

# 载波移相 SPWM 在贯通式同相供电系统中的应用

郭晓宇

(乌鲁木齐铁路局供电处 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 针对贯通式同相供电系统中的交-直-交变流器输出电流(电压)谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)较高的问题,提出采用载波移相正弦波脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)方法,将多个单相逆变器级联输出,以此改善输出电压波形。在 Matlab/Simulink 中建立系统模型进行仿真测试,结果表明,所提方法能够有效改善牵引供电系统电能质量问题,使牵引侧负载电压 THD 含量减少、电力电子器件耐压水平降低。

**关键词:** 贯通式同相供电系统;交-直-交变流器;载波移相 SPWM;谐波畸变率

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0036-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.008

## Application of Carrier Phase Shifted - SPWM to Continuous Co - phase Power Supply System

Guo Xiaoyu

(Power Supply Department of Urumqi Railway Administration, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the harmonic content in output current (voltage) of AC-DC-AC converter is higher, carried phase shifted - sinusoidal pulse width modulation (CPS-SPWM) method is proposed to improve the output voltage waveform by taking cascade multiple single-phase inverter as output device. Then, the simulation model is established in Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed CPS-SPWM can improve the power quality of traction power supply system efficiently, reduce the THD content of load voltage, and lower the peak voltage of power electronic devices.

**Key words:** continuous co-phase power supply system; AC-DC-AC converter; carried phase shifted - sinusoidal pulse width modulation (CPS-SPWM); total harmonic distortion (THD)

## 0 引言

牵引供电系统中因为电气化铁路的单相负载将产生特别差的电能质量,如无功电流、谐波、不平衡有功电流。由于牵引变电所的大功率性质,不良影响将扩大到电网。当基于脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)变换器的机车被广泛使用时,由无功功率和谐波引起的失真减少,但不平衡变得比以前更显著<sup>[1]</sup>。传统的牵引供电系统,为了平衡两相负载,一个牵引变电所使用两相供电臂的方案被广泛采用。如果采用平衡变压器,次边的两相电流平衡会造成原边的三相电流平衡。现有的几个平衡变压器的接线方案,如变形伍德布里奇、斯科特和屋

顶三角形变压器<sup>[2]</sup>,作为馈电变压器都有自己的特性和性能。但是如果两相的电流是不平衡的,平衡变压器就不能完全平衡三相电流。不幸的是,因为在两相供电系统中机车的速度和负载条件经常变化,两相牵引供电系统中的馈线电流通常是不平衡的。此外,平衡变压器对无功功率和谐波是没有用的。

为了解决这些问题,在三相电网或两相牵引网络中采用了一些有源补偿器。相对于无源补偿技术来说,三相电网中使用的有源补偿器,包括晶闸管控制电抗器、静止同步补偿器以及有源电力滤波器,它们有多个补偿公用设施和良好的瞬态性能<sup>[3]</sup>。但它们不完全符合牵引供电系统的要求。

此外,传统电气化铁路牵引变电所采用的供电

方式是三相 - 两相制,在分区所处设置分相绝缘器。但实际中因为牵引负荷的单相性和随机性,系统中会产生大量的无功和谐波分量,此类电能质量问题加之电分相环节的存在,将会严重制约高速、重载铁路的发展<sup>[4-6]</sup>。

目前已开展的有关同相供电技术的研究能很好地解决这一问题。文献[7-10]提出的同相供电系统方案,可以在同一电网供电区间内取消电分相环节;但在不同电网的供电区段仍旧需要采用分相环节来隔离,因此存在供电缺陷。贯通式同相供电系统通过采用交 - 直 - 交变频器,实现全线范围内的贯通供电,以达到彻底取消电分相环节和改善电能质量的目的。文献[11-12]提出了一种基于双 PWM 整流器的交 - 直 - 交变频器的设计方案,但该方法存在输出波形畸变率大、电力电子器件承受电压高的缺点。

载波移相 SPWM 技术能够在器件开关频率较低的情况下,实现较高的等效开关频率,因此广泛应用于大功率变流器场合<sup>[13-15]</sup>。这里提出采用载波移相技术,将单相逆变器级联后输出,以期改善输出电压波形,降低绝缘栅双极晶体管( insulated gate bipolar transistor, IGBT) 承受电压。

### 1 贯通式同相供电系统结构

贯通式同相供电系统是针对同相供电系统中存在的供电缺陷提出的,能够在全线范围内的不同牵引变电所的供电区段上实现接触网电压相位相同,是线路上没有电分相环节的牵引供电系统<sup>[16]</sup>。贯通式同相供电系统主要由三相降压变压器、交 - 直 - 交变频器和单相升压变压器组成,其结构如图 1 所示。

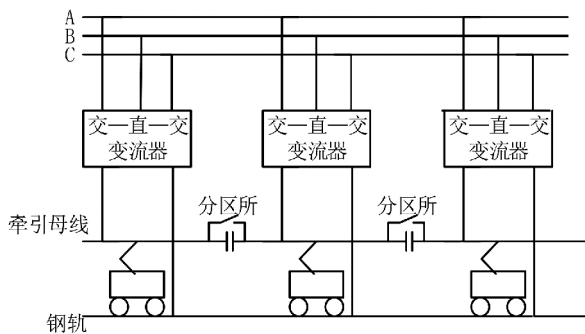


图 1 贯通式同相供电系统结构图

在这种结构下,牵引网取流需要经过三相交流 - 直流 - 单相交流的全变换过程,使得每个牵引变电所均逆变出幅值和频率相同的单相电压,将全线上的所有牵引变电所互联,形成一个独立于上一级电网的牵引供电网络,仅与三相电力系统交换有功功率,可以有效改善电能质量。

### 2 交 - 直 - 交变频器结构及原理

传统的交 - 直 - 交变频器由 1 个三相整流器和 1 个单相逆变器组成,不能实现大功率转换,且每个 IGBT 元件承受的峰值电压高。为了取得更好的输出波形,降低对电力电子开关器件耐压等级的要求,文献[17]提出依靠载波移相 SPWM 技术,将 4 个单相 PWM 逆变器级联输出电压作为交 - 直 - 交变频器中送入单相升压变压器的输入电压,交 - 直 - 交变频器结构如图 2 所示。

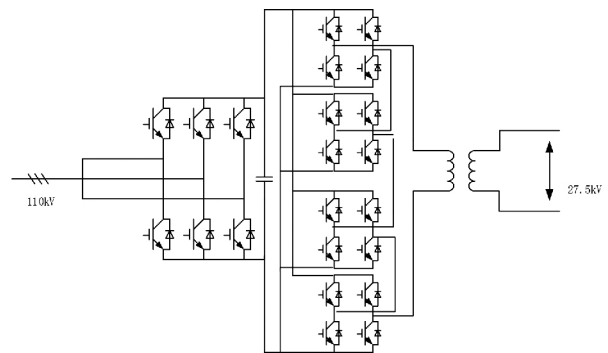


图 2 交 - 直 - 交变频器结构

### 3 交 - 直 - 交变频器控制策略

交 - 直 - 交变频器是贯通式同相供电系统中的核心器件,主要由三相整流环节、直流储能环节和单相逆变环节组成。三相降压变压器将 110 kV 电压降压后输入给三相 PWM 整流器,三相整流环节将三相交流电变换为直流电,并控制三相交流侧的功率因数为 1,两 PWM 整流器通过直流环节的电容传递有功功率,然后由单相 PWM 逆变器将直流电逆变为幅值和频率稳定的单相交流电后,输入给单相升压变压器将电压升至 27.5 kV 后输送给负载。

#### 3.1 三相整流环节控制策略

三相电压型 PWM 整流器有很多控制方法,包括:直接功率控制、电流闭环控制、基于 LCL 滤波的

控制等。这里采用的是电压外环、电流内环的双闭环控制方案,分别按照 I 型系统和 II 型系统特点来设计电流内环和电压外环的比例积分( proportion integration, PI) 控制器,用电压外环来控制直流电压输出的稳定性,用电流内环来控制交流侧电流,提高网侧功率因数<sup>[18]</sup>。三相整流器控制原理如图 3 所示。

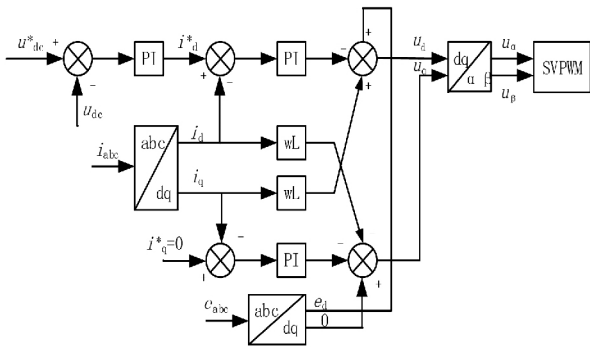


图3 三相整流环节控制框图

### 3.2 单相逆变环节控制策略

采用载波移相 SPWM 技术,将单相 PWM 逆变器的输出通过串联叠加,将 4 组逆变器的三角载波分别错开一定相角<sup>[19]</sup>,则同样的调制波与三角载波比较后会产生 4 种错开一定角度的 PWM 波,分别用来控制每个逆变器,输出侧电压经过串联叠加后即可得到正弦阶梯波。每个 PWM 逆变器采用了电感电流内环加上输出电压外环的控制方案,单个逆变器的控制策略如图 4 所示。

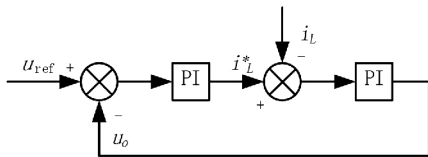


图4 单个单相逆变器控制框图

## 4 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中搭建了交-直-交变频器仿真模型,仿真参数如下:设定一套交-直-交变频器的额定容量为 4 MVA,三相降压变压器变比为 110 kV/2 kV,单相升压变压器变比为 8 kV/27.5 kV,直流储能电容为 2 mF。仿真开始时,负载为 4 800 kW 纯阻性负载,在 0.1 s 的时候突变为 2 400 kW,仿真运行结果如图 5、图 6 所示。

仿真结果表明,不管在负载突变前还是在负载

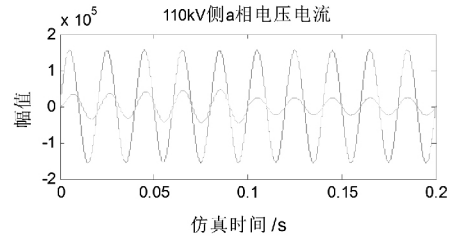


图5 电力系统侧 A 相电压、电流

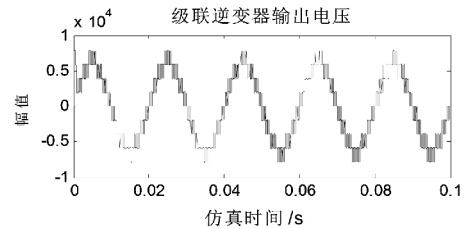


图6 级联逆变器输出电压

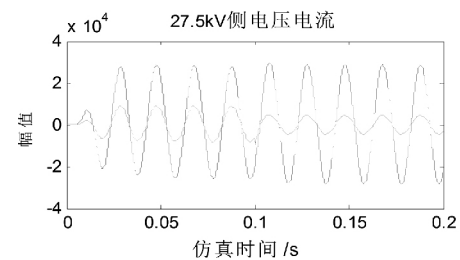


图7 牵引侧电压电流

突变后,电网侧功率因数都能够在交-直-交流器的控制下基本达到 1(以 A 相电流为例)。利用 Matlab/Simulink 中的 FFT 工具对三相交流侧电流谐波含量进行分析,得到 A 相电流的 THD 含量为 1.74%,表明采用交-直-交流器的贯通式同相供电系统能够有效改善牵引供电系统的电能质量。

在负载突变后,负载电压能够保持电压幅值和频率的稳定性,并迅速从干扰中恢复到正常的工作状态,表明系统具有良好的抗干扰性能。

对比非载波移相 SPWM 交-直-交流器可知,在采用载波移相 SPWM 后,牵引侧负载电压的 THD 含量由以前的 1.5% 减少为 0.78%,并且在交-直-交流器容量相同的情况下,IGBT 承受的峰值电压减少为原来的 1/4。

## 5 结语

贯通式同相供电系统能够有效解决在传统牵引供电系统中存在的电能质量和电分相问题。在贯通

(下转第 48 页)

[3] 杨代勇,刘俊博,张益云,等. 66 kV 电缆中间头击穿故障诊断及电场仿真分析[J]. 吉林电力, 2016, 44(5): 45-47.

[4] 姜芸,闵红,罗俊华,等. 220 kV 电缆接头半导体尖端缺陷的局部放电试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2657-2661.

[5] 何泽斌,熊俊,王晓兵,等. 一起 220 kV 交联聚乙烯电缆中间接头故障原因分析及运行建议[J]. 广东电力, 2011, 24(4): 87-89.

[6] 黄顺涛. 一起电力隧道中 220 kV 电缆接头爆炸机理的研究及应对措施[J]. 企业技术开发, 2015, 34(36): 82-85.

[7] 申积良,罗俊华,汤美云,等. 110 kV 电缆终端头爆炸

(上接第 38 页)

式同相供电系统的基本结构和原理的基础上,对交-直-交变流器展开了研究,得到以下结论:

1) 采用载波移相 SPWM 的交-直-交变流器的贯通式同相供电系统能够彻底取消分区所的电分相环节,改善了传统牵引供电系统中存在的电能质量问题,有利于高速铁路的发展;

2) 在同样容量的交-直-交变流器中,载波移相 SPWM 技术可以降低对电力电子器件耐压等级的限制,以达到节省成本的目的。

#### 参考文献

[1] B. Busco, P. Marino, M. Porzio, et al. Digital Control and Simulation for Power Electronic Apparatus in Dual Voltage Railway Locomotives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 1146-1157.

[2] K. Hung-Yuan, C. Tsai-Hsiang. Rigorous Evaluation of the Voltage Unbalance Due to High-speed Railway Demands [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1385-1389.

[3] R. A. Otto, T. H. Putman, L. Gyugyi. Principles and Applications of Static, Thyristor-controlled Shunt Compensators [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, PAS-97(5): 1935-1945.

[4] 王晖,吴命利. 电气化铁路低频振荡研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 70-78.

[5] 许志伟,罗隆福,张志文,等. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 265-272.

[6] 游广增,马斌,朱毅. 牵引变压器接线方式对谐波和负序的影响研究[J]. 电气技术, 2014(3): 14-18.

[7] 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.

[8] 李群湛. 同相供电系统的对称补偿[J]. 铁道学报, 1991, 13(s1): 35-43.

事故分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 74-75.

[8] 段建家,陈细玉,韦文榜,等. 110 kV 电缆接头故障分析及试验研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(1): 63-65.

[9] GB/T 18890.1-2015, 额定电压 220 kV ( $U_m = 252$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分: 试验方法和要求[S].

[10] 徐应麟. 电线电缆手册第 2 册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

作者简介:

刘凤莲(1986), 工程师, 主要从事电力电缆绝缘性能检测、状态评估、故障分析等工作。

(收稿日期: 2017-11-04)

[9] 贺建闽,李群湛. 用于同相供电系统的对称补偿技术[J]. 铁道学报, 1998, 20(6): 47-51.

[10] 吕晓琴,张秀峰. 基于有源滤波器的 V/x 结线的同相牵引供电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(6): 73-78.

[11] 张睿. 贯通式同相供电系统电能变换器的研究[J]. 电气化铁道, 2012(4): 19-22.

[12] 常非,冯金博,赵丽平. 同相贯通牵引供电系统综合潮流控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 54-58.

[13] Minwu Chen, Qun-zhan Li, Guang Wei. Optimised Design and Performance Evaluation of New Cophase Traction Power Supply System [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2009: 1-6.

[14] Zhao Y, Zhao L, Li Q. Some Key Problems on Cophase Traction Power Supply Device [C]. International Forum on Information Technology and Applications, IEEE Computer Society, 2010: 444-449.

[15] Shu Z, Xie S, Li Q. 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.

[16] 王冬梅,王晨. 基于单台 YN,d11 变压器的同相 AT 供电系统[J]. 电气技术, 2014, 15(7): 18-21.

[17] 卓放,胡军飞,王兆安. 采用多重化主电路实现的大功率有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 5-7.

[18] 林飞,杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[19] 李群湛,贺建闽,解绍锋. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.

作者简介:

郭晓宇(1970), 本科、高级工程师, 主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期: 2017-09-04)