

DOI: 10.7667/PSPC180110

电力机车励磁涌流消除系统的研究

黄景光¹, 赵娇娇¹, 林湘宁^{1,2}, 申涛¹, 罗亭然¹

(1.三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 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合闸励磁涌流对电力机车及牵引网的电能质量造成的影响, 提出了一种基于大功率电力电子技术的电力机车励磁涌流消除系统原理, 并提出了同相调幅法和变频移相法两种 PWM 调制电压算法。该系统通过控制新型大功率电力电子电路整流、逆变、变频模式及机车变压器不同时刻励磁电压, 实现电力机车无冲击平滑换相通过分相区, 在出分相区合闸瞬间不产生冲击性励磁涌流。利用所提方法建立了该电力机车变压器分区换相系统的仿真模型。通过仿真分析表明, 所提出的两种电压调制算法, 均能有效抑制合闸励磁涌流的产生, 验证了所提方法的可行性。

关键词: 抑制励磁涌流; 分区换相; 电压调制; 同相调幅; 变频移相

Research of inrush current elimination system of the electric locomotive

HUANG Jingguang¹, ZHAO Jiaojiao¹, LIN Xiangning^{1,2}, SHEN Tao¹, LUO Tingran¹

(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 both on the electric locomotive itself and the power quality of traction power system. A new principle of electric locomotive inrush current elimination system based on high power electronic technology is proposed, meanwhile two kinds of PWM modulation voltage algorithms, namely cophase amplitude modulation and frequency conversion phase shift, are presented. By controlling the new high power electronic circuit rectifier, inverter, frequency conversion mode and locomotive transformer excitation voltage at different times, it achieves electric locomotive non-inrush passing neutral section and removes the inrush current when the transformers are switched on. Using the proposed method, the simulation model of electric locomotive transformer for passing neutral section is established. Simulation results show that two kinds of voltage modulation algorithms can effectively inhibit the switching inrush current generation, verifying the effectiveness of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106).

Key words: suppress inrush current; passing neutral section; modulation voltage; cophase amplitude modulation; frequency conversion phase shift

0 引言

电力机车牵引系统采用分相区供电, 机车在运行时每隔一定距离就要进出分相区换相。机车变压器在出分相区其断路器合闸瞬间会产生较大的励磁涌流^[1-2], 可能导致同一供电区段的相邻机车主变

器及牵引网变压器产生相应的和应涌流^[3-4]。变压器励磁涌流可能导致其继电保护误动作, 其产生的非周期分量及高次谐波会对牵引网的电能质量造成不利影响^[5], 并对通信系统、地区电网电能质量等造成危害。

目前, 国内外对电力机车过分相区的暂态过程的研究主要集中在电力机车过电分相区时, 主断路器分闸所产生的牵引主变压器截流过电压及机车惰

行通过分相区时的暂态过电压^[6-8],对机车合闸励磁涌流抑制方法研究,主要有控制变压器合闸角、加装合闸电阻及改变变压器结构等方法^[9-12],文献[13]通过控制合闸角使铁芯磁通的稳态强制分量初始值等于剩磁通大小,从而减小励磁涌流。文献[14]通过建立剩磁-电流关系模型,采用直流法削弱剩磁,达到减小涌流的目的。文献[15]采用一种基于二阶欠阻尼电路和分压器组成的涌流抑制器,用来消除变压器合闸时刻出现的励磁涌流。这些方法能一定程度减少励磁涌流的大小,但不能完全抑制励磁涌流的产生。

本文提出一种电力机车励磁涌流消除系统,该系统能够完全消除电力机车过分相区时主变压器合闸励磁涌流。分析了过分相区时电力机车主变压器产生合闸励磁涌流的机理,提出了消除电力机车主变压器合闸励磁涌流原理。并针对该系统提出了两种 PWM 调制电压算法:同相调幅法和变频移相法,建立了电力机车励磁涌流消除系统模型,通过仿真验证了本文消除电力机车主变压器合闸励磁涌流原理方法的有效性和可行性。

1 过分相区励磁涌流产生机理分析

电力机车在进出分相区时,会经历短暂的失电和复电过程。如图 1 所示,机车进入分相区瞬间,机车主变压器与牵引网供电臂 a 断开,机车处于失电状态;出分相区瞬间主断路器合闸,机车主变压器与供电臂 b 连接,重新受电,机车主变压器电压由 u_{ac} 切换至 u_{bc} ,或由 u_{bc} 切换至 u_{ac} ;在电压突变的暂态过程中,机车主变压器绕组磁通不能突变^[16-17],其一次绕组总磁通为

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

式中: φ 为绕组磁通; Φ_m 为磁通幅值; Φ_r 为铁芯剩磁通; α 为合闸瞬间电压初始相位。

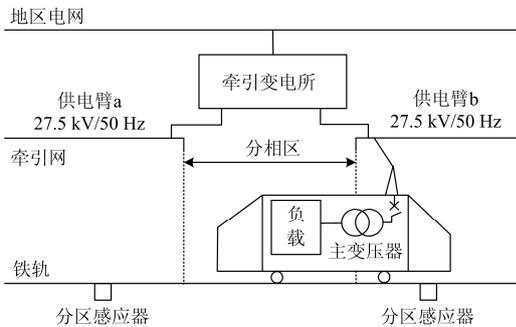


图 1 电力机车过分相区示意图

Fig. 1 Diagram of electric locomotive passing neutral section system

若电力机车出分相区时,机车主断路器合闸瞬间,电压刚好过零点,则根据式(1),合闸半个周期后,变压器铁芯磁通将达到最大值 $2\Phi_m + \Phi_r$,会导致铁芯严重饱和,产生励磁涌流,其值能达到变压器额定电流的几倍甚至十几倍^[18-20],造成机车主变压器继电保护误动作,并可能导致该分区牵引变电所主变压器产生较大的和应涌流^[21-22]。

2 抑制过分相区励磁涌流的方法

2.1 抑制励磁涌流的措施

电力机车从一个分区进入另一个分区,会经过短暂的停电,机车变压器电压由 u_{ac} 切换到为 u_{bc} ,相位变换 60° ,相位差 $\theta = \pi/3$ 。电力机车励磁涌流消除系统原理示意图如图 2 所示。

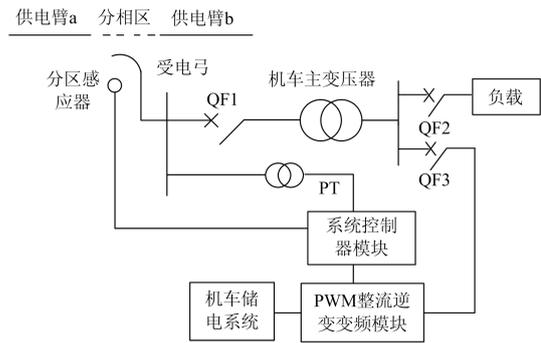


图 2 励磁涌流消除系统示意图

Fig. 2 Diagram of inrush current elimination system

机车在从一个区段到另一个区段之前,根据分区感应器的位置,锁存数个工频周期的本区段电压采样值,以此作为参考电压,根据本区段电压与下一区段电压的幅值相位关系,计算出调制电压。机车进入分相区时,根据 PWM 调制电压,通过控制 PWM 整流逆变变频模块电压的输出来实现电压幅值和相位的变换。机车在出分相区闭合主断路器之前,已经实现主变压器电压与下一个供电臂电压相位一致,满足同期合闸条件,然后保持该同期合闸条件继续运行,当出分相区时主断路器合闸,实现电压相位平滑变换,不产生励磁涌流。

2.2 PWM 逆变器控制的调制电压算法

电力机车进入分相区,通过 PWM 调制电压给机车主变压器施加励磁电压。本文提出了两种调制电压算法:同相调幅法和变频移相法。1) 同相调幅法:给机车变压器施加与下一区段供电臂 b 电压 u_{bc} 相位相同的励磁电压,通过改变励磁电压的幅值,机车出分相区之前其幅值从零逐渐上升到电压 u_{bc} 幅值,同相调幅法示意图如图 3 所示。2) 变频移相法:给机车变压器施加与供电臂 b 电压 u_{bc} 幅值大小

相等的励磁电压；通过改变励磁电压的频率来改变其相位，使机车变压器电压相位在出分相区之前与供电臂 b 电压 u_{bc} 相位一致，变频移相法示意图如图 4 所示。

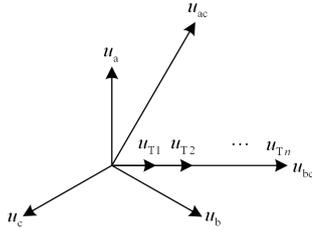


图 3 同相调幅法示意图

Fig. 3 Method of cophase amplitude modulation

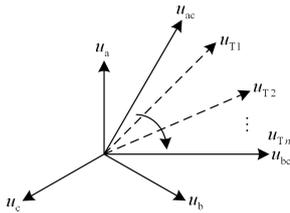


图 4 变频移相法示意图

Fig. 4 Method of frequency conversion phase shift

2.2.1 同相调幅法

电力机车进行换相，从 u_{ac} 切换至 u_{bc} ，或者 u_{bc} 切换至 u_{ac} ，相位变化一般为 $\pi/3$ ，即供电臂 a 相电压超前供电臂 b 相电压 $\pi/3$ 或滞后 $\pi/3$ 。

若本段为供电臂 a 供电，下一段为供电臂 b 供电，则本段电压为

$$u_{ac} = U_m \sin(\omega_0 t + \delta) \quad (2)$$

下一段电压滞后 60° ，则下一段供电臂 b 电压为

$$u_{bc} = U_m \sin\left(\omega_0 t + \delta - \frac{\pi}{3}\right) \quad (3)$$

变幅值后的电压为

$$u_{new} = U_1 \sin\left(\omega_0 t + \delta - \frac{\pi}{3}\right) \quad (4)$$

其中 U_1 是关于时间 t 的函数，如式(5)所示。

$$U_1 = \frac{U_m}{t_1} t \quad (5)$$

图 5 是给机车变压器施加励磁电压幅值随时间的变化图，设进入分相区时，时间为 0 s，在 t_1 时刻完成电压调制，整定换相时间为 t_2 ，其中 $t_1 < t_2$ 。

由 u_{ac} 的初相角计算出电压 u_{new} ，根据 u_{new} 进行电压调制，给主变压器施加上述励磁电压，确保励磁电压相位输出与下一区段供电臂电压相位一致，电压幅值从 0 kV 上升到额定电压。合闸瞬间变压器

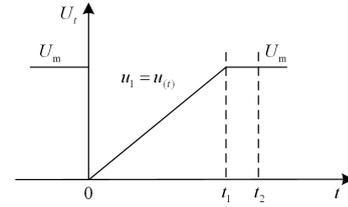


图 5 同相调幅法幅值变化示意图

Fig. 5 Amplitude variations of cophase amplitude modulated method

铁芯已提前建立与下一区段供电臂电压幅值、相位一致的磁场，不会因换相、恢复电压而产生励磁涌流。

2.2.2 变频移相法

设供电臂 a 和供电臂 b 的工频角频率均为 ω_0 ，电力机车在分相区内，通过改变角频率，实现平滑无冲击换相。进入分相区内工频角频率为 ω_1 ，电力机车在分区换区间使频率从工频角频率 ω_0 微变为 ω_1 。在 t_1 时刻完成电压调制，整定换相时间设为 t_2 ，以电压从 u_{ac} 相切换至 u_{bc} 相为例。

换相前电压为

$$u_{ac} = U_m \cos(\omega_0 t + \delta) \quad (6)$$

变频后的电压为

$$u_{new} = U_m \cos(\omega_1 t + \delta) \quad (7)$$

t_1 时间内两者的相位差为

$$\theta = \omega_1 t + \delta - (\omega_0 t + \delta) = \omega_1 t - \omega_0 t \quad (8)$$

式中， ω_1 是关于时间 t 的函数，则相位差 θ 的函数表达式为

$$\omega_1 = \omega(t) \quad (9)$$

$$\theta = \int_0^{t_1} \omega_1(t) dt - \omega_0 t_1 \quad (10)$$

以一次函数为例：

$$\omega(t) = \begin{cases} k_1 t + \omega_0 & 0 \leq t \leq t_0 \\ k_2 t + \omega_0 - k_2 t_1 & t_0 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (11)$$

两个约束条件为

$$\begin{cases} w(t_0) = \frac{2\pi}{3t_1} + w_0 \\ k_1 = k_2(1 - \frac{t_1}{t_0}) \end{cases} \quad (12)$$

得出一次函数表达式为

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{2\pi}{3t_0 t_1} t + \omega_0 & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{2\pi}{3t_1(t_0 - t_1)} t + \omega_0 - \frac{2\pi}{3(t_0 - t_1)} & t_0 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (13)$$

由 $\omega(t)$ 与 $y = \omega_0$ 所围成图形的面积即为相位差

θ 关于 t 的函数, 如图 6 所示。

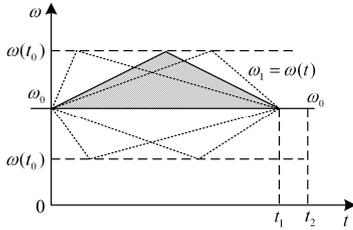


图 6 变频移相法电压相位变换示意图
Fig. 6 Voltage phase variations of frequency conversion phase shift method

假设令 $t_1 = 0.2 \text{ s}$, $t_0 = 0.1 \text{ s}$, $\omega_0 = 100\pi$, 则 ω_1 的函数表达式为

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{100\pi}{3}t + 100\pi & 0 \leq t \leq t_0 \\ -\frac{100\pi}{3}t + 100\pi + \frac{20\pi}{3} & t_0 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (14)$$

如图 6 所示的阴影部分即为电力机车过分相区 t_1 时间内 u_{ac} 与 u_{bc} 的相位差 θ 。

电力机车在牵引网供电臂 a 相区时, 由 u_{ac} 的初相角计算出电压 u_{new} , 根据 u_{new} 进行电压调制。给机车主变压器施加上述变频的励磁电压, 并在短暂的整定延时后切换回工频频率。这时变压器电压的相位已经与供电臂 b 电压完全一致, 不会产生合闸励磁涌流。

采用以上电压调制方法, 可以在机车通过分相区时消除励磁涌流的冲击, 在实际应用中, 牵引电网电压幅值和频率存在一定的不对称和偏差, 但一般不会超过 5%, 为消除其影响, 机车进入下一个区段时, 在受电弓与该区段供电臂连接后, 系统控制器通过电压互感器获取其电压, 可根据采集的实际电压的幅值和相位, 对输出电压微调, 当机车变压器电压幅值与相位与区段供电臂实际电压完全一致时, 闭合机车主断路器, 完全消除电压偏差带来的过分相区冲击。

3 机车合闸励磁电流仿真

为了验证本文所研究的电力机车励磁涌流消除系统原理及 PWM 调制电压算法的正确性, 本文以 Matlab/Simulink 为平台建立电力机车励磁涌流消除系统仿真模型。采用表 1 所示的仿真参数, 分别对未投运电力机车励磁涌流消除系统及投运该系统时模拟机车车载主变压器的励磁电压与励磁电流进行仿真验证。

表 1 仿真系统参数

参数	数值	参数	数值
供电臂 a 电压	27.5 kV	主断路器断开时刻	0.10 s
供电臂 b 电压	27.5 kV	主断路器合闸时刻	0.323 s
额定电流	200 A	换相前频率	50 Hz
变压器容量	20e6 W	换相后频率	50 Hz

3.1 未投入励磁涌流消除系统时合闸涌流仿真

电力机车励磁涌流消除系统没有投运时, 模拟机车车载主变压器的电压电流仿真波形如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出, 机车在进入分相区之前机车变压器电压为 u_{ac} , 0.10 s 进入区间后, 电压约为 0 kV, 在 0.32 s 时刻出分相区时, 机车变压器的励磁电压为 u_{bc} 。机车变压器励磁电流由图 8 可见, 机车在进入分相区之前变压器励磁电流为 i_{ac} , 进入分相区后电流为 0 A, 机车出分相区合闸时, 励磁电流幅值瞬间达到近 1 400 A, 有很大的励磁涌流。

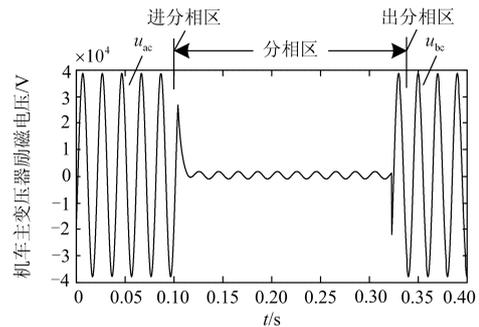


图 7 未采用涌流抑制时牵引变压器励磁电压的波形

Fig. 7 Magnetizing voltage waveform of traction transformer without inrush current suppression

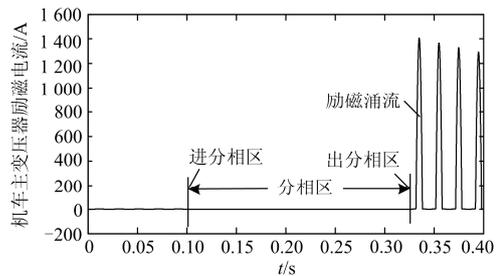


图 8 未采用涌流抑制时牵引变压器励磁电流的波形

Fig. 8 Magnetizing current waveform of traction transformer without inrush current suppression

从图 8 可知, 电力机车在出分相区换相时, 主断路器合闸初期, 机车主变压器产生很大的励磁涌流。

3.2 采用同相调幅法调制电压算法仿真分析

电力机车投运励磁涌流消除系统时, 采用同相调幅法调制电压进行仿真, 机车主变压器的励磁电压波形如图 9 所示。机车未进入分相区时电压幅

值约为 38.7 kV, 进入分相区瞬间电压下降到 0 kV, 然后再逐渐上升, 在出分相区之前电压幅值上升到 38.7 kV, 并保持该幅值平稳的运行。机车主变压器励磁电流如图 10 所示, 与电压波形变化一致, 整个换相过程中不产生任何励磁涌流。

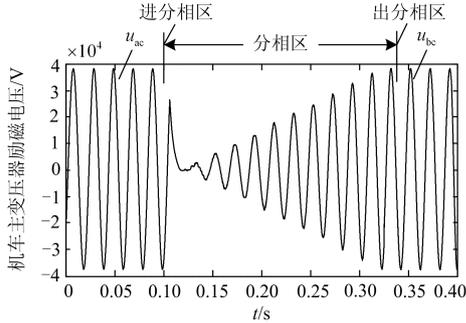


图 9 采用同相调幅法时变压器励磁电压的波形
Fig. 9 Magnetizing voltage by using cophase amplitude modulation method

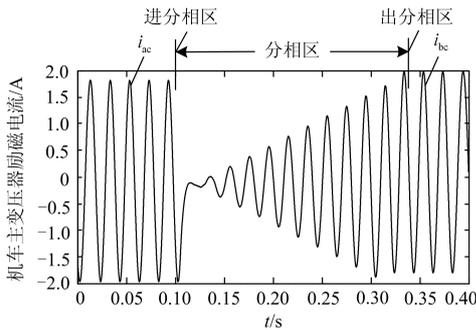


图 10 采用同相调幅法时变压器励磁电流的波形
Fig. 10 Magnetizing current by using cophase amplitude modulation method

3.3 采用变频移相法调制电压算法仿真分析

采用变频移相法进行电压换相调制进行仿真的电力机车主变压器励磁电压和相应的励磁电流如图 11 和图 12 所示。在整个运行过程中电力机车变

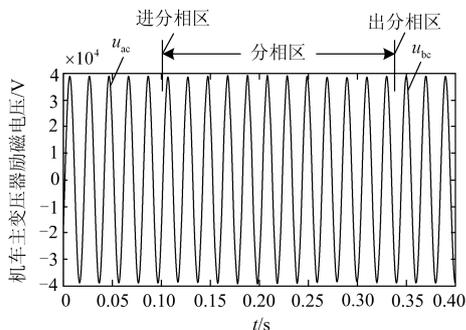


图 11 采用变频移相法变压器励磁电压的波形
Fig. 11 Magnetizing voltage by using frequency conversion phase shift method

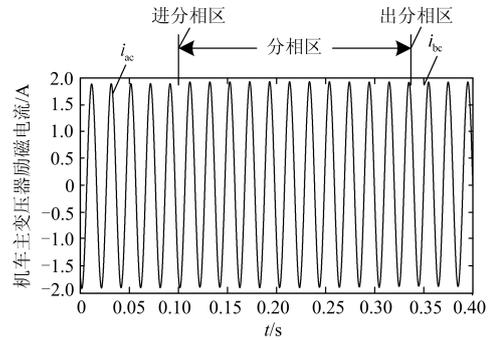


图 12 采用变频移相法时变压器励磁电流的波形
Fig. 12 Magnetizing current by using frequency conversion phase shift method

压器的励磁电压励磁电流的幅值大小始终没有变, 机车在分相区间频率发生了变化, 先从工频 50 Hz 逐渐增大然后再减小到工频 50 Hz, 主断路器合闸时, 没有产生励磁涌流, 实现了平滑换相。

由上述仿真可知, 采用以上两种电压调制算法均能实现电力机车无冲击换相, 机车完成换相主变压器合闸时, 没有励磁涌流产生, 能够起到有效消除励磁涌流的效果。

4 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, 提出基于大功率电力电子器件和 PWM 电压控制的消除电力机车过分相区合闸励磁涌流方法, 并运用两种 PWM 调制电压算法: 同相调幅法和变频移相法, 经过详细分析和仿真, 得到如下结论:

1) 提出的电力机车励磁涌流消除系统能够有效地消除励磁涌流, 提高牵引网和机车运行的稳定性和可靠性, 也消除牵引变压器由此产生的和应涌流, 避免励磁涌流直流和高次谐波分量对牵引网电能质量及通信系统的不良影响。

2) 两种方法都能有效确保接触网和机车供电稳定性。同相调幅法, 变压器电压相位保持与下一供电臂电压相同, 便于实现; 变频移相法, 变压器电压幅值无需从 0 开始增加, 响应速度快, 更适合高速机车, 并能实现机车不间断供电。

3) 该励磁涌流消除系统, 消除了励磁涌流发生的剩磁、合闸角、铁芯饱和等条件, 在过分相区过程中, 机车变压器完成电压同期合闸, 确保机车变压器铁芯磁场不出现暂态过程, 从而消除了励磁涌流。因此, 这两种 PWM 电压调制算法均不受变压器剩磁及合闸初相角的影响, 可靠性较高。

4) 此励磁涌流消除系统及提出的控制算法同

时适用于三相变压器中,可应用于各类变压器合闸控制,能够有效减少变压器合闸操作对系统的不良影响。

参考文献

- [1] 姜晓峰,何正友,胡海涛,等.高速铁路过分相电磁暂态过程分析[J].铁道学报,2013,35(12):30-36.
JIANG Xiaofeng, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. Analysis on electromagnetic transient process of electric multiple unit passing neutral section devices[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 30-36.
- [2] 宁铎,尤磊,李英春,等.变压器差动保护动作特性的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(4):99-106.
NING Duo, YOU Lei, LI Yingchun, et al. Simulation research on the operating characteristic of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 99-106.
- [3] 朱维璐,闫彩红,刘智敏.电力变压器和应涌流的产生机理及影响因素[J].高电压技术,2010,36(2):380-384.
ZHU Weilu, YAN Caihong, LIU Zhimin. Principle and influencing factors of power transformer sympathetic inrush[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 380-384.
- [4] 赵元哲,李群湛,周福林,等.电力机车变压器和应涌流产生机理与影响因素[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):44-52.
ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Mechanism and influencing factors of electric locomotive sympathetic inrush[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 44-52.
- [5] 姚东晓,邓茂军,倪传坤,等.变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(5):36-41.
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [6] 冉旺,郑琼林,杜玉亮,等.过分相不间断供电列供系统过电压抑制研究[J].铁道学报,2016,38(9):46-51.
RAN Wang, ZHENG T Q, DU Yuliang, et al. Study of over-voltages elimination with uninterruptible power supply of auxiliary power supply system[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(9): 46-51.
- [7] 李振强,谷定燮,戴敏,等.特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J].高电压技术,2012,38(2):387-392.
LI Zhenqiang, GU Dingxie, DAI Min, et al. Analysis and suppression method of no-load ultra high voltage transformer resonance overvoltage and inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 387-392.
- [8] 王雨,李鹏,颜罡,等.HXD1C电力机车自动过分相控制[J].机车电传动,2015(4):42-44.
WANG Yu, LI Peng, YAN Gang, et al. Automatic neutral-section passing control for HXD1C electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(4): 42-44.
- [9] 仇龙刚,周福林,张永岚,等.基于PSCAD的机车过分相过电压及抑制方法仿真研究[J].电力学报,2014,29(1):1-5.
QIU Longgang, ZHOU Fulin, ZHANG Yonglan, et al. Simulation research of over-voltages of the locomotive during passing phase insulator based on PSCAD[J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(1): 1-5.
- [10] 高吉磊,张雅静,林飞,等.单相PWM整流器谐波电流抑制算法研究[J].中国电机工程学报,2010,30(21):32-39.
GAO Jilei, ZHANG Yajing, LIN Fei, et al. Research on harmonic current elimination method of single-phase PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 32-39.
- [11] 王轩,付永生,晋湾湾,等.一种新型结构的电力电子变压器[J].电工电能新技术,2017,36(5):67-74.
WANG Xuan, FU Yongsheng, JIN Wanwan, et al. Novel topology of power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 67-74.
- [12] 吴振兴,邹旭东,黄清军,等.三相电力电子负载并网变换器研究[J].中国电机工程学报,2010,30(24):1-7.
WU Zhenxing, ZOU Xudong, HUANG Qingjun, et al. Research on grid connection converter of three-phase power electronic load[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 1-7.
- [13] 田旭,姜齐荣,魏应冬,等.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[J].电网技术,2015,39(10):2901-2906.
TIAN Xu, JIANG Qirong, WEI Yingdong, et al. Two-phase modular multilevel converter topology study of railway uninterruptible phase-separation passing device[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2901-2906.
- [14] 李占元,张伟红,杜秀红.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[J].变压器,2013,50(3):34-40.
LI Zhanyuan, ZHANG Weihong, DU Xiuhong. Applied

- example of pre-magnetizing winding in suppression of no-load switching magnetizing inrush current of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(3): 34-40.
- [15] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10-16.
GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 10-16.
- [16] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149.
HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [17] 黄晶晶, 徐习东, 曾平, 等. 电力变压器铁心的非线性磁化特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2582-2587.
HUANG Jingjing, XU Xidong, ZENG Ping, et al. Iron core nonlinearities of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2582-2587.
- [18] 谢曲天. 电力机车过分相电磁暂态过程研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015: 71-80.
XIE Qutian. Research on magnetic transient for the passing neutral section of electric locomotive[D]. Hengyang: University of South China, 2015: 71-80.
- [19] 罗隆福, 李芬芬, 许加柱, 等. 电力机车主变压器空载合闸瞬变过程仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(4): 128-132.
LUO Longfu, LI Fenfen, XU Jiazhu, et al. Simulation of no-load switching transient process of electric locomotive traction transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2011, 23(4): 128-132.
- [20] 王晶, 曹文斌, 杨增力, 等. 多种电流互感器暂态饱和特性及其复杂工况下动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 58-65.
WANG Jing, CAO Wenbin, YANG Zengli, et al. Study on multiple types of CTs transient saturation and its dynamic simulation tests in complex operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 58-65.
- [21] 李旭, 丁勇, 李勇, 等. 虚拟同步发电机的相角控制方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 43-46.
LI Xu, DING Yong, LI Yong, et al. Phase angle control method of virtual synchronous generator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 43-46.
- [22] 李洁. 南澳柔性直流输电系统涌流抑制措施及试验分析[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 112-115.
LI Jie. Suppression measures for inrush current of nan'ao HVDC flexible transmission system and experimental analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 112-115.

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-05-21

作者简介:

黄景光(1968—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 258926016@qq.com

赵娇娇(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 781254948@qq.com

(编辑 姜新丽)