

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.014

# 基于线圈瞬态电流参数优化的真空断路器永磁操动机构动作特性研究<sup>\*</sup>

沈奕成<sup>1</sup>, 刘坚钢<sup>2</sup>, 郭 裕<sup>3</sup>, 王泽泽<sup>3</sup>, 金立军<sup>3\*</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宁波耀华电器厂, 浙江 宁波 315324;  
3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:**针对永磁操动机构出力不足、动作特性与真空断路器开断性能难以配合的问题,对单线圈双稳态真空断路器永磁操动机构进行了研究,在剖分永磁操动机构结构的基础上,分析了磁路磁链的分布关系,建立了三维电磁场数学模型。采用有限元法仿真分析方法,求解了永磁操动机构线圈瞬态电流与动铁芯合闸动作特性之间的关系,并探讨永磁操动机构储能电容容量、电源电压、线圈匝数和负载等效质量等主要参数对真空断路器合闸动作特性的影响。研究结果表明,仿真计算数据与试验测试数据吻合,优化后的电容、线圈及负载参数可对永磁操动机构的位移检测、系统故障诊断、结构改进等提供理论依据。

**关键词:**永磁操动机构;瞬态电流;磁路;动作特性

中图分类号:TM561;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1227-05

## Dynamic characteristics of the permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker based on the optimization of parameters of the coil transient current

SHENG Yi-cheng<sup>1</sup>, LIU Jian-gang<sup>2</sup>, GUO Yu<sup>3</sup>, WANG Ze-ze<sup>3</sup>, JIN Li-jun<sup>3</sup>

(1. College of electronics and information, Sichuan University, Chengdu 610065 China;  
2. Ningbo Yaohua Electric Factory, Ningbo 315324 China;  
3. School of electronics and information engineering, Tongji University, Shanghai 201804 China)

**Abstract:** To solve the problem of lacking of output, difficult matching action characteristics with vacuum circuit breaker interrupting performance of permanent magnetic actuator, single coil permanent magnetic actuator was studied in. The magnetic flux distribution was analyzed based on divided permanent magnetic mechanism section and 3D electromagnetic field mathematics model was established. Using the finite element simulation method, dynamic relationship between coil transient current and the core switching operation characteristics was solved. The permanent magnetic actuator structure stored to capacitance, the voltage of the power supplied, the number of turns of the coil and load equivalent quality and other main parameters influence operating characteristic was explored. Research results indicate that the simulation data and the experimental data reach agreement. Optimized capacitor, coil and load parameters of permanent magnetic operating mechanism provide a theoretical basis for the displacement detection, system fault diagnosis and structural improvement.

**Key words:** permanent magnetic actuator; transient current; magnetic circuit; action characteristics

## 0 引 言

真空断路器在输配电网中使用率极高,永磁操动机

构的出力特性可以与真空断路器的反力特性很好地配合<sup>[1-2]</sup>,并且它还具有机械结构简单<sup>[3]</sup>、寿命长、易于控制的优点<sup>[4-6]</sup>,因此得到了业内的广泛关注和研究。

收稿日期:2016-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51577135)

作者简介:沈奕成(1994-),男,浙江慈溪人,硕士研究生,主要从事电器设备仿真分析与设计方面的研究. E-mail:77908504@qq.com

通信联系人:金立军,男,博士,教授,博士生导师. E-mail:jinlj@tongji.edu.cn

但同时由于永磁操动机构涉及到了电路、磁路以及机械等问题<sup>[7]</sup>,磁场分布情况非常复杂<sup>[8]</sup>,根据经典公式建立永磁操动机构的数学模型<sup>[9-12]</sup>,并按照传统的方法对机构尺寸进行设计往往不能达到较好的结果<sup>[13-14]</sup>,这种设计方法也直接导致了机构设计时间周期长<sup>[15]</sup>、结构改进盲目性大等问题。

本研究借助计算机模拟方法针对一种新型单线圈双稳态永磁操动机构进行了分析<sup>[16]</sup>,建立其瞬态场数学模型和有限元仿真模型<sup>[17-19]</sup>,仿真分析线圈瞬态电流特性与衔铁闭合动作特性及电磁出力之间的内在联系<sup>[20-21]</sup>,并与实验结果进行对比验证<sup>[22]</sup>。

### 1 永磁操动机构磁路分析

当断路器处于分闸或合闸位置时,即动铁芯处于最上端或最下端时,线圈中无电流通过,此时动、静铁心一起对永磁体的磁场形成一个低磁阻抗的路径,磁力线几乎全部通过动铁芯和静铁心接触端,产生的效果即永磁体吸力将动铁芯保持在最上或最下的位置。操动机构操作前,储能电容预先被充以一定的电压,控制模块控制其向线圈放电,由通电线圈产生磁场,此时机构中的磁场由永磁体产生的磁场和线圈电流产生的磁场叠加而成,但由于空气气隙的缘故永磁体产生的磁场在该过程中可以忽略不计,动铁芯连同驱动杆在

合成磁场力及配合弹簧的作用下,完成关合或开断动作。

本研究带拐臂结构的永磁真空断路器剖面图如图 1 所示。

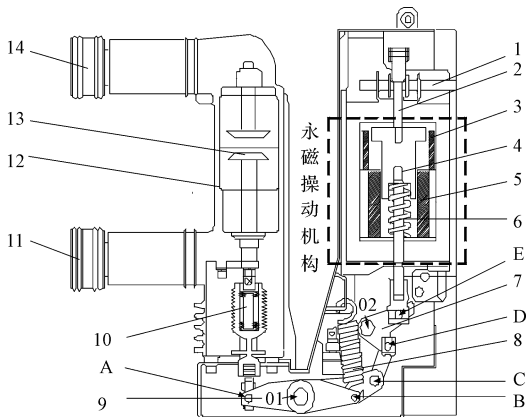


图 1 永磁真空断路器剖面图

- 1—紧急分闸装置;2—动铁芯连杆;3—永磁体;4—动铁芯;5—分合闸线圈;6—复位弹簧;7—中间拐臂;8—旋转轴;9—左输出拐臂;10—超程装置;11—下出线端;12—真空灭弧室;13—触头;14—上出线端

永磁操动机构的磁路示意图如图 2 所示。分闸位及合闸动作时磁路示意图如图 2(a) 所示;合闸位及分闸动作时磁路示意图如图 2(b) 所示。

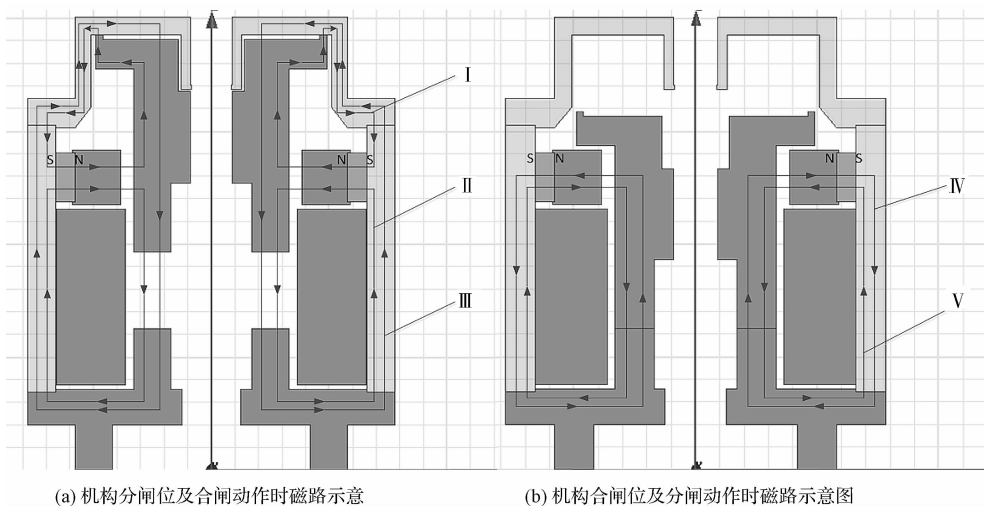


图 2 永磁操动机构磁路图

- I—分闸位静磁路;II—合闸动作时线圈通电后产生瞬态磁路,该磁场与 I 反向,最终带动动铁芯向下运动;III—合闸动作时线圈的过渡磁路;IV—合闸位静磁路;V—分闸动作时的瞬态磁路,该磁场与 IV 反向,抵消其保持作用,再由反力系统带动铁芯进行分闸动作

由于分闸动作主要取决于机构的弹簧储能系统,电磁场的作用在此过程中甚微,故本研究主要针对机构的合闸过程进行分析。

### 2 永磁机构的数学模型

当机构控制系统发出合闸命令时,线圈导电回路

接通,在线圈电流的激励下,瞬态磁场对动铁芯产生作用力并转换成位移输出,整个闭合过程中包括了电能—磁能—机械能的转换过程,因此需要通过运动耦合瞬态场理论对瞬态特性进行分析。由于机构的导磁材料部分工作在饱和状态,模型需要考虑该导磁材料的实际非线性磁化特性。

## 2.1 电路模型

本研究的永磁机构操动机构采用外部电容对线圈进行放电的形式实现断路器机构的合闸动作,动铁芯在合闸的过程中,受线圈中电流产生的磁场影响,在线圈两端感生出感应电动势  $E_e$ ,等效电路即电路模型如图 3 所示。

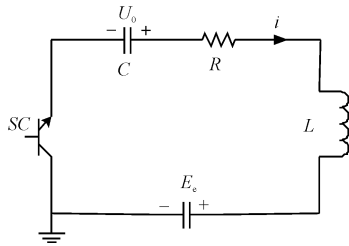


图 3 电路模型

$C$ —电容容量; $N$ —线圈匝数; $R$ —线圈等效电阻

电压平衡方程为:

$$U_c = iR + E_e \quad (1)$$

$$E_e = \frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

式中: $U_c$ —储能电容电压, $R$ —导电线圈电阻, $i$ —导电线圈电流, $E_e$ —线圈感生电动势, $\psi$ —线圈磁链。

## 2.2 磁路模型

忽略位移电流,磁滞效应等,由麦克斯韦基本方程得出磁场矢量位函数方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v \quad (3)$$

式中: $\mu$ —导磁率, $A$ —矢量磁位, $J_s$ —电流密度, $\sigma$ —电导率, $v$ —动铁芯运动速度。

基于上述数学模型,本研究在有限元软件中建立该永磁操动机构的仿真模型,并设定其边界条件。为提高分析精度,对动铁芯及其运动空间进行网格加密设置。

## 2.3 动力学模型

动铁芯在运动域内的运动方程为:

$$F = M \frac{d^2x}{dt^2} + K_z \frac{dx}{dt} + F_z \quad (4)$$

式中: $F$ —输出力, $M$ —动铁芯质量, $K_z$ —阻尼系数, $x$ —动铁芯位移, $F_z$ —机构反力。

通过联立公式(1~4),可以建立永磁操动机构的瞬态场数学模型。该模型在考虑材料非线性特性和涡流效应的基础上,通过有限元方法进行求解,从而可以获得其瞬态特性。

## 3 仿真分析

基于上述建立的真空断路器永磁操动机构瞬态场数学模型,通过有限元仿真计算可以获得动铁芯闭合

动作特性,如图 4 中带方块的曲线所示。

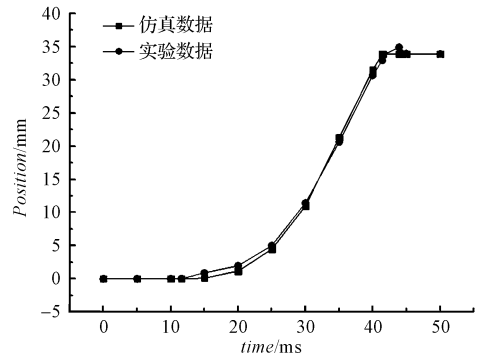


图 4 试验测量和仿真计算动铁芯闭合特性比较

为了验证所建模型的准确性,本研究对机构试验数据进行了采集,其中位移传感器安装在图 1 中的 E 点,电流测量采用测量电容两端电压值间接计算的方法获得。试验数据如图 4 中带圈的曲线所示。对比试验和仿真结果可见二者基本一致,证明本研究中仿真模型正确可靠。

从仿真结果可以发现,电流特性呈现先增大后减小再增大的变化过程,前一段增大的过程达到极值点时间为 30 ms,减小过程中达到极值点的时间为 41 ms,最终在 50 ms 时切断电源,机构完成合闸动作。位移在初始 12 ms 内没有变化,之后经过大约 29 ms 达到合闸位置,此时闭合动作时间与电流曲线中减小过程的凹点位置一致。经过分析认为这是由于初始阶段动铁芯静止或慢速运动时,线圈电感基本不变,储能电容提供的电流近似以一阶惯性规律增大;运动中后期阶段动铁芯速度变化较大时,线圈中产生较大的感应电动势,使得电流减小;动铁芯达到行程末端时,线圈电感再次接近不变,电流再次以近似一阶惯性环节增大,直到切断电源为止。因此,永磁操动机构通过瞬态电流特性可以判断其闭合动作时间。该时间为电流减小过程凹点位置所对应的时间,要小于电源切断时间。

根据仿真计算获得的瞬态电流特性,可以分析驱动电压、线圈匝数、动铁芯及其所联负载的等效质量等主要参数对永磁操动机构闭合动作时间的影响。

### 3.1 储能电容容量

采用不同容量的电容作为永磁操动机构储能电源时的瞬态电流特性如图 5 所示(此时线圈匝数固定为 700 匝,电容初始电压为 220 V)。

由图 5 可见,储能电容容量越大,线圈电流第一个波峰值和最终切断时的电流值也越大,凹点出现也有所提前,但是提前的幅度并不大,这表明储能电源电容增大有助于提高机构对动铁芯的出力,动铁芯闭合动作时间有所缩短但缩短程度非常小。在研究过程中还

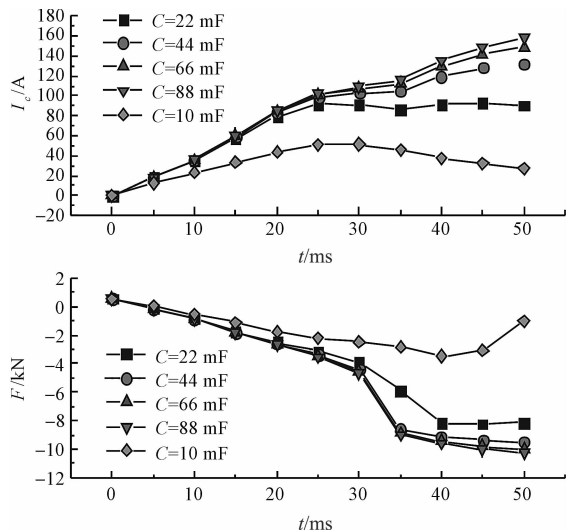


图 5 不同储能电容容量时的瞬态电流

(此时电容大小为 44 mF, 电容初始电压为 220 V)。

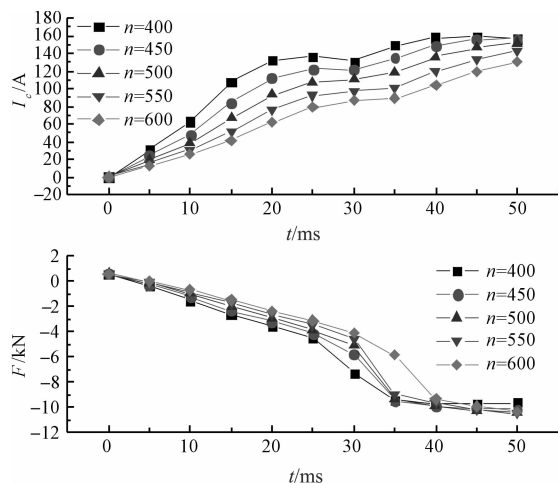


图 7 不同线圈匝数时的瞬态电流及电磁力

发现, 电容容量较小时机构无法完成合闸动作, 这是由于电容提供的能量较小, 不足以克服机构反力做功完成合闸, 如图中电容为 10 mF 时曲线所示。因此, 在实际应用过程中可以选用容量较大的电容来提高机构的合闸能力。

### 3.2 储能电容电压

加载不同电源电压的瞬态电流特性如图 6 所示 (此时电容大小为 44 mF, 线圈匝数为 500 匝)。

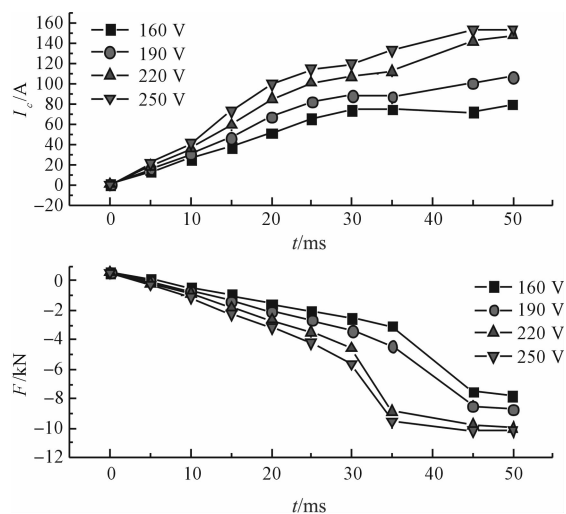


图 6 不同初始电压时的瞬态电流及电磁力

由图 6 可见, 驱动电压越高, 初始电流上升越快, 稳点在 50 ms 切断电流也越大, 凹点出现越早, 表明闭合动作时间较短而闭合时的瞬时电流值较大, 但过高的初始电压容易造成回路过载的问题。因此, 为了减小闭合动作时间, 可以适量提高储能电容的初始电压值。

### 3.3 线圈绕组匝数

不同线圈绕组匝数时的瞬态电流特性如图 7 所示

由图 7 可见, 线圈绕组匝数越少, 初始电流上升越快, 凹点出现越早。这是由于线圈电感与线圈绕组匝数的平方成正比, 线圈的电阻与线圈绕组的匝数成正比, 电路时间常数随着线圈绕组匝数减小而减小, 故初始电流上升快; 电流的快速上升导致磁力对动铁芯的出力快速增加, 其运动速度快速增大, 降低了闭合所需的时间。因此, 不管是从提高电磁力还是减小闭合动作时间, 低绕组匝数要比高绕组匝数更为有利。

### 3.4 动铁芯及其所关联负载的等效质量

不同等效质量时的瞬态电流特性如图 8 所示 (此时电容大小为 44 mF, 线圈匝数为 500 匝)。

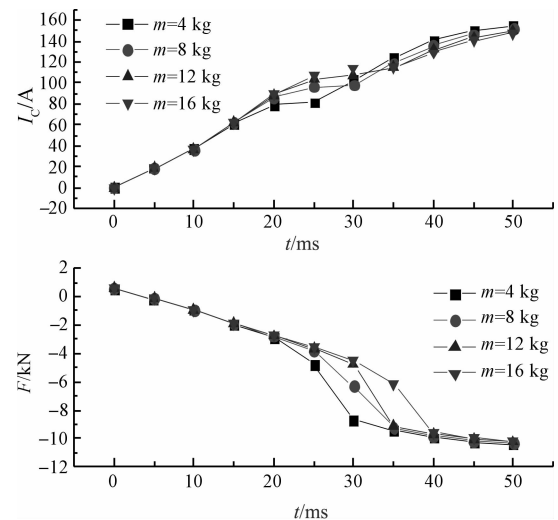


图 8 不同等效质量时的瞬态电流及电磁力

由图 8 可见, 等效质量越大, 凹点出现的越晚, 表明机构闭合动作需要的时间越长。这是因为随着质量的增大, 动铁芯的运动惯性也会增大, 因此完成动作的时间会增加。为了减小闭合响应时间, 应尽量降低动铁芯及其所联负载的等效质量, 在满足一定电磁力的前提下对机构的动件进行轻量优化可以提升机构的合

闸性能。

## 4 结束语

本研究建立了一种基于线圈瞬态电流参数优化的永磁操动机构动作特性的数学模型。采用有限元计算软件研究了永磁操动机构线圈瞬态电流及动铁芯的闭合动作特性。永磁操动机构通过瞬态电流特性可以判断其闭合动作时间。该时间为电流减小过程凹点位置所对应的时间,要小于电源切断时间。结果显示,永磁操动机构能够满足真空断路器的合闸要求,合闸电流峰值 65.3 A,峰值时间 41 ms。相关试验证明该模型正确可用。

储能电容容量  $C$ 、电容初始电压  $V$ 、线圈匝数  $N$  和负载等效质量等因素对机构动作特性的影响的研究结果显示,容量越大的电容机构合闸能力越强,提高储能电容的初始电压值可减小闭合动作时间,低匝数机构要比高匝数机构出力更大。通过实验对比,确定了永磁操动机构最优电容容量 44 mF,最优初始电压 220 V,最优线圈匝数 400 匝,最优负载等效质量 8 kg。

提出基于瞬态电流特征来判断机构闭合动作特性的方法,即电流减小过程的凹点位置时间与动铁芯达到行程末端的闭合动作时间相近,而电流的大小可以代表所提供的电磁力的大小。

## 参考文献 (References):

- [1] 林 莘,刘 洋,杜仁伟,等. 三相分立式断路器的新型永磁机构[J]. 高压电器,2015,51(1):1-5.
- [2] 吕锦柏,王 毅,谢将剑,等. 基于线圈电流的永磁真空断路器控制方法[J]. 高电压技术,2013,49(4):60-68.
- [3] WANG Z, SUN L, HE S, et al. A Permanent Magnetic Actuator for 126kV Vacuum Circuit Breakers [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2014,50(3):129-135.
- [4] 王邦田,纪江辉,王小丽,等. 基于 27.5 kV 永磁机构开关的优化设计[J]. 高压电器,2013,49(12):54-58.
- [5] 杨 茜,张 英,叶祖标. 永磁机构真空断路器的机械特性受温度影响的研究[J]. 高压电器,2013,49(7):46-52.
- [6] 吕锦柏,王 毅,谢将剑,等. 基于线圈电流的永磁真空断路器控制方法[J]. 高电压技术,2013,39(4):860-868.
- [7] 刘 焱,王 宏,王 洋,等. 基于磁路饱和调整的永磁机

构设计方法[J]. 高压电器,2014,50(4):61-65.

- [8] LEE C H, SHIN B H, BONG Y B. Designing a Permanent-Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breakers Using the Taguchi Method and Dynamic Characteristic Analysis [J]. **IEEE transactions on industrial on industrial electronics**,2016,63(3):1655-1664.
- [9] 谢 超,吴细秀,吴士普,等. 永磁操动机构储能电容大小的确定方法研究[J]. 高压电器,2015,51(3):41-46.
- [10] 王喜利,郭凤仪,刘艳丽,等. 永磁机构真空断路器同步关合控制系统设计[J]. 高压电器,2014,50(6):98-103+110.
- [11] 李 平,武建文,辛 超,等. 带能量回馈功能的永磁机构驱动控制器[J]. 电工技术学报,2014,29(9):174-180.
- [12] 李 斌,郭凤仪,王智勇,等. 双稳态永磁机构优化设计及智能控制器[J]. 电工技术学报,2013,28(10):83-89.
- [13] GUO Kai-kai; FANG Shu-hua; YANG Hui; A Novel Linear-Rotary Permanent-Magnet Actuator Using Interlaced Poles [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2015,51(11):1.
- [14] 张 杰,姜亚军,郭大庆. 12 kV 真空断路器双线圈单稳态永磁机构的设计[J]. 高压电器,2010,46(9):34-38.
- [15] 林 莘,曹 辰,李 斌,等. 配永磁机构真空断路器动态仿真与实验[J]. 高压电器,2013,49(11):1-5.
- [16] 汤 庚,徐建源,林 莘,等. 基于双信号检测及跟踪的真空断路器永磁机构控制方法研究[J]. 高压电器,2013,49(12):1-6.
- [17] 徐建源,雷 伟,汤 庚,等. 永磁机构真空断路器分闸触头过冲与反弹抑制方法的研究[J]. 高压电器,2015,51(3):22-27.
- [18] 黄新波,王岩妹,朱永灿,等. 单稳态柱上永磁机构断路器电源设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):160-165.
- [19] 孙丽琼,王振兴,何塞楠,等. 126 kV 真空断路器分离磁路式永磁操动机构[J]. 电工技术学报,2015,30(20):49-56.
- [20] 谭东现,李 岩,徐建源. 35 kV 真空断路器永磁操动机构的研制[J]. 电力设备,2005,6(2):26-28.
- [21] 谢 超,吴细秀,吴士普,等. 永磁操动机构储能电容大小的确定方法研究[J]. 高压电器,2015,51(3):41-46.
- [22] 钱 毅. 真空断路器行程及分合闸速度的测量[J]. 上海电力,2008,21(4):390-391.

[编辑:张 豪]

## 本文引用格式:

沈奕成,刘坚钢,郭裕,等. 基于线圈瞬态电流参数优化的真空断路器永磁操动机构动作特性研究[J]. 机电工程,2016,33(10):1227-1231.

SHENG Yi-cheng, LIU Jian-gang, GUO Yu, et al. Dynamic characteristics of the permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker based on the optimization of parameters of the coil transient current [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(10):1227-1231.