

电气化铁路不断电过分相与电能质量补偿装置研究

田旭¹, 姜齐荣², 魏应冬², 赵伟¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;
2. 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要:为了解决机车过分相时出现的过电压、过电流以及牵引变电站产生的负序电流等电能质量问题,本文提出一种新的不断电过分相与电能质量综合补偿装置,该装置能够在机车通过电分相时消除供电死区,使机车不断电、满功率、无速度损失地通过电分相,在没有机车通过电分相时减小牵引变电站注入电力系统的负序电流和谐波。给出本文所提出装置的系统配置,对工作时序进行分析,研究了基于三桥臂模块化多电平结构的装置拓扑,并设计了相应的系统级和装置级控制策略。最后通过仿真验证了所提出装置及其拓扑和控制策略的正确性和有效性。

关键词:不断电过分相; 电能质量补偿; 变频移相; 模块化多电平; 控制策略

DOI: 10.12067/ATEEE1801044 **文章编号:** 1003-3076(2018)04-0049-08 **中图分类号:** TM46

1 引言

由于电力机车负载是单相负荷,为了减少向电力系统中注入的负序电流,牵引供电系统采用轮换相序的方式接入电力系统,使得不同牵引变电站的相邻牵引供电臂相位不同。此外,牵引变压器副边两绕组输出电压相位存在相位差。因此,轮换相序接入电力系统以及牵引变压器两个输出电压的相位差都会导致电分相环节的出现,这个电分相环节也称为中性段。

机车在通过中性段时会产生严重的过电压和过电流的问题^[1-3]。现有车载断电自动过分相^[4]及地面开关切换自动过分相^[5],以及在这两种过分相方案基础上进行改进的方案^[6-10],都无法完全消除机车在通过电分相环节时的供电死区,因而也就无法根本消除由于断电-复电操作所带来的过电压和过电流的问题。文献[11]提出了一种不断电过分相方案,两牵引供电臂电压变压器降压至500V,分别接至多个单相背靠背变流器的一个交流端口,所有

变流器的另一交流端口则全部并联,经变压器升至27.5kV后接入中性段。该方案虽能够实现机车不断电过分相,但缺点主要在于该方案要求机车在进入中性段之前必须减载至惰行状态,所以尽管机车在通过电分相时始终带电,但牵引力和速度仍然有所损失。

在之前的研究中,笔者提出一种不断电过分相装置,能够通过变频移相技术实现机车无断电、不减速、全功率通过电分相环节。为了保证安全,铁路系统实际运行时通常有最小发车间隔,京沪高铁和武广高铁的最小发车间隔为5min,每次机车通过中性段的时间不超过1min,无机车通过中性段的时间远大于有机车通过中性段的时间,所以不断电过分相装置大部分时间并不工作,装置利用率较低。

另一方面,随着交直交型机车在铁路中的大量应用,低次谐波及功率因数的问题将得到逐步缓解,但是负序电流注入的问题却日益突出,极大地影响电力系统的电能质量,极端情况下会造成发电机和继电保护设备的故障和误动作,危及电力系统的安全。

收稿日期: 2018-01-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200800)、国家自然科学基金项目(51707194)、北京市优秀青年教师培养计划项目(2016000020124G114)
作者简介: 田旭(1984-),男,河南籍,讲师,博士,主要从事电气化铁路不断电过分相技术、柔性交流输电系统建模与控制、电能质量分析与控制方面的研究;
姜齐荣(1969-),男,湖南籍,教授,博士,主要从事电气化铁路、柔性交流输电系统、电力系统分析与控制方面的研究。

全稳定运行^[12,13]。在各种补偿措施中,基于静止同步补偿器(STATCOM)技术的电气化铁路统一电能质量控制器(RUPQC)具有很大的优越性,有着良好的应用前景^[14-16]。

本文将不断电过分相装置与统一电能质量控制器结合,提出电气化铁路不断电过分相与电能质量综合补偿装置,给出其系统配置及工作流程,并对基于模块化多电平变流器(MMC)结构的装置拓扑及相应的控制策略进行了研究,最后通过仿真验证了拓扑及控制策略的正确性和有效性。

2 过分相与电能质量补偿装置的系统配置及工作时序分析

牵引供电系统如图 1 所示。电力系统三相电压

经牵引变压器后变为两相电压 u_α 和 u_β , 分别接入 α 相和 β 相牵引供电臂。对于不同接线方式的牵引变压器, u_α 和 u_β 之间的相位差为 60° 或者 90° 。两牵引供电臂之间存在一个电分相,也称为中性段,供电臂与中性段之间通过空气实现电气绝缘。中性段可以分为两个过渡区和一个无电区,由于过渡区里牵引供电臂与中性段平行悬挂,机车受电弓在此区域内同时跨接两线。机车受电弓在无电区仅接中性段,依靠惯性滑行通过。

不断电过分相与电能质量综合补偿装置由两个通过共用直流侧电容实现背靠背的单相变流器 VSC_A 和 VSC_B 及断路器 BRK 组成。当有机车通过中性段时,装置工作于过分相模式,保证机车不断电、满功率地通过中性段;否则,装置工作于电能质

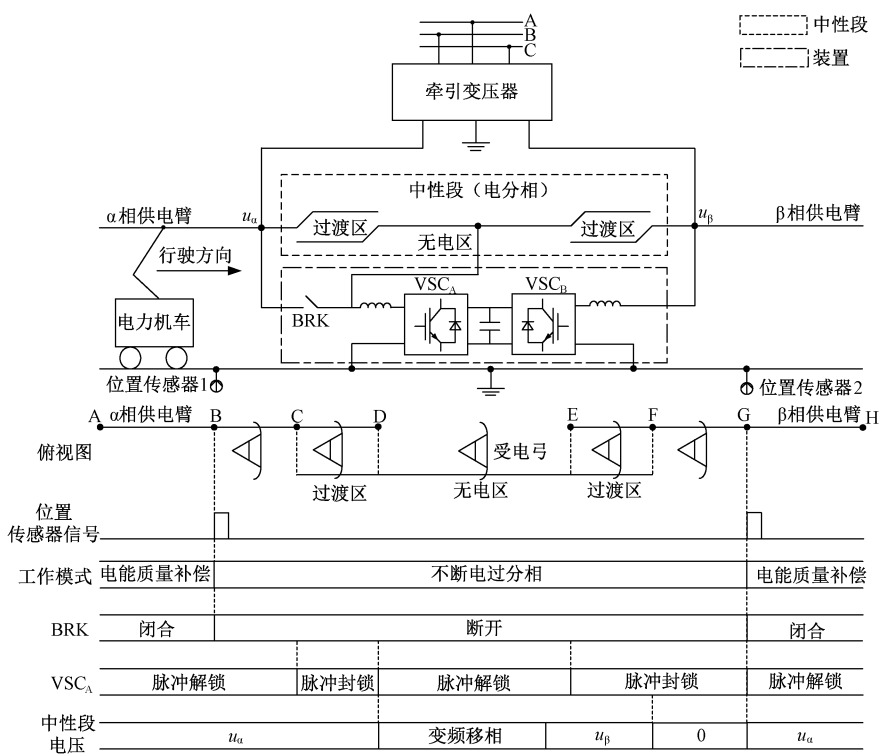


图1 不断电过分相与电能质量补偿装置的系统构成与工作时序

Fig. 1 System configuration and working sequence of uninterruptible phase-passing and power quality compensation device

量补偿模式,减小注入电力系统的负序电流。具体的工作过程如下。

假设初始条件下,装置工作于电能质量补偿模式。在此模式下,BRK 闭合, VSC_A 与 α 相供电臂和中性段相连,中性段电压等于 u_α 。装置根据牵引变压器的接线方式,实现负载功率在两个牵引供电臂之间的转移(转移的功率见 3.3 节),整个牵引变电

站负荷三相对称。当有机车通过中性段时装置工作于过分相模式^[17]。以机车由 α 相驶向 β 相为例,当机车到达位置传感器 1(图 1 中的 B 点)时,传感器发出指示信号,BRK 断开, VSC_A 仅与中性段相连,空载输出电压 u_α 。当机车到达左过渡区的起点(C 点)时,机车受电弓将 α 相供电臂与中性段相连, VSC_A 脉冲封锁,机车功率仍然由 α 相供电臂提供。

当机车离开左过渡区末端(D点)时,由于受电弓不再接触 α 相供电臂,所以中性段电压将出现跌落,装置检测到电压跌落后解除脉冲封锁,并输出电压 u_α ,为机车提供所需的功率。当机车处于无电区(DE)时,VSC_A利用变频移相技术,在机车到达E点前,使中性段电压由 u_α 变为 u_β ,机车功率完全由 β 相供电臂经过背靠背变流器转移至中性段提供。当机车到达E点时,机车受电弓将 β 相供电臂与中性段相连,VSC_A脉冲封锁,机车功率由 β 相供电臂直接提供。当机车到达F点时,受电弓只接触 β 相供电臂。当机车到达位置传感器2(G点)时,传感器发出指示信号,过分相模式完成,BRK闭合,VSC_A脉冲解锁,进入电能质量补偿模式,整个装置回到初始状态。由于BRK在每次动作前,VSC_A都已脉冲封锁,所以对断路器的寿命影响很小。

3 不断电过分相与电能质量补偿装置原理

3.1 过分相模式的工作原理

所谓变频移相技术,是指改变中性段电压的频率,使其与牵引供电臂电压的频率不同,两者之间的频率差经过一段时间后会产相位差异,从而实现中性段电压的相位在两牵引供电臂之间的连续变化。在变频移相的过程中,中性段电压的幅值还会由起始牵引供电臂的电压幅值线性变化至目标牵引供电臂的电压幅值。

设 α 相与 β 相供电臂电压的频率为 f_0 ,有效值分别为 U_α 和 U_β ,相位分别为 φ_α 和 φ_β 。以电力机车由 α 相向 β 相移动为例,设移相过程中中性段电压的频率为 $f_{\alpha\beta}$,经过 T_Δ 时间后,中性段电压由与 α 相电压同相位变为与 β 相电压同相位,幅值由 U_α 变为 U_β ,则移相过程中,中性段电压 u_m 应为^[17]:

$$u_m = \sqrt{2} \left(U_\beta + \frac{U_\alpha - U_\beta}{T_\Delta} t \right) \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\varphi_\alpha - \varphi_\beta}{T_\Delta} \right) + \varphi_\beta \right] \quad (1)$$

3.2 电能质量补偿的工作原理

电能质量补偿模式下,变流器的输出基波功率的参考值可表示为式(2)和式(3)^[15]。

V/V与YNd11牵引变压器接线方式下,有:

$$\begin{bmatrix} P_{c\alpha} \\ P_{c\beta} \\ Q_{c\alpha} \\ Q_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(P_{L\alpha} - P_{L\beta}) \\ -\frac{1}{2}(P_{L\alpha} - P_{L\beta}) \\ \frac{\sqrt{3}}{6}(P_{L\alpha} + P_{L\beta}) + Q_{L\alpha} \\ -\frac{\sqrt{3}}{6}(P_{L\alpha} + P_{L\beta}) + Q_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Scott与阻抗匹配平衡牵引变压器接线方式下,有:

$$\begin{bmatrix} P_{c\alpha} \\ P_{c\beta} \\ Q_{c\alpha} \\ Q_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(P_{L\alpha} - P_{L\beta}) \\ -\frac{1}{2}(P_{L\alpha} - P_{L\beta}) \\ Q_{L\alpha} \\ Q_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $P_{c\alpha}$ 、 $Q_{c\alpha}$ 分别为VSC_A应输出的有功功率和无功功率; $P_{c\beta}$ 、 $Q_{c\beta}$ 分别为VSC_B应输出的有功功率和无功功率; $P_{L\alpha}$ 、 $Q_{L\alpha}$ 分别为 α 相负载的总有功功率和无功功率; $P_{L\beta}$ 、 $Q_{L\beta}$ 分别为 β 相负载的总有功功率和无功功率。由单相瞬时功率的反变换可得, α 相和 β 相补偿电流的参考值 $i_{c\alpha PQ}$ 、 $i_{c\beta PQ}$ 为:

$$\begin{cases} i_{c\alpha PQ} = \frac{2u_\alpha P_{c\alpha} + 2u'_\alpha Q_{c\alpha}}{u_\alpha^2 + u_\alpha'^2} \\ i_{c\beta PQ} = \frac{2u_\beta P_{c\beta} + 2u'_\beta Q_{c\beta}}{u_\beta^2 + u_\beta'^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_α 为 α 相供电臂电压; u_β 为 β 相供电臂电压; u'_α 、 u'_β 分别为由 u_α 、 u_β 延时四分之一工频周期得到的电压。

4 基于三桥臂MMC结构的不断电过分相与电能质量补偿装置拓扑及数学模型

基于模块化多电平变流器结构的不断电过分相与电能质量补偿装置拓扑如图2所示。采用三桥臂结构,左桥臂的中点接至中性段,并通过断路器接至 α 相供电臂。右桥臂中点接至 β 相供电臂,中间桥臂中点接至钢轨。

三桥臂MMC拓扑仅有两个输出端口,因此,每个端口的输出电压均由两个桥臂电压相加得到,即

$$\begin{cases} U_{AG} = U_{AP} + U_{PG} \\ U_{BG} = U_{BP} + U_{PG} \end{cases} \quad (5)$$

式中, U_{AG} 和 U_{BG} 为装置输出电压; U_{AP} 、 U_{BP} 和 U_{PG} 分别为左上桥臂、右上桥臂和中上桥臂的电压。由于三个桥臂共用直流侧,且调制比相同,所以各个桥臂输出电压的最大有效值也相同。假定两牵引供电臂电压有效值均为 U ,机车额定负载电流有效值为 I_L ,功率因数为1。因此,对于V/V或YNd11接线变压器, $U_{AP} = U_{BP} = U_{PG} = \sqrt{3}U/3$;对于Scott和阻抗匹配平衡接线变压器, $U_{AP} = U_{BP} = U_{PG} = \sqrt{2}U/2$ 。

装置运行于过分相模式时的电压电流相量图如

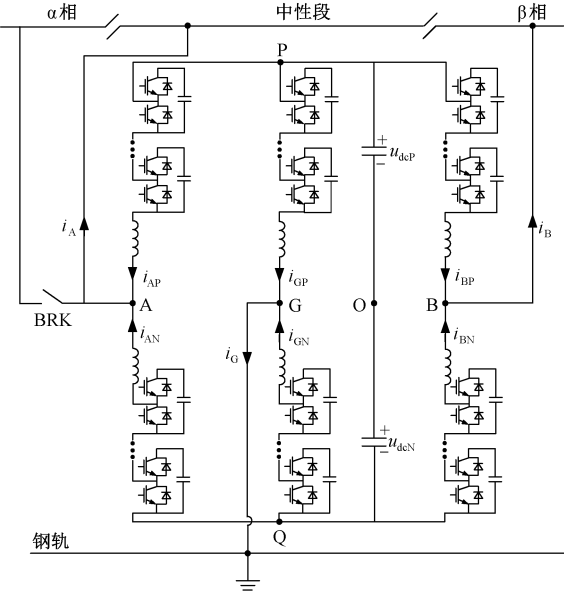


图2 不断电过分相与电能质量补偿装置拓扑
Fig. 2 Topology for uninterruptible phase-separation passing and power quality compensation device

图3所示。设机车由α相向β相行驶,当移相开始时,左上、右上及中上桥臂输出电压分别为 U_{AP} 、 U_{BP} 和 U_{PG} ,且 $U_{AP} = U_{BP} = U_{PG} = \sqrt{3}U/3$,输出电流分别为 I_A 、 I_B 和 I_G ,且 $I_A = I_B = I_G = I_L$ 。移相过程中, U_{AP} 的有效值和相位不断地变化,若牵引变压器为V/V或YND11接线, U_{AP} 的相移角度为 120° ;若牵引变压器为Scott或阻抗匹配接线, U_{AP} 的相移角度为 180° 。 U_{BP} 和 U_{PG} 的有效值和相位均不变。当移相完成时,左桥臂输出电压和电流完全等于右桥臂输出电压和电流,中间桥臂输出的电流减小到零。

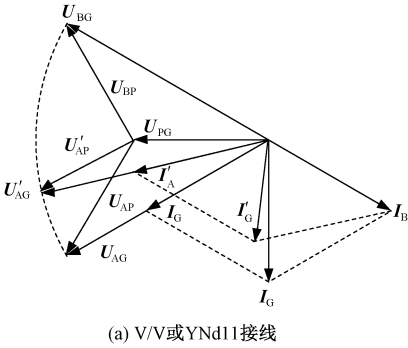
5 控制策略

基于三桥臂MMC拓扑的不断电过分相与电能质量补偿装置的控制目标如下。

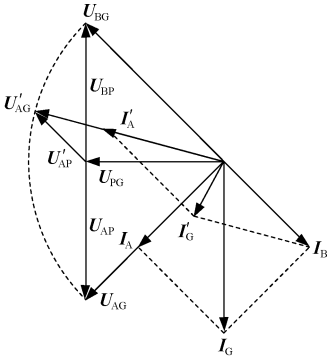
(1)当装置工作于过分相模式时,右桥臂变流器通过控制交流电流,从牵引供电臂吸收有功功率并传递至左桥臂。左桥臂按照移相的要求输出电压和电流,并为机车负载提供功率。当装置运行于电能质量补偿模式时,左右桥臂的电流按照式(4)输出电流,使得牵引变电站注入电力系统的负序电流最小。

(2)中间桥臂的电流等于左右两桥臂电流之和。

(3)公共直流电容电压保持稳定,各个子模块的直流电压相等。



(a) V/V或YND11接线



(b) Scott或阻抗匹配平衡接线

图3 MMC拓扑运行时的电压电流相量图
Fig. 3 Voltage and current vector diagram of MMC topology

为实现上述三个控制目标,可采用双闭环的控制策略,如图4所示。每个桥臂的控制策略均由外环、内环、脉冲生成及均压控制四部分组成。各个控制部分的具体功能及实现解释如下。

外环控制根据装置需要实现的各种控制目标,生成参考电流。对于右桥臂变流器,为了保证右桥臂各个子模块直流电压的稳定,必须从β相供电臂吸收有功功率,所以右桥臂子模块总直流电压控制环将各个子模块电压之和与参考值的差值经过比例积分环节,然后乘以β相供电臂电压 u_β 后变为基波有功电流。为了保持公共直流电容电压 u_{dcP} 和 u_{dcN} 为参考值,右桥臂必须向公共直流母线输出直流电流,所以公共直流电容电压控制环将公共直流电容电压与参考值的差值经过比例积分环节,然后经低通滤波器后的输出作为右桥臂参考电流中的直流分量。此外,当装置运行于电能质量补偿模式时,右桥臂输出电流还应包含式(4)中的 $i_{c\beta PQ}$ 。

对于左桥臂变流器,为了保证左桥臂各个子模块总直流电压的稳定,必须从公共直流母线吸收有功功率,所以左桥臂模块直流总电压控制环利用各个子模块电压之和与参考值的差值经过比例积分环节,作为左桥臂参考电流中的直流分量。为了实现

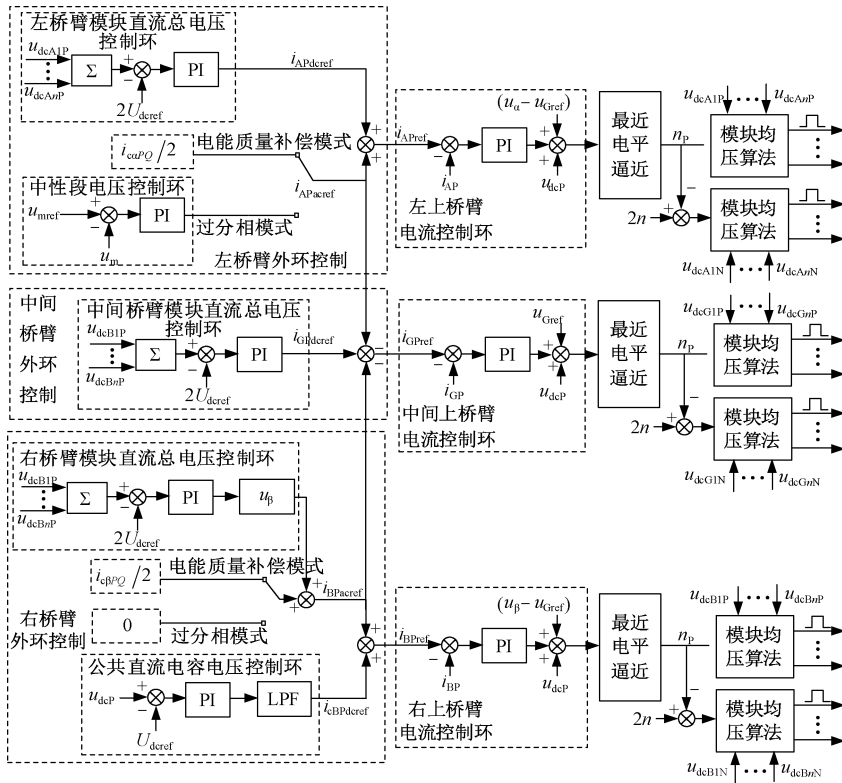


图4 三桥臂 MMC 拓扑的不断电过分相与电能质量补偿装置控制策略

Fig. 4 Control strategy of three-leg MMC topology for uninterruptible phase-separation passing and power quality compensation device

装置的功能,当装置运行于电能质量补偿模式时,右桥臂输出电流还应包含式(4)中的 i_{caPQ} 。当装置运行于不断电过分相模式时,还应保证中性段的电压跟踪参考值。所以,可利用中性段电压与参考值的差值经过比例积分环节,作为参考电流的一部分。

对于中间桥臂变流器,一方面要保证各子模块总直流电压跟踪参考值,另一方面要避免交流电流流入公共直流母线,因此可采用图4中的中间桥臂外环控制策略。

内环则根据参考电流与实际电流生成参考电压,因此各个桥臂电流控制都可以采用PI控制实现。脉冲生成环节根据参考电压生成变流器的输出电压。MMC拓扑采用最常用的最近电平逼近(Nearest Level Modulation, NLM)方式^[18]。均压控制则根据各个子模块的电容电压,排序生成各个模块IGBT的门极控制信号^[19,20]。

6 仿真结果

为了验证所提出的装置及控制策略的正确性,本节建立了PSCAD仿真模型。牵引变压器采用了V/V接线,机车由 α 相方向驶向 β 相。仿真中设定

0.3s开始进入电能质量补偿模式,0.5s机车准备进入中性段,0.6s进入起始过渡区,0.7s进入无电区,1.2s进入目标过渡区。1.3s离开中性段。仿真结果如图5和图6所示。

从图5可以看出,装置最初工作于电能质量补偿模式,输出所需的电流,使得系统三相电流对称,负序电流为4.4A。0.5s检测到有机车通过中性段时,左桥臂脉冲封锁,BRK断开,装置无输出电流,机车功率完全由 α 相供电臂直接提供,系统A相和C相电流相等,B相电流为零,系统负序电流增大至53.1A。0.7s机车完全进入中性段,装置从 β 相吸收功率传递至中性段,系统B相和C相电流相等,A相电流为零。1.2s时,机车进入目标过渡区,VSC_A脉冲封锁,1.3s时,机车离开中性段,BRK闭合,装置恢复到电能质量补偿模式,系统三相电流平衡。

图6为变频移相过程中装置的各种波形。从图6(a)可以看出,机车在0.7s进入无电区时,中性段电压出现了短暂的跌落,之后装置开始补偿,中性段电压等于 u_α , 0.8s时开始变频移相,1.05s完成移相,中性段电压变为 u_β 。从图6(b)可以看出,无论对于左桥臂还是右桥臂,左上、左下、右上、右下桥臂

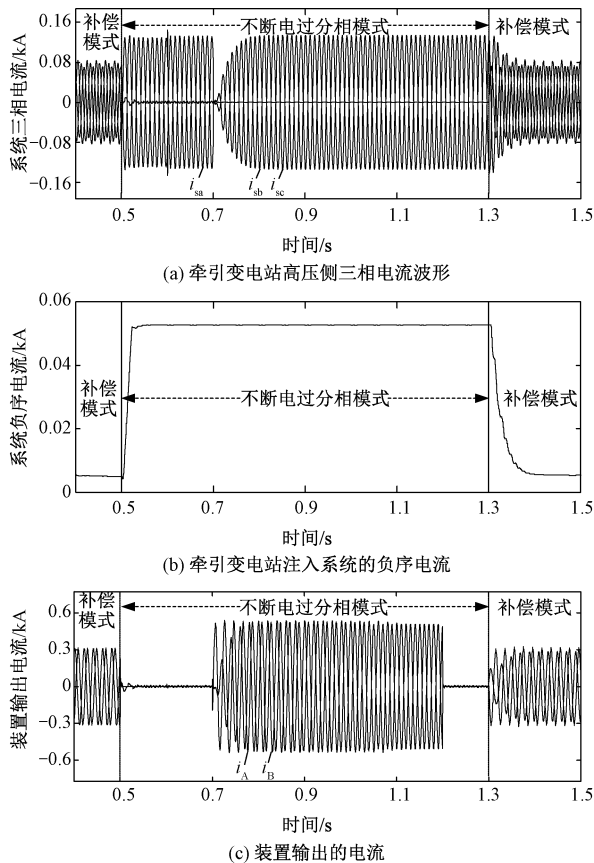


图5 整个仿真过程中系统三相电流、注入系统的负序电流及装置输出电流波形

Fig.5 System three-phase current, negative sequence current and device output current during entire simulation process

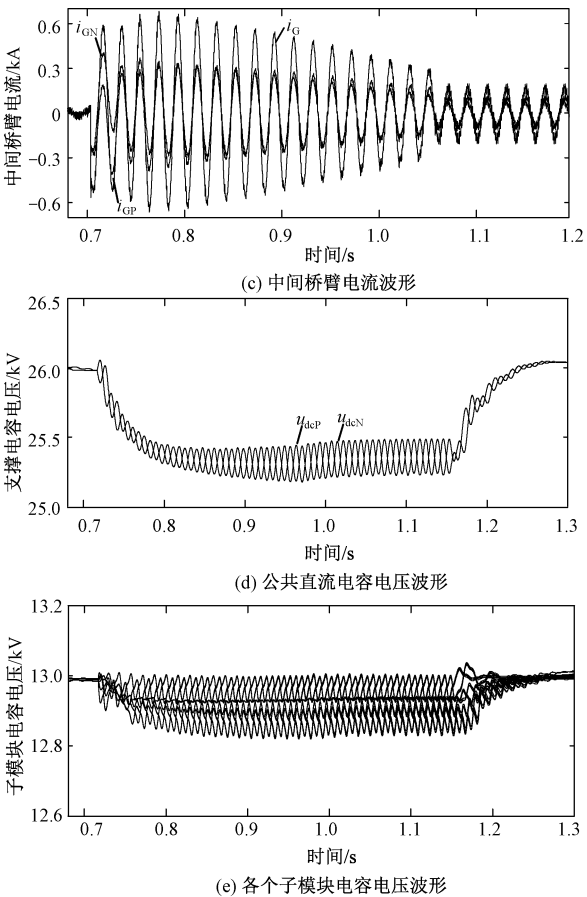
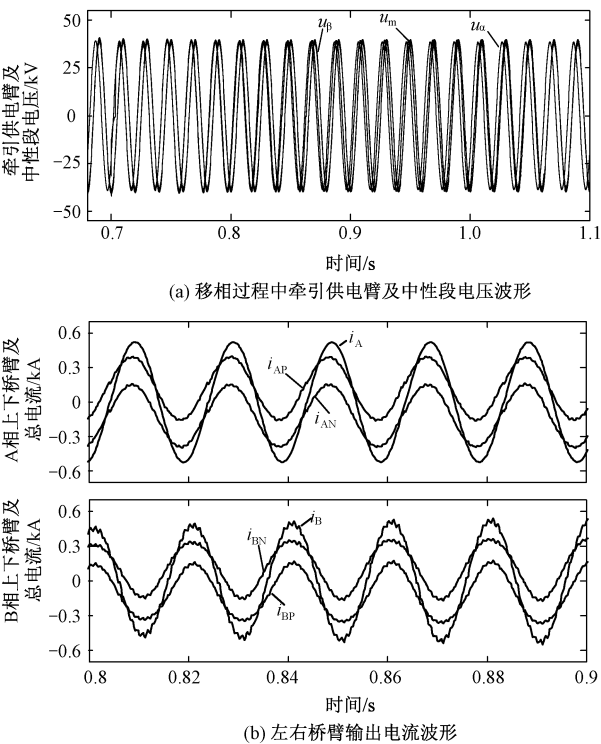


图6 移相过程中装置的各种波形

Fig.6 Simulation result of device during phase-shift period

电流 i_{AP} 、 i_{AN} 、 i_{BP} 、 i_{BN} 中不仅包含基波分量,还包含直流分量,基波分量的大小等于负载电流的一半,而直流分量的大小则等于负载功率除以公共直流母线电压。虽然上、下桥臂电流中均含有直流分量,但它们大小相等,方向相反,因此由上、下桥臂叠加得到的桥臂总交流输出电流 i_A 和 i_B 中仅含基波分量。从图6(c)中可以看出,由于中间桥臂不传递有功功率,所以中上和中和下桥臂电流只含基波分量。移相过程中电流逐渐减小,这也与理论分析的结果相一致。图6(d)和图6(e)表明,移相过程中,公共支撑电容及子模块的电容电压均能够跟踪参考值,并且子模块电容电压保持平衡,这就验证了控制算法的有效性。

7 结论

(1)提出一种新的不断电过分相与电能质量综合补偿装置。在有机车过分相时,使机车不断电、满功率、无速度损失地通过电分相;否则,能够对牵引变电站的电能质量进行综合补偿。对所提出装置的

系统配置及工作时序进行了分析。

(2)提出一种基于三桥臂模块化多电平变流器结构的装置拓扑,对拓扑的数学模型进行了分析,并设计了相应的控制策略。

(3)利用 PSCAD 仿真验证了所提出装置的正确性和有效性。由于所提出的装置能够有效解决电气化铁路存在的两大问题,所以具有很大的实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 李银生,陈唐龙,牛大鹏 (Li Yinsheng, Chen Tanglong, Niu Dapeng). 电力机车过分相电弧放电现象的研究与探讨 (Research and discussion on the phenomenon of arc discharging when locomotive pass phase-separation) [J]. 电气化铁道 (Electric Railway), 2008, (3): 21-23.
- [2] 陈朝珍 (Chen Chaozhen). 电力机车过电分相电气过程的机理分析 (The analyse on the course of electric motive passing through phase separation) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2007.
- [3] 冯大立 (Feng Dali). 郑西高速铁路自动过分相技术对动车组车载设备的影响分析 (Impact analysis on electric locomotive equipments of automatic passing phase-separation scheme in Zhengxi high speed railway) [J]. 铁路技术创新 (Railway Technical Innovation), 2011, 1 (1): 97-98.
- [4] 敖晓峰,刘仕兵 (Ao Xiaofeng, Liu Shibing). 车载断电自动过分相装置 (Automatic conversion system for locomotive) [J]. 电气化铁道 (Electric Railway), 2006, (2): 5-10.
- [5] 罗文骥,谢冰 (Luo Wenji, Xie Bing). 电气化铁道地面带电自动过分相系统技术的研究与应用 (Research and application on the technology of ground powered automatic passing through phase-separation system for electrified railway) [A]. 2008 年中国铁道学会牵引动力学术年会——动车组、大功率交流传动机车研讨会论文集 (Annual Academic Conference on Traction Power of China Railway Society, 2008 - Seminar Proceeding of CRH Train and High Power AC Locomotive) [C]. 2008. 27-33.
- [6] 魏晓娟,王洪涛,吴羽生 (Wei Xiaojuan, Wang Hongtao, Wu Yusheng). 开关并联电阻地面自动过分相方案研究 (Study of scheme for ground automatic passing over of articulated phase insulator with parallel resistance) [J]. 电气化铁道 (Electric Railway), 2011, (2): 5-8.
- [7] 刘冰,冉旺,李雄,等 (Liu Bing, Ran Wang, Li Xiong, et al.). 电子开关实现带电自动过分相的研究 (Research on power electronic switch used in the auto-passing neutral section with electric load) [J]. 电力电子 (Power Electronics), 2011, 11 (3): 26-29.
- [8] 董志杰 (Dong Zhijie). 地面自动过分相技术及方案研究 (Study of technology and scheme about ground automatic convert) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2004.
- [9] 刘建秀,谷明辉 (Liu Jianxiu, Gu Minghui). 一种新型车载自动过分相系统的改进设计 (Improvement design of a new-type on-board auto-passing the phase division system) [J]. 铁道机车车辆 (Railway Locomotive & Car), 2011, 31 (2): 64-67.
- [10] 赵凯,康惊涛,曲保章 (Zhao Kai, Kang Jingtao, Qu Baozhang). 一种新的车载自动过分相装置的设计与实现 (Design and realization of a new automatic on-board neutral-section passing device) [J]. 机车电传动 (Electric Drive for Locomotives), 2004, (1): 28-30.
- [11] 王术合 (Wang Shuhe). 高速动车组不断电自动过分相的研究 (Study of uninterruptible auto passing phase-separation scheme for high speed locomotive) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2012.
- [12] 何常红,吴广宁,张雪原,等 (He Changhong, Wu Guangning, Zhang Xueyuan, et al.). 世界高速电气化铁道电能质量现状及治理措施 (Power quality and countermeasures of world high speed railway) [J]. 电气化铁道 (Electric Railways), 2008, (1): 1-5.
- [13] 霍长龙 (Huo Changlong). 基于实测数据的重载电气化铁路电能质量分析 (Analysis of power quality of heavy haul electrified railway based on actual measurement data) [J]. 电力学报 (Journal of Electric Power), 2012, 27 (1): 27-30.
- [14] 田旭,魏应冬,姜齐荣 (Tian Xu, Wei Yingdong, Jiang Qirong). 基于模块化结构的电气化铁路统一电能质量控制器 (A railway unified power quality controller based on modular structure for electric railway) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (15): 101-106.
- [15] 魏应冬 (Wei Yingdong). 基于 STATCOM 技术的牵引变电站综合补偿控制研究 (Research on control of comprehensive compensation for traction substations based on the STATCOM technology) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2009.
- [16] 邱大强,李群湛,周福林,等 (Qiu Daqiang, Li Qunzhan, Zhou Fulin, et al.). 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电能质量综合治理 (Comprehensive power

- quality control of electric railway based on back-to-back SVG) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2010, 30 (6): 36-39, 44.
- [17] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬 (Tian Xu, Jiang Qirong, Wei Yingdong). 电气化铁路无断电过分相方案研究 (Research on novel uninterruptible phase-separation passing scheme in electrified railways) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (21): 14-18.
- [18] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇, 等 (Guan Minyuan, Xu Zheng, Pan Weiyong, et al.). 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算 (Analytical calculation of fundamental wave and harmonic characteristics for nearest level modulation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (5): 1327-1332.
- [19] 刘钟淇 (Liu Zhongqi). 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统研究 (Research on the VSC-HVDC based on modular multilevel converter) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2009.
- [20] 刘高任, 徐政, 薛英林, 等 (Liu Gaoren, Xu Zheng, Xue Yinglin, et al.). 基于动态冗余度的模块化多电平换流器子模块投入策略 (Optimized control strategy based on dynamic redundancy for modular multilevel converter) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (8): 2564-2571.

Research on railway novel uninterruptible phase-separation passing and power quality compensation device

TIAN Xu¹, JIANG Qi-rong², WEI Ying-dong², ZHAO Wei¹

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the problem of over-voltage and over-current when locomotive passing neutral section and negative current penetration by traction substation, this paper proposed a novel uninterruptible phase-separation passing and power quality compensation device, which can eliminate the power supply dead zone and make the locomotive passing neutral section without loss of power and speed. When there is no locomotive passing neutral section, it can reduce the negative current penetration into power system. The system configuration and working sequence are analyzed. Three-leg modular multilevel converter topology is studied and system and device level control strategies are designed. The correctness and effectiveness are verified through simulation.

Key words: uninterruptible phase-separation passing; power quality compensation; variable frequency phase-shift; modular multilevel converter; control strategy