

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.007

永磁操动机构储能电容大小的确定方法研究

谢超¹, 吴细秀¹, 吴士普², 冯宇², 汪本进²

(1. 武汉理工大学, 武汉 430070; 2. 中国电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 真空断路器永磁操动机构的驱动电源多采用储能电解电容器, 电容器容量大小对永磁机构的动态特性有重要影响, 但如何确定电容器容量大小尚无明确原则。基于此, 笔者通过分析永磁机构的电路励磁特征和运动特性, 提出一种电容量大小确定方法, 即可根据电容放电电流的第1个峰值达到永磁机构动作的临界电流来确定电容容量。在此基础上, 以某永磁操动机构为例, 具体介绍了电容大小的计算步骤。最后, 根据所确定的储能电容大小计算了永磁机构动态特性, 计算结果表明, 笔者所提出的储能电容大小确定方法既可保证断路器可靠分、合闸, 又能使电容量取值最小, 从而优化了永磁机构的设计。

关键词: 永磁操动机构; 储能电容; 临界电流; 动态特性

Investigate on the Evaluation Method for the Capacitance Value of the Energy Storage Capacitor Used in Permanent Magnetic Actuator

XIE Chao¹, WU Xixiu¹, WU Shipu², FENG Yu², WANG Benjin²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Permanent magnetic actuator(PMA)for vacuum circuit breaker is always powered by the energy storage electrolytic capacitor, which has a significant influence on the dynamic behaviour of the actuator. But at present there's no specific theoretical method to evaluate the capacitance. Therefore, an evaluation method for the capacitance value of the energy storage used in PMA is proposed, i.e. the capacitance can be calculated under the condition that the first peak value of the discharged current equals to the critical moving current, based on the corresponding analysis of the excitation characteristic and the dynamic performance. By taking a certain PMA as example, the process of the evaluation for the capacitance is discussed. In the end, the dynamic behaviour of the PMA excited by the obtained capacitance is studied. The result reveals that the evaluation method for the capacitance value can not only ensure the breaker operating reliably but also ensure the capacitance getting the minimum value, which optimizes the design of PMA.

Key words: permanent magnetic actuator; energy storage capacitor; critical current; dynamic behaviour

0 引言

随着真空断路器的广泛应用和钕铁硼等高储能密度永磁材料制造技术的发展, 近年来永磁操动机构已逐渐成为电力运行部门和开关制造企业的

研发热点^[1-4]。永磁操动机构结构简单、零部件少、可靠性高, 具有良好的应用前景^[5-9]。永磁操动机构的励磁电源主要采用蓄电池和电解电容器。其中, 蓄电池存在许多问题, 如充电线路及保护电路复杂、寿命短、维护费用高等^[10]。因此, 现在的永磁操动机构大多采用储能电容作为励磁电源^[11-13]。

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(51107093); 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放课题基金; 高校基本科研业务费专项资金(2014-IV-143)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51107093), State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Fundamental Research Funds for the Central (2014-IV-143).

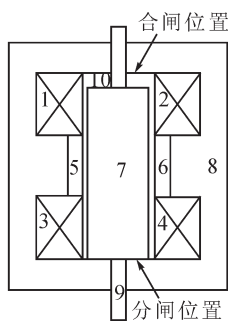
永磁机构的动态特性反映了真空断路器的动作情况,即它准确反映了断路器是否可靠分合闸。而储能电容大小直接影响着永磁操动机构动态特性。因此,储能电容容量的选择非常重要。但在工程实际中,储能电容量大小的确定多依赖于经验调试^[14],很少有学者从理论上研究如何确定电容量的大小。这种依赖经验调试的方法常使电容的取值过大,并产生一系列问题:①导致永磁操动机构驱动机构的体积偏大,不利于真空断路器的小型化;②使励磁电流偏大,进而使动铁心受到的电磁力偏大,电磁力过大会加重触头弹跳;③使漏电流偏大,影响电容器使用性能;④造成电容储能的浪费。

针对上述现状,笔者提出一种确定储能电容大小的方法,并以双稳态永磁操动机构为例,利用有限元法对永磁操动机构的动态特性进行计算,以验证电容大小确定方法的正确性。文中提出的方法能在保证真空断路器可靠分合闸的前提下能使所选电容值达到最小,优化了永磁机构的设计。

1 永磁操动机构数学模型

1.1 永磁操动机构工作原理

永磁操动机构结构图见图1,图1中永磁机构处于分闸状态,此时线圈中没有操作电流,永磁体依靠静铁心和动铁心提供的低磁阻抗通道产生磁场,将动铁心保持在分闸位置。当断路器控制模块发出操作信号时,储能电容将其储存的电场能量通过合闸励磁电流的方式转化成磁场能量,从而驱动动铁心运动直至合闸位置。分闸过程与合闸过程类似,故不多述。



1、2—合闸线圈; 3、4—分闸线圈; 5、6—永磁体;
7—动铁心; 8—静铁心; 9—驱动杆; 10—气隙。

图1 永磁操动机构结构图

Fig. 1 Structure of PMA

在永磁操动机构分合闸过程中,驱动动铁心运动的电磁力的大小由励磁电流决定,而储能电容容量大小直接决定了励磁电流的大小。因此,确定合适的储能电容容量对调节永磁机构的动态特性而言具有重要意义。

1.2 永磁操动机构励磁电路数学模型

永磁操动机构的励磁过程可以等效为RLC串联电路的电容放电零输入响应过程,见图2。图2中: C 为储能电容; $F;R$ 机构线圈的等效电阻; $\Omega;L$ 为机构线圈的等效电感; $H;u_c$ 为电容电压; $V;i$ 为励磁电流, A 。

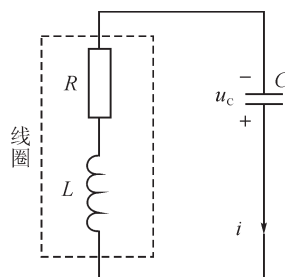


图2 永磁机构等效励磁电路

Fig. 2 Exciting circuit of PMA

图2中根据 C 取值不同,电路可能出现两种放电过程,即非振荡放电过程和振荡放电过程,下面分别对这两种情况进行讨论^[15]。

1) $C > 4L/R^2$,非振荡放电过程。这种情况下,电容放电电流 i 为

$$\begin{cases} i_{\text{非}} = -\frac{U_0}{L(p_2 - p_1)}(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \\ p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \\ p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (1)$$

2) $C < 4L/R^2$,振荡放电过程。此时,电容放电电流 i 为

$$\begin{cases} i_{\text{振荡}} = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: U_0 为电容初始电压, $V;t$ 为时间, s 。

两种放电情况的电流曲线见图3。文[16]曾认为永磁机构储能电容大小的选择必须满足非振荡放电过程的条件,主要原因如下:①非振荡放电可确保线圈电流始终保持同一方向;②能保证储能电容在不充电的情况下再次可靠动作。

事实上,永磁机构都有其固有的分、合闸临界动作电流,储能电容放电电流一旦达到该临界电流,机构的运动部件便开始动作,因此通过满足放电过程为非振荡过程条件来确定电容量大小的方法并不准确。即使不满足非振荡放电条件,整个分闸或合闸完成时间(图3所示,从 t' 开始到 t'' 结束)也远小于电容放电回路的振荡半周期,即在电流反向前机构已经完成动作,不会出现电流反向现象;同时,即使满足 $C > 4L/R^2$ 的条件,若储能电容放电电流

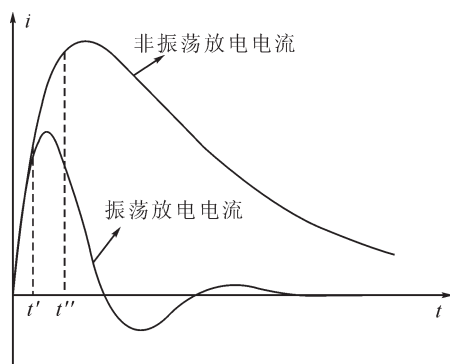


图3 两种放电过程励磁电流随时间变化趋势

Fig. 3 Discharge current of exciting circuit vs. time

达不到永磁机构动作的临界电流,机构也不会动作。由此可见, C 与 $4L/R^2$ 的大小关系不能作为确定电容大小最准确的原则。

若考虑断路器以重合闸方式动作,永磁机构需执行O-重合闸延时-CO动作,其中分闸(O)和合闸(C)采用不同电容器组励磁,因此为保证断路器短时间内两次可靠分闸,实际工程应用中可配备电源驱动第2次分闸操作。

鉴于此,笔者提出:将电容放电电流的第1个峰值达到永磁机构动作的临界电流作为确定电容容量的依据。

2 储能电容容量计算

2.1 电容量大小确定的原理

以合闸过程为例,永磁机构运动过程中反力与永磁体产生的电磁力的变化见图4,由图4可知,在机构动作刚开始阶段为克服永磁力,合闸线圈的励磁电流需要提供足够的驱动力使运动部件所受合力为正值,当合闸运动开始后,维持合闸运动所需的励磁电流逐渐减小,因此合闸过程一旦开始,便允许电容放电电流有所减小。在保证断路器能可靠分合闸的情况下为了尽可能减小电容容量,可以使机构的动作发生在励磁电流刚好到达其第1个峰值点的时刻。

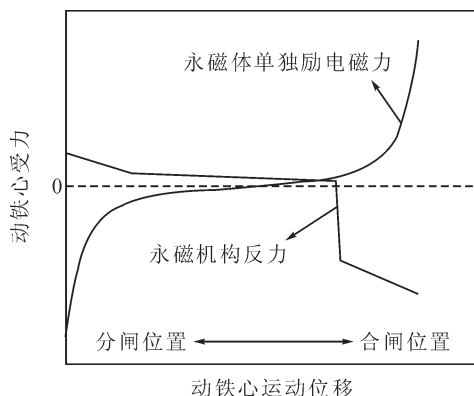


图4 永磁操动机构反力特性和永磁力

Fig. 4 Counter-force vs. permanent magnetic force

由上述分析可知,储能电容量大小可通过励磁电路放电电流的第1个峰值等于永磁操动机构临界动作电流求得。因此,储能电容大小的计算步骤为:①确定永磁机构线圈电路等效参数;②计算机构合闸动作的临界电流;③求解 $i_{\text{peak}}(C)=i_{\text{临界}}$,确定 C 的大小。

2.2 储能电容的具体计算

以某双稳态永磁操动机构的合闸过程为例,介绍永磁机构储能电容量的计算过程。文中所有参数均来自文[17]。

2.2.1 永磁操动机构等效参数计算

根据文[17]提供的参数,计算得到线圈电阻 $R=2.4\Omega$ 。

在机构等效电感 L 计算中,假设永磁机构中的铁心工作在非饱和区,其磁阻比气隙磁阻小得多,可暂且忽略^[18-20]。合闸电流励磁磁路见图5,上端工作气隙的磁阻为 R_{m1} ,下端工作气隙磁阻为 R_{m2} ,永磁体磁阻为 R_{mp} ,合闸线圈磁势为 IN_1 。

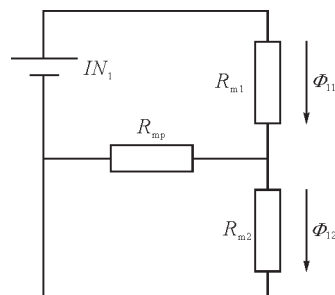


图5 永磁机构合闸电流励磁磁路

Fig. 5 Magnetic circuit of PMA when the circuit breaker is making

电感计算公式见式(3)^[19]

$$L=N^2 \frac{1}{R_{m\Sigma}} \quad (3)$$

式(3)中: N 为线圈匝数; $R_{m\Sigma}$ 为机构总磁阻, H^{-1} 。

当动铁心处于分闸位置时,下端磁阻 R_{m2} 非常小,磁势几乎降落在 R_{m1} 上;当动铁心开始动作, R_{m1} 减小 R_{m2} 增大,到达合闸位置后磁路可等效为 R_{m2} 与 R_{mp} 的并联磁路, $R_{m\Sigma}$ 从分闸到合闸的变化是一个减小的过程,精确模拟电感的变化过程会使计算过于繁琐,这里利用平均值代替动态电感。假设永磁机构铁心都工作在非饱和区,计算得到电感为 0.243H ,而实际工作中铁磁材料通常有一部分工作在饱和区,这将使电感减小,为计算方便,取更接近实际情况的电感值 $L=0.2\text{H}$ 。

2.2.2 临界合闸动作电流计算

永磁机构励磁电路接收到合闸信号后,励磁电流从零开始呈逐渐增加的趋势,在机构刚开始

动作时刻的励磁电流即为合闸临界电流。在该算例中,利用有限元法可计算得到机构在励磁电流增加到43.4 A时开始动作,因此可取合闸临界电流值为44 A。

2.2.3 储能电容计算

根据前文对励磁电路放电过程的分析可知,两种放电情况下电流第1个峰值 i_{peak1} 如式(4)、(5)所示:

$$i_{\text{peak1}}=i_{\text{非}} \left| \begin{array}{l} \ln(\frac{U_2}{U_1}) \\ t=\frac{L}{R} \ln(\frac{U_2}{U_1}) \end{array} \right.; \quad (4)$$

$$i_{\text{peak2}}=i_{\text{振荡}} \left| \begin{array}{l} \omega=\arctan(\frac{2\omega L}{R}) \\ t=\frac{1}{\omega} \arctan(\frac{2\omega L}{R}) \end{array} \right. \quad (5)$$

当电路中 R 、 L 、 U_0 确定后,根据式(4)、(5)可得到, i_{peak} 关于电容容量 C 的一元单调递增函数 $i_{\text{peak}}(C)$,显然 i_{peak1} 恒大于 i_{peak2} ,因此在求解 $i_{\text{peak}}(C)=i_{\text{临界}}$ 时只需满足式(4)或式(5)即可。

将 $R=2.4 \Omega$ 、 $L=0.2 \text{ H}$ 和 $U_0=220 \text{ V}$ 代入 i_{peak} 中,当 C 取最小值0.14 F时 $i_{\text{peak1}} \approx 67.5 \text{ A} > i_{\text{临界}}$,无法满足 $i_{\text{peak1}}(C)=i_{\text{临界}}$,因此还应考虑非振荡放电过程。

由式(5)可得振荡放电电流峰值为

$$i_{\text{peak2}}(C)=491.93 \sqrt{C} \cdot e^{-\frac{\arctan \sqrt{\frac{0.1389}{C}-1}}{\sqrt{\frac{0.1389}{C}-1}}} \quad (6)$$

求解 $i_{\text{peak2}}(C)=i_{\text{临界}}=44 \text{ A}$ 得到储能电容值为0.021 9 F。为使机构可靠合闸,电容可适当增大,为计算方便取 $C=0.025 \text{ F}$ 。

在某些永磁机构中,由于材料、反力特性等参数与该例存在差异,只要 $i_{\text{peak1}}(C)=i_{\text{临界}}$ 有解,就不需要考虑振荡放电过程。

3 仿真验证

3.1 永磁机构动态特性仿真

圆柱形双稳态永磁操动机构的合闸运动过程包含了电、磁、机械参量的变化和能量的转换,遵循磁场的麦克斯韦方程、电路的电压平衡方程和达朗贝尔运动方程,这些方程共同构成了永磁操动机构的动态特性方程组^[21-22]

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt}=u_c-iR \\ m \frac{d^2x}{dt^2}=f_{\text{mag}}+f_f \\ i=-C \frac{du_c}{dt} \\ \psi|_{t=0}=\psi_0, x|_{t=0}=0, u_c|_{t=0}=U_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: ψ 为电磁系统全磁链,Wb; x 是动铁心的运动位移,m; f_{mag} 是运动部件所受电磁力,N; f_f 是动铁心受到的运动反力,N。在机构的结构和材料确定的情况下是已知的关于动铁心运动位移的函数。

根据前文确定的储能电容大小 $C=25 \text{ mF}$,结合动态特性方程组(7),得到永磁操动机构的合闸动态特性曲线见图6。由图6可知,机构在 τ 时刻开始动作,运动部件位移逐渐增加到指定位移后停止运动,速度减为0,即合闸动作完成。因此,当电容初始电压 $U_0=220 \text{ V}$ 、 $C=25 \text{ mF}$ 时,永磁机构能够可靠合闸。

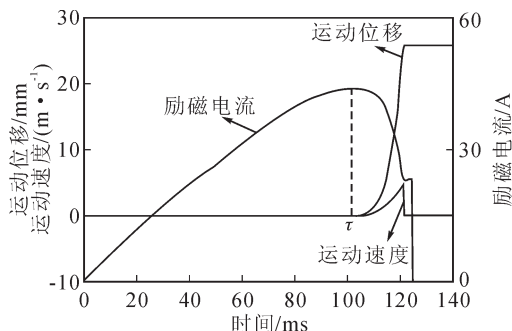


图6 $C=25 \text{ mF}$ 永磁操动机构的动态特性曲线

Fig. 6 Dynamic behaviour of PMA when $C=25 \text{ mF}$

3.2 不同电容励磁时永磁机构速度特性对比

在220 V初始电压情况下,根据文[16]的电容确定原则 $C=140 \text{ mF}$,而笔者计算得到 $C=25 \text{ mF}$,这两种电容取值均能使机构可靠合闸。不同电容值大小条件下永磁机构的速度特性见图7,由图7可知:①采用较大电容($C=140 \text{ mF}$)励磁时,机构先开始动作,但相对于 $C=25 \text{ mF}$,动铁心的末速度较大,会使触头弹跳更加严重;②采用电容 $C=25 \text{ mF}$ 励磁时,合闸平均速度为1.04 m/s,符合合闸速度设计要求;③若励磁电容容量小于文中的储能电容计算值(如取 $C=18 \text{ mF}$),永磁机构无法动作。

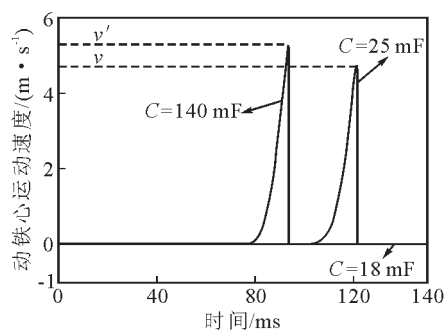


图7 不同大小储能电容励磁永磁机构运动部件的速度特性

Fig. 7 Velocity characteristics of PMA

由上述分析可知,通过励磁电路放电电流的第1个峰值等于永磁操动机构的动作临界电流求得的电容容量大小,既能使机构可靠合闸,又保证 C 取值最小。由于理论分析中忽略了一些影响因素,如永磁机构的动态电感、温度以及电容的残余电压等因素带来的能量损耗等^[11,17,23],因此,可在文中确定的电容容量大小基础上,留有1~2倍的裕度($C=50\sim75 \text{ mF}$)以

确保永磁机构可靠分合闸, 即便如此笔者所确定储能电容大小仍比其他方法确定的电容量小得多。

4 结论

笔者通过建立永磁机构励磁电路模型和运动模型, 分析了永磁机构电路励磁特征和运动特性, 在此基础上提出了永磁操动机构储能电容大小确定原则, 并利用有限元仿真验证了该方法的正确性。通过对不同电容取值条件下永磁机构分、合闸运动特性的分析可知:

1) 电容放电电流的第 1 个峰值达到永磁机构临界动作电流可作为确定电容容量的依据。

2) 文中提出的储能电容确定方法在确保断路器可靠分、合闸的前提下可得到最小的储能电容容量, 从而优化了永磁机构的设计。

3) 实际工程应用中, 利用文中所述方法确定储能电容值后可留有 1~2 倍裕度以保证机构可靠动作。

参考文献:

- [1] 骆虎, 游一民, 陈德桂, 等. 采用 ADAMS 与电磁系统的耦合优化永磁机构[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 335-337. LUO Hu, YOU Yimin, CHEN Degui, et al. Optimum design of permanent magnet mechanism by coupling ADAMS and electromagnetism system[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 335-337.
- [2] 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. LI Bin, GUO Fengyi, WANG Zhiyong, et al. Bi-state PMA optimization design and intelligent controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 83-89.
- [3] 谭东现, 李岩, 牟坚, 等. 动态式双稳态永磁机构的研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 229-231. TAN Dongxian, LI Yan, MOU Jian, et al. Research of novel dynamic bi-static permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 229-231.
- [4] 林莘, 史可鉴, 徐建源. 材料的导磁性能对永磁机构动态特性的影响[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 1-6. LIN Xin, SHI Kejian, XU Jianyuan. Influence of permeable property of material on dynamic characteristic of permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 1-6.
- [5] 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. TANG Geng, XU Jianyuan, LIN Xin, et al. Research on the control method of vacuum circuit breakers with permanent magnet actuator based on the detecting and tracking of signals[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 1-6.
- [6] 刘焱, 王宏, 王洋, 等. 基于磁路饱和和调整的永磁机构设计方法[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 61-65. LIU Yan, WANG Hong, WANG Yang, et al. Design of permanent magnetic actuator based on the magnetic saturation control[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 61-65.
- [7] 张楠, 田阳, 林莘, 等. 基于动态仿真的永磁机构工作磁路的调整[J]. 电工电气, 2009(6): 22-25. ZHANG Nan, TIAN Yang, LIN Xin, et al. Adjustment on working magnetic circuit of the permanent magnetic mechanism based on dynamic simulation[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2009(6): 22-25.
- [8] 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. LIN Xin, CAO Chen, LI Bin, et al. Dynamic simulation and experiment of vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 1-5.
- [9] 骆一萍, 胡向阳, 倪海蛟, 等. 基于永磁开关的电容器组同步投切装置的研制[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 24-29. LUO Yiping, HU Xiangyang, NI Haijiao, et al. Development of synchronous switching device for capacitor bank based on permanent magnet switch[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 24-29.
- [10] 尹婷, 张昕, 陈轩恕, 等. 一种采用超级电容器供能的真空断路器永磁操动机构[J]. 低压电器, 2009(11): 7-9. YIN Ting, ZHANG Xin, CHEN Xuanshu, et al. A sort of permanent magnetic operating mechanism for vacuum breaker powered by super capacitors[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(11): 7-9.
- [11] 牟龙华, 刘晓明, 张鑫. 永磁操作机构储能电容的状态评估与预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1903-1909. MOU Longhua, LIU Xiaoming, ZHANG Xin. Condition assessment and prediction of energy-storage capacitors used in permanent magnetic mechanism[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(12): 1903-1909.
- [12] 陈伟, 王鹏, 吴刚. 蓄电池和超级电容储能的独立光伏系统能量管理研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(7): 9-13. CHEN Wei, WANG Peng, WU Gang. Study on stand-alone PV system energy management of battery & super capacitor[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(7): 9-13.
- [13] 吴姗姗, 韩冬, 李金鹏, 等. 含超级电容储能系统的统一电能质量调节器的研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(10): 57-60. WU Shanshan, HAN Dong, LI Jinpeng, et al. Probe into unified power quality conditioner with super capacitor for energy storage system[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(10): 57-60.
- [14] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 基于动态分析的永磁机构

- 最佳设计参数的选择[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 43-46.
- YOU Yimin, CHEN Degui, SUN Zhiqiang, et al. Optimal design of permanent magnetic actuator based on dynamic behavior analysis[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(1): 43-46.
- [15] 邱关源. 电路[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 156-161.
- QIU Guanyuan. Electric circuit[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 156-161.
- [16] 张来福. 永磁操作机构真空断路器储能电容参数的选择[J]. 山西电力, 2007(2): 1-3.
- ZHANG Laifu. Parameter selection of energy storage capacitor used in vacuum circuit breaker driven by permanent magnetic actuator[J]. Shanxi Electric Power, 2007(2): 1-3.
- [17] 石运强. 永磁式真空断路器操作机构的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- SHI Yunqiang. Research on permanent magnetic actuator for vacuum circuit breaker[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [18] 冯英, 武建文, 秦晨. 永磁机构磁路分段图示法求解[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 24-28.
- FENG Ying, WU Jianwen, QIN Chen. Fractionation and graphic methods for analyzing the magnetic circuit of permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 24-28.
- [19] 赵修科. 实用电源技术手册-磁性元器件分册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 116.
- ZHAO Xiuke. Practical technique data book of power supply-magnetic components[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002: 116.
- [20] 游一民, 陈德桂, 罗文科, 等. 关于永磁机构中永磁工作点的讨论[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 39-41.
- YOU Yimin, CHEN Degui, LUO Wenke, et al. Discussion on the working point of permanent magnet in permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 39-41.
- [21] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 49-54.
- LIN Xin. Permanent magnetic actuator and vacuum circuit breaker[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 49-54.
- [22] 吕锦柏, 王毅, 常广, 等. 优化的永磁真空断路器合闸控制方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2836-2844.
- LYU Jinbai, WANG Yi, CHANG Guang, et al. Optimal closing control of permanent magnetic vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2836-2844.
- [23] 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.
- YANG Qian, ZHANG Ying, YE Zubiao. Research on mechanical characteristics of permanent-magnetic vacuum circuit breaker influenced by temperature[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 46-52.
- 谢超(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁场的仿真计算。
- 吴细秀(1976—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事开关电器、电磁暂态等方面的研究(通信作者)。