

一种静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术

黄景光¹, 赵娇娇¹, 林湘宁^{1,2}, 申 涛¹, 罗亭然¹

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002;
2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对电力机车过分相区时主变压器励磁涌流对机车安全运行及牵引电网系统造成的不良影响,提出了一种静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术。该技术利用电力电子技术通过控制静态开关分合的时间来控制机车变压器原绕组侧的电压,使变压器铁心磁通在过零点及零点附近可允许范围内时实现开关的分合;并提出了一种静态开关可合闸范围确定方法,确定出静态开关的可合闸范围,使静态开关在该范围合闸时,机车主变压器不会产生励磁涌流。最后,利用所提方法建立了该静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制系统的仿真模型,仿真结果表明,电力机车在过分相区时,开关合闸瞬间电力机车主变压器没有产生励磁涌流,验证了所提方法的可行性。

关键词: 励磁涌流; 静态开关; 时间控制; 过分相区

DOI: 10. 12067/ATEEE1706018 **文章编号:** 1003-3076(2018)04-0070-07 **中图分类号:** U224

1 引言

在高速铁路交流牵引供电系统中,电力机车由单相接触网供电,机车在运行过程中,每过 25 ~ 50km 就要进行分区换相^[1,2]。地面开关式自动过分相区在地面设置传感器,将信号发送给控制系统,由地面开关操作完成电力机车过分相区。但由于采用真空断路器进行电分相切换,供电死区时间长^[3],而电力机车属于感性负载,真空开关合闸时,合闸瞬间主变压器可能产生较大的励磁涌流,从而引发变压器保护误动作等现象,这对牵引电网、机车变压器以及整个电力机车安全稳定运行都会造成不利影响^[4,5]。

目前国内外对电力机车过分相区的暂态过程做了相关的研究^[6-9]。针对机车主变压器产生合闸励磁涌流这一问题,文献[10]采用加装合闸电阻的方法,在地面开关转换之前将电阻接入,当系统稳定后再将电阻断开,从而达到抑制励磁电流的目的,但该方法不能从根本上完全抑制励磁涌流。文献[11]利用晶闸管串联阀组构成的电力电子开关、通过控制合闸角,实现地面切换时电压过零开通。文献

[12]根据电压相位,确定电力机车变压器投入的最佳时刻,但由于各种因素的不确定性,实现合闸角刚好在某一时刻合闸难度较大,该方法不能起到很好的抑制效果。

为此,本文提出了一种静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术。该技术通过控制静态开关分合来实现接触网与中性线的分合,并通过控制静态开关分合的时间,使机车在过分相区过程中,机车主变压器铁心磁通始终保持在一定范围内,不会超过产生励磁涌流所对应的磁通界限值,因此,机车出分相区静态开关合闸瞬间,机车主变压器不产生励磁涌流。最后,通过仿真验证了本文所提方法的可行性。

2 地面开关式自动过分相区励磁涌流机理分析

本文研究的地面开关式自动过分相区示意图如图 1 所示。真空开关 K1、K2 初始状态属于断开状态,当机车即将行驶到分相区时,开关 K1 闭合,中性线与供电臂 A 等电位;当机车进入分相区时,开关 K1 断开,经过短暂延时后,闭合开关 K2,中性线

收稿日期: 2017-06-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51607106)
作者简介: 黄景光(1968-),男,湖北籍,副教授,博士,研究方向为电力系统继电保护;
赵娇娇(1991-),女,湖北籍,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

与供电臂 B 等电位,机车实现了分区换相^[13]。中间这一短暂延时使机车处于失电状态,机车主变压器电源侧绕组电压为零,开关 K2 闭合瞬间,电源侧绕组电压从零突然升高,由于机车主变压器剩磁的影响及主磁通不能突变等情况,可能会导致变压器铁心严重饱和,产生较大的励磁涌流。此时,机车主变压器一次绕组总磁通为^[14]:

$$\phi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_r \quad (1)$$

式中, ϕ 为磁通值(Wb); $-\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为其稳态分量; $\Phi_m \cos \alpha + \Phi_r$ 为其非周期分量; Φ_m 为磁通幅值; α 为合闸时电压相位; Φ_r 为剩磁。

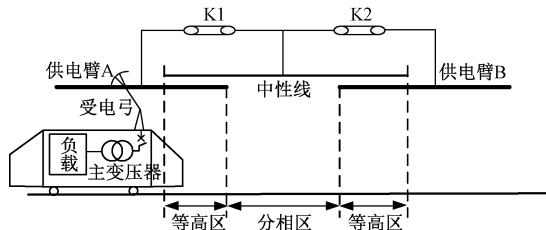


图1 地面开关式自动过分相区示意图

Fig. 1 Ground's auto-passing neutral section

若不计剩磁的影响,开关 K2 合闸初相角为 $\alpha = 0^\circ$ 时,磁通在合闸时最大可达到 $2\Phi_m$, 大于饱和磁通,此时机车主变压器会产生较大的冲击性励磁涌流,可能会引发电力机车主变压器差动保护误动等^[15],给机车运行带来不利影响。

3 消除励磁涌流的方法及控制策略

3.1 消除励磁涌流的技术方法

本文所提方法利用电力电子技术,通过控制静态开关的分合时间实现中性线上电压的转换,从而实现电力机车无冲击过分相区。静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术示意图如图 2 所示。整个系统主要由控制系统、静态开关、AD 采样、比例运算放大器、电压互感器等构成。

机车在过分相区之前,电压互感器 TV1、TV2 分别检测供电臂 A、供电臂 B 的电压,并将电压信息实时传输给控制系统。控制系统对该信息进行处理与判断,并根据判断结果,给静态开关发送相应跳闸或闭合的指令。当机车还未进入分相区时,控制系统根据采集的电压信息量对机车变压器的磁通进行分析判断。当机车进入分相区时,此时开关 K1 处于闭合状态,控制系统在变压器磁通过零点时刻,给静态开关 K1 发送跳闸命令,K1 断开,短暂延时后,通过预判断,在机车由供电臂 B 电压供电时,变压器

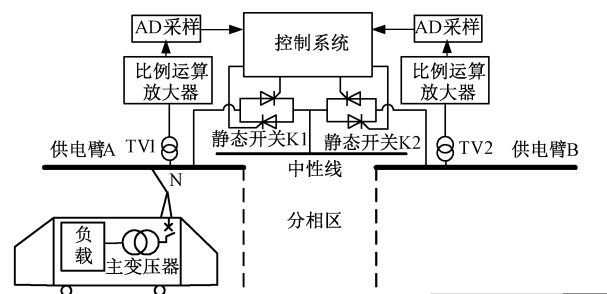


图2 静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术示意图

Fig. 2 Static switching control technique

磁通过零点时刻,给静态开关 K2 发送闭合命令。开关 K1 在磁通过零点断开,K1 断开后机车变压器铁心剩磁为零;开关 K2 在磁通过零点闭合,此时变压器磁通也为零,所以整个过程没有暂态磁通的产生,不会产生励磁涌流。

3.2 励磁涌流消除系统控制策略

3.2.1 静态开关控制策略

变压器电源侧励磁电流的大小取决于变压器铁心是否饱和及饱和程度,当铁心饱和后,励磁电流迅速增大,当电流增大到一定值时,形成励磁涌流。变压器近似磁化曲线如图 3 所示,其中 Φ_{sat} 为饱和磁通, I_{sat} 为对应的饱和电流。

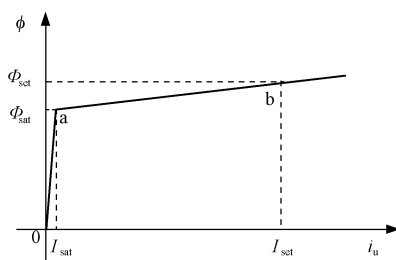


图3 变压器铁心近似磁化曲线

Fig. 3 Magnetic hysteresis loop of transformer core

由图 3 可知,当控制静态开关 K2 在铁心磁通为零点合闸时,励磁电流 i_u 很小,不会产生励磁涌流。但在实际运用中,由于控制系统及硬件设施的局限性,刚好在过零点完成分合是很难控制的。为了保证抑制系统的可靠性,可延伸到磁通过零点附近一定范围内完成静态开关的分合。

供电臂 A 电压供电时铁心磁通波形示意图如图 4 所示,设 Φ_{Amax} 为 K1 可断开的时间范围所对应的磁通临界值。供电臂 B 供电时变压器铁心磁通波形示意图如图 5 所示,设 Φ_{Bmax} 为 K2 可闭合的时间范围所对应的合闸初始磁通临界值。

假设,当 $|\phi| \leq |\Phi_{Amax}|$ 时,则满足开关 K1 断

开的条件。由于要使变压器在过零点时能实现灭弧,静态开关 K1 需在磁通过零点之前断开,由图 4 可知,一个周期内的 (t_1, t_2) 、 (t_3, t_4) 时间范围内,静态开关 K1 均可断开。

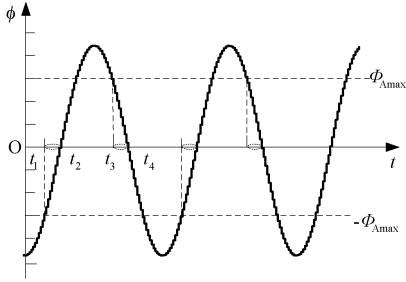


图4 供电臂 A 电压供电时铁心磁通波形图

Fig. 4 Magnetic flux waveform of core when arm A is being charged

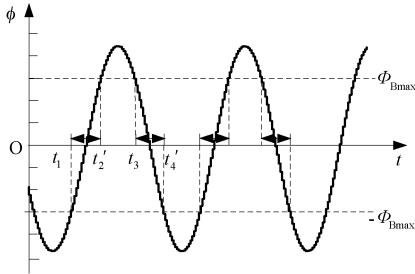


图5 供电臂 B 电压供电时铁心磁通波形图

Fig. 5 Magnetic flux waveform of core when arm B is being charged

当 $|\phi| \leq |\phi_{Bmax}|$ 时,则满足开关 K2 闭合条件。由图 5 可知,一个周期内的 (t_1, t_2') 、 (t_3, t_4') 时间范围,静态开关 K2 均可闭合。

由上述分析可知,只要确定 ϕ_{Amax} 、 ϕ_{Bmax} 的值,则可确定开关 K1 断开与 K2 闭合的具体时间范围。

3.2.2 静态开关可合闸范围的确定

设机车在过分相区开关 K2 合闸时,变压器允许的最大磁通为 ϕ_{set} , 对应的励磁电流为 I_{set} (见图 3)。如果磁通大于 ϕ_{set} , 则变压器会产生励磁涌流。设开关 K2 合闸时,机车变压器铁心总磁通为 ϕ , 有:

$$\phi \leq \phi_{set} \quad (2)$$

开关 K1 可断开时间范围内所对应的磁通临界值 ϕ_{Amax} , 即为开关 K2 合闸时变压器的最大剩磁, 因此合闸时变压器铁心的非周期分量的最大值 ϕ_{0max} 为:

$$\phi_{0max} = \phi_{Amax} + \phi_{Bmax} \quad (3)$$

由式(1)可知,铁心稳态磁通分量最大值为

ϕ_m , 因此变压器铁心总磁通的最大值 ϕ_{max} 为:

$$\phi_{max} = \phi_m + \phi_{Amax} + \phi_{Bmax} \quad (4)$$

由式(2)、式(3)得到 ϕ_{Amax} 、 ϕ_{Bmax} 、 ϕ_{set} 关系表达式为:

$$\phi_m + \phi_{Amax} + \phi_{Bmax} \leq \phi_{set} \quad (5)$$

由图 3 的磁化曲线可求出 ϕ_{set} 与 I_{set} 函数表达式。设图 3 中 ab 段磁化曲线的斜率为 k_{ab} , 则 ab 段的斜率方程为:

$$k_{ab} = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi} \quad (6)$$

式中, Δi 为单位时间内的电流增量; $\Delta \Phi$ 为单位时间内磁通的增量。

由此推出变压器允许的最大磁通 ϕ_{set} 的函数表达式:

$$\phi_{set} = k_{ab}(I_{set} - I_{sat}) + \phi_{sat} \quad (7)$$

由于 I_{sat} 很小,可忽略不计,有:

$$\phi_{set} = k_{ab}I_{set} + \phi_{sat} \quad (8)$$

I_{set} 可根据变压器继电保护的整定值来确定。当励磁电流大于继电器的整定值 I_{set1} 时,变压器保护就会误动作,所以励磁电流允许的最大值 I_{set} 不能超过继电器的整定值 I_{set1} 。

以变压器差动保护为例,继电器的整定值^[16]一般为:

$$I_{set1} = (0.2 \sim 0.5)I_N \quad (9)$$

式中, I_N 为流过变压器的额定电流。

则有: $I_{set} \leq I_{set1}$, 即

$$I_{set} \leq (0.2 \sim 0.5)I_N \quad (10)$$

为保证励磁涌流抑制系统的可靠性,本文以 $I_{set1} = 0.2I_N$ 确定励磁电流允许的最大值。最后由式(5)、式(8)得到 ϕ_{Amax} 、 ϕ_{Bmax} 、 ϕ_{set} 的具体关系表达式:

$$\phi_m + \phi_{Amax} + \phi_{Bmax} \leq k_{ab}(0.2I_N) + \phi_{sat} \quad (11)$$

考虑到时间分配问题,为了不使 K1 可断开时间过短,而 K2 可合闸时间过长;或 K1 可断开时间过长,而 K2 可合闸时间过短,可令 $\phi_{Amax} = \phi_{Bmax}$ 。这样既保证了系统的可靠性,又降低了系统控制复杂度。

由于该励磁涌流抑制系统采集的是电压信息量,需根据电压与磁通的相位关系,确定开关合闸或断开时间范围内对应的电压相位。

设电压互感器 TV1 采集到供电臂 A 的电压 u_{AC} 为:

$$u_{AC} = U_m \sin \omega t \quad (12)$$

由于供电臂 A 与供电臂 B 的相位相差 $\pm 60^\circ$, 这里设电压互感器 TV2 采集到供电臂 B 的电压 u_{BC} 为:

$$u_{BC} = U_m \sin(\omega t - 60^\circ) \tag{13}$$

根据电磁感应定律,变压器原绕组的感应电势 e_1 与磁通 ϕ 的关系如下:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \tag{14}$$

式中, N_1 为线圈匝数。

设主磁通的变化规律为:

$$\phi = \phi_m \cos \omega t \tag{15}$$

式中, ϕ_m 为主磁通的最大值。

由式(14)、式(15)可知:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_1 \omega \phi_m \sin \omega t \tag{16}$$

由式(16)可知,感应电势在时间相位上滞后主磁通 90° 。

以 K2 合闸为例,假设计算出变压器铁心磁通为过零点及过零点附近 $\pm \theta$ 范围内时可合闸,则电压互感器 TV2 检测到供电臂 B 电压为峰值及峰值附近 $\pm \theta$ 范围则是 K2 合闸的范围。

考虑电力机车在实际运行中,当控制系统给静态开关发送跳闸或闭合命令时,静态开关动作有短暂延时,所以可根据实际测量得出静态开关动作的延时时间 Δt ,则控制系统发送命令的时间可根据实际情况提前 Δt 。

为保证电力机车换相时,静态开关完成分合的精度,确保换相的精确性,则有:

$$t_x = t_n + \Delta t \tag{17}$$

式中, t_x 为静态开关实际分合时间; t_n 为给静态开关发送合闸命令对应的时间。当在 t_n 时刻控制系统发送命令给静态开关,在 t_x 时刻可确保机车刚好完成换相,其中, t_n 为变压器可合闸的时间范围内的任意时间值,此时可实现电力机车平滑过渡,不会产生励磁涌流。

4 仿真

为了验证本文所提出方法的正确性,本文以 Matlab/Simulink 为平台建立地面开关自动过分相区励磁涌流抑制技术系统仿真模型,分别对电力机车传统过分相区方法和采用地面开关式自动过分相区励磁涌流抑制方法进行仿真。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Parameters of simulation system

参数	数值
供电臂 A 电压/kV	27.5
供电臂 B 电压/kV	27.5
换相前后频率/Hz	50
变压器电压变比	27.5kV/1kV

4.1 K1 断开、K2 闭合时间范围的确定

通过表 1 仿真参数,计算得到 $\Phi_{set} = 1.73 \Phi_m$, 其中,变压器磁化曲线参数: $[0, 0; 0.00024, 1.2; 1.0, 1.52]$, $\Phi_{sat} = 1.2 \Phi_m$, 由式(6)得到 k_{ab} 为 0.321A/Wb 。所以理论上开关 K2 合闸时,变压器总磁通 ϕ 不能超过 Φ_{set} , 保守可取 $\phi_{max} = 1.70 \Phi_m$, 则 $\Phi_{Amax} = \Phi_{Bmax} = 0.35 \Phi_m$ 。通过大量仿真验证,确定合闸时变压器总磁通 ϕ 可以取为 $\phi_{max} = 1.70 \Phi_m$, 所以只要 K2 合闸时变压器总磁通 $\phi \leq \Phi_{set}$, 均可满足合闸条件。

在上述仿真参数下,通过计算可知,在磁通过零点附近 $\pm 0.0012 \text{s}$ 可以实现静态开关控制的机车变压器励磁涌流抑制技术,即零点附近 $\pm 20.8^\circ$ 都能满足合闸条件。但考虑到 K1 断开时,变压器过零点时要实现灭弧,所以 K1 断开的的时间应为磁通过零点之前 $(0^\circ, 20.8^\circ)$ 范围内。K2 闭合范围为零点附近 $\pm 20.8^\circ$ 均可。在上述范围内对静态开关进行断开或闭合不会产生励磁涌流。一个周期中的铁心磁通波形图如图 6 所示。

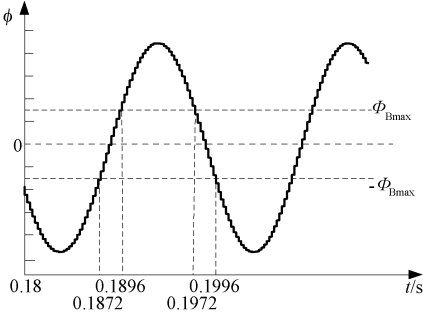


图 6 供电臂 B 电压供电时 0.1834 ~ 0.2034s 一个周期内铁心磁通波形图

Fig. 6 Magnetic flux waveform of core in one cycle when arm B is being charged

图 6 中,在 0.1834 ~ 0.2034s 这一个周期里,当 $|\Phi_{max}| \leq 0.35 |\Phi_m|$ 时变压器都不会产生励磁涌流,对应时间段 0.1872 ~ 0.1896s、0.1972 ~ 0.1996s 内的值都满足 K2 闭合条件。

4.2 励磁电压、电流及磁通的仿真

励磁涌流抑制系统没有投运时,即不控制静态开关的分合时间,在任意某点进行换相,如开关在0.16s时断开K1,在0.1940s闭合K2,主变压器励磁电压 u_1 、励磁电流 i_u 及铁心磁通 ϕ 的波形如图7所示。

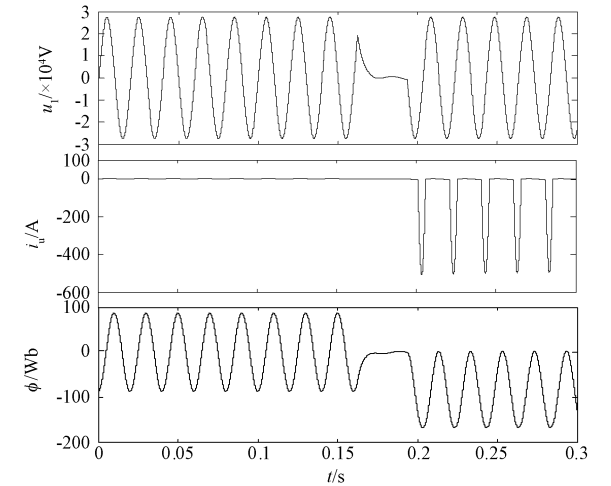


图7 未控制开关分合时间变压器励磁电压、励磁电流、铁心磁通波形
Fig.7 Excitation voltage, current and flux waveform of transformer under uncontrolled-switching time

由图7可以看出,机车在进入分相区之前机车变压器电压 u_1 与供电臂A电压 u_{AC} 相等,0.16s当开关K1断开后,中性线处于失电状态,主变压器一次侧电压 u_1 约为0,在0.1940s时闭合开关K2,机车变压器的电压为供电臂B电压 u_{BC} 。在K2合闸时,磁通较大,波形发生了偏离。由图7的机车变压器励磁电流可见,机车出分相区合闸时,励磁电流幅值瞬间达到近600A,有很大的励磁涌流。

控制静态开关的分合时间,使在零点附近允许的时间点合上开关,如开关在0.16s时,断开K1,在0.1974s闭合K2,主变压器励磁电压 u_1 、励磁电流 i_u 及铁心磁通 ϕ 的波形如图8所示。

由图8可以看出,0.16s断开K1,0.1974s合上K2,此时磁通发生了一些偏离,但未完全偏离,没有产生励磁涌流,表明此时的铁心磁通没有达到 Φ_{set} 。为了达到更好的抑制效果,可将范围减小,严格控制静态开关在零点附近闭合,此时的主变压器励磁电压 u_1 、励磁电流 i_u 及铁心磁通 ϕ 的波形如图9所示。

磁通过零点时,闭合开关K2,由图9可以看出,此时变压器励磁电流的幅值没有发生任何偏离,没

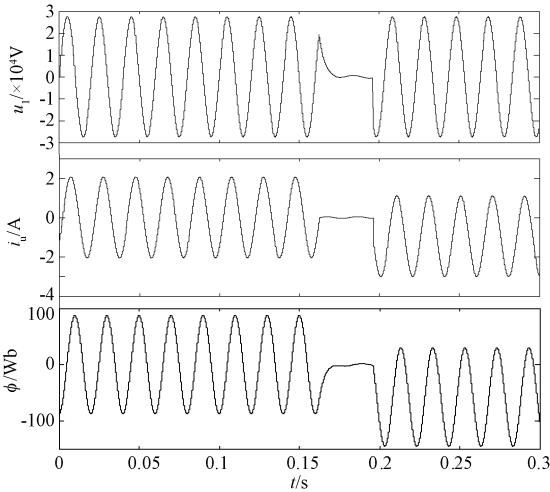


图8 控制开关分合时间时变压器励磁电压、励磁电流、铁心磁通波形
Fig.8 Excitation voltage, current and flux waveform of transformer under controlled switching time

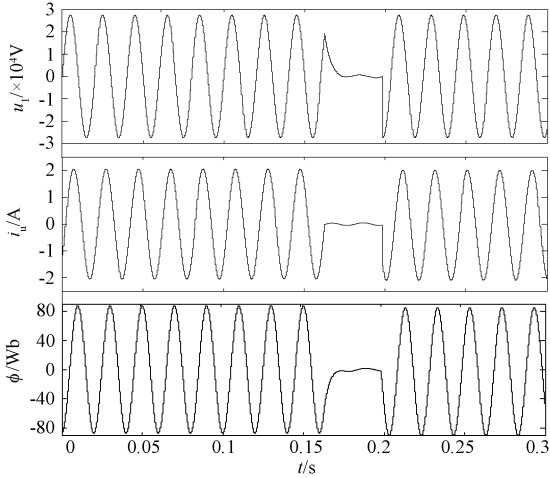


图9 控制磁通过零点开关分合时变压器励磁电压、励磁电流、铁心磁通波形
Fig.9 Excitation voltage, current and flux waveform of transformer when controlled switching at the time 0

有励磁涌流产生。综上所述,当开关K2合闸时,变压器总磁通在 $\phi \leq \Phi_{set}$ 所对应的时间范围内,此时变压器不会产生励磁涌流,磁通过零点时抑制效果最好。当总磁通在 $\phi > \Phi_{set}$ 所对应的时间范围时,则会产生冲击性励磁涌流。表明地面静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术系统能够有效消除励磁涌流。

5 结论

本文针对电力机车过分相区时机车变压器产生

合闸励磁涌流对机车和牵引网产生的不良影响,提出了由静态开关及电力电子元件组成的静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术。通过控制静态开关分合的时间,来实现电力机车无冲击换相。经过分析和仿真,得到如下结论:

(1)提出的静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术能够有效抑制电力机车主变压器励磁涌流的产生,提高了牵引系统和机车运行的稳定性和可靠性,避免了励磁涌流直流分量和高次谐波分量对牵引网电能质量造成的不良影响。

(2)本系统采用静态开关代替传统的真空开关,避免了真空开关分合的不精确性,通过准确控制开关时间,能够实现电力机车无冲击换相。

(3)本文提出的静态开关控制的电力机车励磁涌流抑制技术,中性线上一直处于带电状态,电力机车过分相区时,可确保电力机车不断电运行,确保了电力机车的运行速度,同时也避免了失电对电力机车造成的危害。

参考文献 (References):

- [1] 冉旺, 郑琼林, 杜玉亮, 等 (Ran Wang, Zheng Qionglin, Du Yuliang, et al.). 过分相不间断供电列供系统过电压抑制研究 (Study of over-voltages elimination with uninterruptible power supply of auxiliary power supply system) [J]. 铁道学报 (Journal of the China Railway Society), 2016, 38 (9): 46-51.
- [2] 杜玉亮 (Du Yuliang). 列车辅助系统不断电技术研究 (Research on uninterrupted power supply technology for the auxiliary system of electrical locomotives) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2016.
- [3] 王凯东, 王毅, 张明志 (Wang Kaidong, Wang Yi, Zhang Mingzhi). 12kV 真空断路器半双稳态永磁机构的设计 (Design of half bistable permanent magnetic actuator used in 12kV vacuum circuit breaker) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (4): 29-36.
- [4] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等 (Ge Wenqi, Wang Youhua, Chen Xueguang, et al.). 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法 (Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (16): 10-16.
- [5] 姜晓峰, 何正友, 胡海涛, 等 (Jiang Xiaofeng, He Zhengyou, Hu Haitao, et al.). 高速铁路过分相电磁暂态过程分析 (Analysis on electromagnetic transient process of electric multiple unit passing neutral section devices) [J]. 铁道学报 (Journal of the China Railway Society), 2013, 35 (12): 30-36.
- [6] 欧阳乐成, 吴广宁, 高国强, 等 (Ouyang Lecheng, Wu Guangning, Gao Guoqiang, et al.). 车载真空断路器操作过电压及其保护研究 (Study on vehicle-mounted vacuum circuit breaker switching overvoltage and its protection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 87-91.
- [7] 范兴明, 葛琳, 张鑫, 等 (Fan Xingming, Ge Lin, Zhang Xin, et al.). 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析 (Analysis and simulation of power transformer inrush current based on the phase selection switch technology) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2014, 50 (2): 54-59.
- [8] 仇龙刚, 周福林, 张永岚, 等 (Qiu Longgang, Zhou Fulin, Zhang Yonglan, et al.). 基于 PSCAD 的机车过分相过电压及抑制方法仿真研究 (Simulation research of over-voltages of the locomotive during passing phase insulator based on PSCAD) [J]. 电力学报 (Journal of Electric Power), 2014, 29 (1): 451-456.
- [9] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬, 等 (Tian Xu, Jiang Qirong, Wei Yingdong, et al.). 基于两相式模块化多电平变流器的电气化铁路不断电过分相装置拓扑研究 (Two-phase modular multilevel converter topology study of railway uninterruptible phase-separation passing device) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (10): 2901-2906.
- [10] 谢曲天 (Xie Qutian). 电力机车过分相电磁暂态过程研究 (Research on magnetic transient for the passing neutral section of electric locomotive) [D]. 衡阳: 南华大学 (Hengyang: University of South China), 2015.
- [11] 冉旺, 李雄, 刘冰, 等 (Ran Wang, Li Xiong, Liu Bing, et al.). 地面自动过分相中开关切换的瞬态过程研究 (Research on transient process of ground's auto-passing neutral section at switching time) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (11): 150-155.
- [12] 罗礼全, 王毅, 常广 (Luo Liquan, Wang Yi, Chang Guang). 电力机车自动过分相区涌流分析 (Analysis of inrush current during auto-passing phase of electric locomotive) [J]. 北京交通大学学报 (Journal of Beijing Jiaotong University), 2011, 35 (6): 57-61.
- [13] 李占元, 张伟红, 杜秀红 (Li Zhanyuan, Zhang Weihong, Du Xiuhong). 预充磁绕组在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的应用实例 (Applied example of pre-magnetizing winding in suppression of no-load switch-

hing magnetizing inrush current of transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2013, 50 (3): 34-40.

[14] 曾耀吾, 李晓松, 陈萌, 等 (Zeng Yaowu, Li Xiaosong, Chen Meng, et al.). 机车牵引变压器空载合闸励磁涌流特性分析 (Magnetizing inrush current characteristics of locomotive traction transformer no-load switching) [J]. 电力科学与技术学报 (Journal of Electric Power Science and Technology), 2013, 28 (4): 19-24.

[15] 周廷冬, 徐永海 (Zhou Tingdong, Xu Yonghai). 基于 MMC 的配电网电力电子变压器故障特性分析 (Fault characteristic analysis of power electronic transformer based on MMC in distribution network) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 34-41.

[16] 张保会, 尹项根 (Zhang Baohui, Yin Xianggen). 电力系统继电保护 (Power system protective relaying) [M]. 北京: 中国电力出版社 ((Beijing: China Electric Power Press), 2009.

Static switching control technique for suppressing inrush current of electric locomotive

HUANG Jing-guang¹, ZHAO Jiao-jiao¹, LIN Xiang-ning^{1,2}, SHEN Tao¹, LUO Ting-ran¹

(1. Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For electric locomotive passing neutral section system, the magnetizing inrush current has adverse effect on the electric locomotive itself. A static switching control technique for suppressing inrush current of electric locomotive is proposed. Power electronic technology is used to control the voltage on the primary winding side of the locomotive transformer by controlling the timing of the static switch. When the magnetic flux of the transformer core is near the zero point and at the zero point, the switch can be open or closed. Besides, a method for judging the switching range of a static switch is proposed which can determine the switching range of the static switch. When the static switch is switched on in the range, the main transformer of the locomotive will not generate excitation inrush current. Using the proposed method, the simulation model of electric locomotive transformer for passing neutral section is established, and the simulation results show that when the electric locomotive is in excessive phase, there is no excitation inrush current, and this system can effectively inhibit the switching inrush current generation, and verify the effectiveness of this method.

Key words: excitation inrush current; static switch; time control; passing neutral section