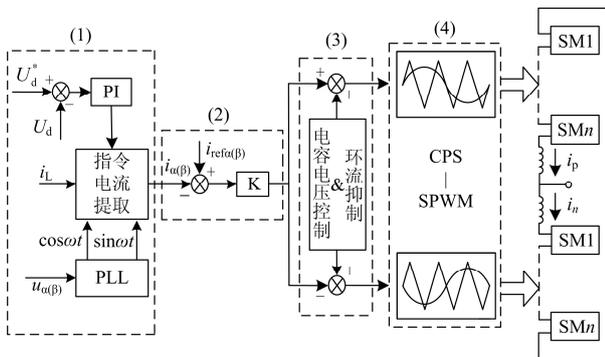


图 2 控制策略图

Fig. 2 Control strategy diagram

(3) 电容电压控制与环流抑制环节。

a) 电容电压均衡控制

MMC 子模块直流电容电压均衡控制。这里将电容电压控制分为平均电压控制和电压平衡控制两部分^[8-9]。

① 平均电压控制

以换流器的每个相单元为单位, 附加双闭环 PI 控制器, 如图 3, 由电压外环与电流内环组成。电压外环确保每相 $2n$ 个子模块电容电压的平均值 $(V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{c2n})/2n$ 能准确跟踪其指定值 V_c^* , 使能量均匀分配到每个子模块, 外环输出作为内环同时流经上下桥臂电流的参考值 i_z^* 。

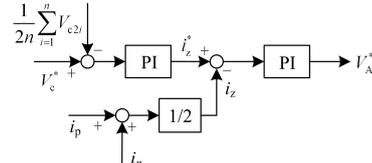


图 3 平均电压控制

Fig. 3 Averaging control

② 电压平衡控制

以每个模块为控制单位, 通过控制各子模块的充放电过程, 使电压波动稳定在允许范围内。如图 4, 以上桥臂为例, 若电容电压 $V_c < V_c^*$, 桥臂电流 $i_p > 0$, 则增大相应的 PWM 波占空比, 增加电容投入时间, 反之类似^[10]。

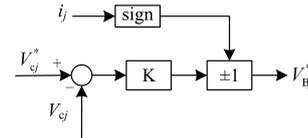


图 4 平衡控制

Fig. 4 Balancing control

b) 环流抑制

上、下桥臂电压和不等是导致环流产生的根本原因, 该环流叠加在桥臂电流上, 会导致桥臂电流发生畸变^[11]。本文参考文献[12]采用一种基于 PR 调节器的环流抑制策略, 抑制桥臂电流中二倍频分量和高频分量, 控制框图如图 5 所示。



图 5 环流抑制策略

Fig. 5 Circulating current suppression strategy

(4) PWM 脉冲波的生成。主要采用载波移相 PWM 调制方法(CPS-SPWM), 其载波分布有利于功率单元的自动均压, 等效提高开关频率, 以降低 IGBT 的开关损耗。由(2)得到的端口电压参考值与电容电压均衡控制分量 $V_A^* + V_B^* + V_C^*$ 叠加, 归一后得到每相上桥臂调制波。下桥臂调制波的构成相同, 但为了避免上下桥臂直通, 需要将端口电压参考值取反后再叠加。根据调制规则, 每个相单元上、下

桥臂的 n 个功率单元对应的载波为幅值、频率相同，相位互差 $(360/n)^\circ$ 的三角波，而上桥臂与下桥臂的第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个功率单元的三角载波相差 $(180/n)^\circ$ [13-14]。

3 仿真验证

3.1 仿真参数

本文以交直交型电力机车作为负载进行仿真验证，其输入端功率因数接近 1，输入电流近似正弦，谐波含量小，可以近似为纯阻性负载。为提高计算机的仿真运行速度，本文在 Matlab/Simulink 平台下搭建了电压等级相对较低，所需子模块较少的仿真模型。分别对机车在牵引和再生制动运行工况下，装置的运行情况进行了分析，仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
平衡变压器副边电压 u_a 、 u_β /V	3000
直流母线电压 V_d /V	5400
调制比 m	0.8
载波频率 f_c /Hz	1250
模块数 n	3
子模块电容电压 V_c^* /V	1800
桥臂电感 L /mH	5
子模块电容 C / μ F	3300

3.2 牵引工况

图 6—图 13 为电力机车运行于牵引工况时的控制仿真波形。由图 6 和图 7 网侧三相电压电流波形，图 8 平衡变压器副边 α 、 β 两端输出电流 i_α 和 i_β 波形可知，0.1 s 前未投入潮流控制装置，平衡变压器 α 端带载， β 端空载，使得网侧电流三相不平衡，产生严重的负序电流。0.1 s 投入后 i_α 和 i_β 幅值基本相同，相位互差 90° ，网侧三相电流基本平衡。此时， α 侧与 β 侧各承担负荷有功的一半，意味着，除去系统自身损耗，变流器 β 侧输入的有功功率，全部穿越直流母线传递给 α 侧的机车负荷。

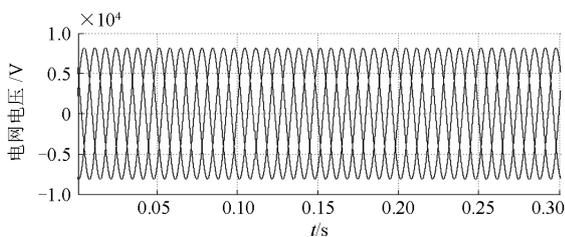


图 6 电网电压

Fig. 6 Grid voltage

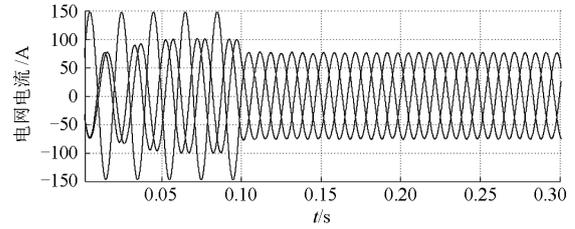


图 7 电网电流

Fig. 7 Grid current

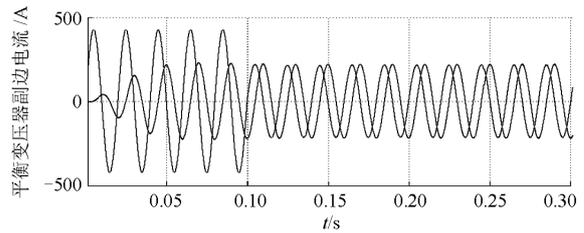
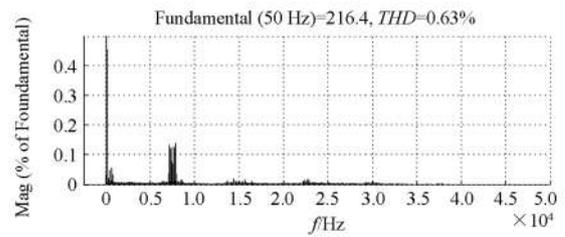


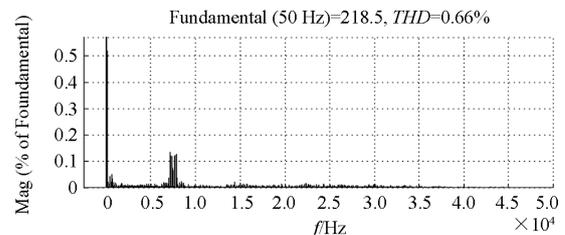
图 8 平衡变压器输出电流

Fig. 8 Output currents of balanced transformer

由图 9(a)、图 9(b)的谐波分析结果所示， i_α 、 i_β 的 THD 值分别为 0.63% 和 0.66%，畸变率在 3% 以内，满足国标对电能质量的治理要求。其高次谐波主要集中在 7.5 kHz 及其整数倍附近，说明本文采用 CPS-SPWM 调制可等效提高开关频率至 $2nf_c$ 。



(a) i_α 谐波分析



(b) i_β 谐波分析

图 9 i_α 、 i_β 谐波分析

Fig. 9 Harmonic analysis of i_α 、 i_β

图 10 表明，潮流控制器启动后，MMC 交流侧电压均为 7 电平，满足理论 $2n+1$ 的电平数。与传统的两电平变流器输出波形相比，更接近正弦波，若适当增加子模块数量，可以进一步提高电平数，改善变流器输出电压质量。

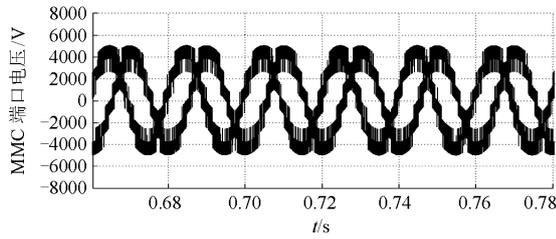


图 10 MMC 交流输出电压

Fig. 10 AC output current of MMC

如图 11, 各子模块电容电压均能稳定在给定值 1800 V 左右, 波动范围均能控制 2% 以内, 即稳定在 1764~1836 V 范围内, 保证了系统的正常运行。说明本文所采取的电容电压控制和载波移相调制控制策略的有效性。

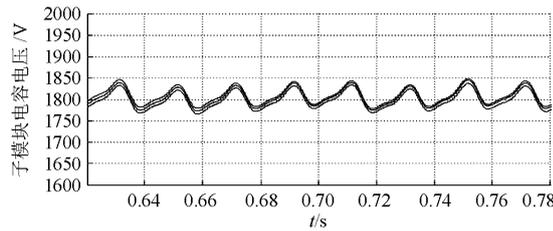


图 11 子模块电容电压

Fig. 11 Capacitor voltage of sub-module

如图 12, 除桥臂电流波形存在一定的直流偏置外, 开启环流抑制控制器后, 桥臂电流中存在的二倍频以及高倍频分量得到了明显的抑制, 其 $THD < 3\%$, 如图 13。

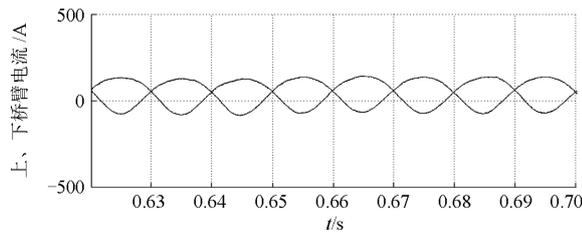


图 12 桥臂电流

Fig. 12 Bridge arm current

Fundamental (50 Hz)=104.3, $THD=2.93\%$

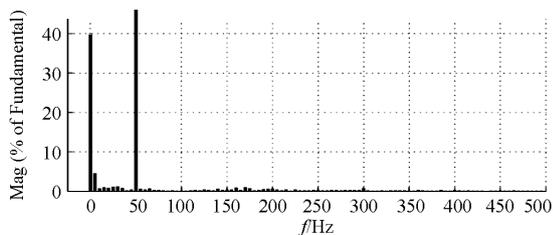
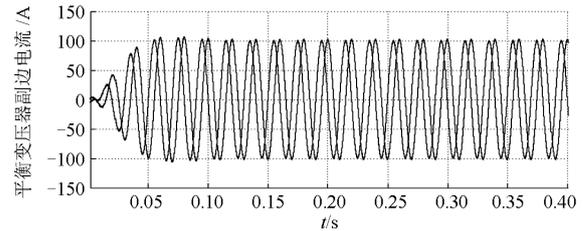


图 13 桥臂电流谐波分析

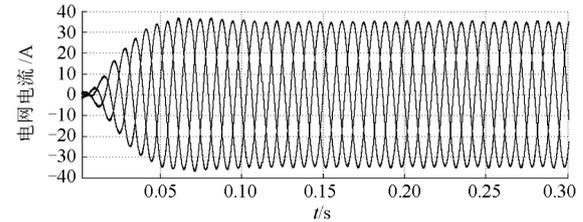
Fig. 13 Harmonic analysis of bridge arm current

3.3 再生制动工况

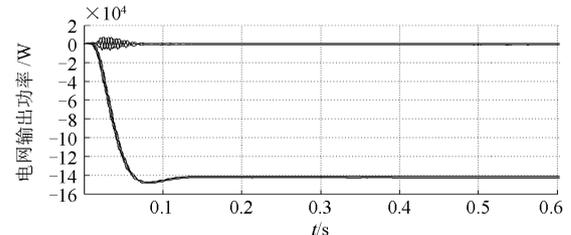
图 14(b) 波形表明, 机车处于再生制动工况时, 潮流控制器使变压器副边电流 i_α 、 i_β 幅值相等并正交, 保证了图 14(a) 中原边电流的三相平衡。图 14(c) 为网侧发出功率波形, 三相功率曲线基本重合且有功功率为负, 无功功率基本为零, 这说明能量以单位功率因数反馈回三相电网。此时, 变流器 α 端吸收机车所回馈的一半能量, 通过 β 端, 流回电网。验证了背靠背变流器可以实现能量的双向流动。图 14(d) 子模块电容电压仍能稳定在给定值的 2% 内波动, 与牵引工况结果相同。



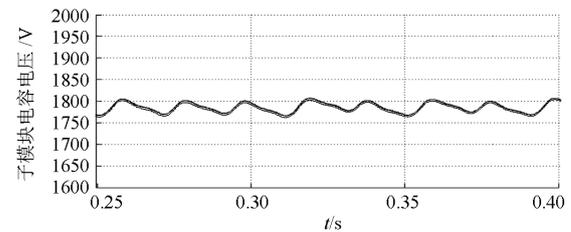
(a) 平衡变压器输出电流



(b) 电网电流



(c) 电网输出功率



(d) 子模块电容电压

图 14 制动工况仿真波形

Fig. 14 Simulation waveform at braking mode

4 结论

本文主要针对平衡变压器结合单相背靠背 MMC 组成的同相供电潮流控制器, 提出了一种综合控制策略。通过对交直交型机车牵引和再生制动

工况进行仿真, 结果验证了在两种工况下: (1) 潮流控制器能补偿由不平衡负载引起的负序电流, 从而实现电网电流的三相平衡; (2) 直流电容电压均衡控制, 基于 PR 调节器的环流抑制结合 CPS-SPWM 调制使子模块电容电压均衡, 并起到抑制桥臂环流的作用, 保证了 MMC 的正常工作。证明了此控制策略的正确性, 并具有一定工程借鉴意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵元哲, 朱鹏, 李群湛, 等. 基于 YNvd 平衡变压器和模拟负载的同相供电实验系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 143-148.
ZHAO Yuanzhe, ZHU Peng, LI Qunzhan, et al. Co-phase supply test system based on YNvd balanced transformer and simulated load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 143-148.
- [3] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.
- [4] FRANQUELO L, GRODRIGUEZ J, LEON J I, et al. The age of multilevel converters arrives[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2008, 2(2): 28-39.
- [5] 宋平岗, 林家通, 李云丰, 等. 基于模块化多电平的铁路功率调节器直接功率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2511-2518.
SONG Pinggang, LIN Jiatong, LI Yunfeng, et al. Direct power control strategy of railway static power conditioner based on modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2511-2518.
- [6] 宋平岗, 吴继珍, 林家通, 等. 单相 H 桥型 MMC 直接功率控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(5): 42-46.
SONG Pinggang, WU Jizhen, LIN Jiatong, et al. Study on direct power control strategy of single-phase H-bridge MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(5): 42-46.
- [7] 宋平岗, 吴继珍, 陈欢, 等. 单相 MMC 变流器及其在新型牵引供电系统中的应用[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 92-100.
SONG Pinggang, WU Jizhen, CHEN Huan, et al. Research on single-phase MMC and its application in novel traction power supply system[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 92-100.
- [8] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulse width modulated multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [9] 高建, 苏建徽, 高航, 等. 模块化多电平换流器电容电压与环流的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 56-62.
GAO Jian, SU Jianhui, GAO Hang, et al. Capacitor voltage and circulation current control strategy in modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 56-62.
- [10] 谭喜堂, 张红梅, 朱琴跃, 等. MMC 模块电容电压波动分析与均衡控制研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(1): 1-4.
TAN Xitang, ZHANG Hongmei, ZHU Qinyue, et al. Research on sub-module capacitor voltage ripples and voltage balancing control strategy in modular multilevel converter[J]. Power Electronics, 2016, 50(1): 1-4.
- [11] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器新型桥臂环流抑制控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 73-80.
ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.
- [12] 王之赫, 荆龙, 吴学智, 等. 基于 MMC 的铁路功率调节器环流抑制策略[J]. 电源学报, 2014, 12(6): 79-85.
WANG Zhihe, JING Long, WU Xuezhi, et al. Circulating current suppressing strategy of railway power static conditioner based on modular multilevel converter[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(6): 79-85.
- [13] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 74-80.
DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 74-80.
- [14] 杨晓峰, 孙浩, 郑琼林. 双调制波 CPS-SPWM 在模块化多电平变换器的应用研究[J]. 电气传动, 2011, 41(10): 15-20.
YANG Xiaofeng, SUN Hao, ZHENG Qionglin. Application of double-modulation-wave carrier phase-shifted SPWM in modular multilevel converters[J]. Electric Drive, 2011, 41(10): 15-20.

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-11-10

作者简介:

肖刚(1986—), 男, 工程硕士, 助教, 研究方向为牵引供电系统理论及应用; E-mail: xiaogang12342006@126.com

张译文(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变流技术。E-mail: zywdaisy@126.com

(编辑 葛艳娜)