

基于操作功最优的永磁机构参数控制优化

金立军¹,王泽泽¹,郭裕¹,李水清²,方临川²

(1. 同济大学 电气工程系,上海 201804;2. 正泰电气股份有限公司,上海 201620)

摘要:以永磁机构分、合闸操作功与真空断路器开断性能要求匹配最优为目标,基于四连杆传动规律将 12 kV 真空断路器本体及传动机构的反力特性归算至永磁机构的运动部件动铁芯上,构建永磁机构操动特性数学模型。利用 ANSYS-Maxwell 仿真得到配永磁机构真空断路器的动铁芯位移、线圈电流、电容电压变化曲线等操动特性,计算出机构平均合闸速度、操作功等参数。以真空断路器操作功最优为目标函数,以线圈匝数、线径、操动电流为约束条件,在仿真的基础上建立正交回归实验,利用遗传算法对线圈参数进行优化设计,并通过实验进行验证。结果表明,在保证永磁机构操动特性满足真空断路器动作特性需求条件下,线圈优化设计后的永磁机构操作功从 970.41 J 降低到 362.26 J,降低了动铁芯碰撞速度,提高了机构的稳定性。

关键词: 永磁机构; 断路器; 操作功最优; 动态仿真; 参数优化

中图分类号: TM 561

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.018

0 引言

永磁操动机构^[1-2]结构简单、操动控制性能良好、稳定可靠、自动化程度高^[3],受到研究机构和业界的广泛关注,为智能开关的研发提供了一条新的路径。在中压级别的断路器中,永磁机构的动铁芯行程能够满足灭弧室中动触头的行程要求^[4],因而应用较为广泛^[5]。

永磁机构虽然优点突出,但在实际应用中存在不少问题,例如为追求较快的合闸速度,永磁机构完成一次合闸所消耗的电容输出能量(操作功)过高^[6],操动机构的运动部件动铁芯在刚合位置速度过大,与端盖的碰撞过于激烈,造成机构故障率增大;线圈在合闸过程中电流过大^[7]、线圈参数设计不合理导致机构在频繁操作时温升过高^[8],引起线圈绝缘层破坏,甚至导致匝间短路。永磁机构在操动过程中存在电磁过程和机械过程的交互耦合影响^[9],导致该机构的仿真难度大^[10]、分析计算复杂^[11]。目前有关永磁机构仿真优化设计问题^[12-14]的研究,多是先计算永磁机构的出力特性,再加载至机械结构中进行,但电磁力的施加难度大、误差多,迭代过程需要编程实现,仿真实验结果不准确。所以寻找合适的仿真实验方法,针对操作功进行优化^[15],设计合理的线圈参数,降低永磁机构的能耗和成本,提升永磁机构的寿命和安全性意义重大。

本文针对永磁机构真空断路器动态仿真既有电磁过程又有机械过程的难题,提出了新的仿真方法,利用四连杆传动规律,将真空断路器本体和传动机构

的反力作用归算到永磁机构的动铁芯上,在 ANSYS-Maxwell 软件中建模并实现 12 kV 永磁机构真空断路器的动态仿真,仿真得到永磁机构平均合闸速度、一次合闸所需的操作功。为优化操作功并抑制合闸电流峰值,通过仿真进行正交回归实验,建立操作功关于线圈匝数、线径之间的耦合关系,利用遗传算法对线圈参数进行优化,优化机构满足 12 kV 真空断路器的合闸速度要求且合闸峰值电流小,操作功最优。

1 永磁机构传动四连杆模型

本文研究的 12 kV 永磁机构真空断路器的结构如图 1 所示。连杆 2 的下臂、连杆 3 和连杆 4 的右半部分组成了四连杆^[16],如图 2 所示。

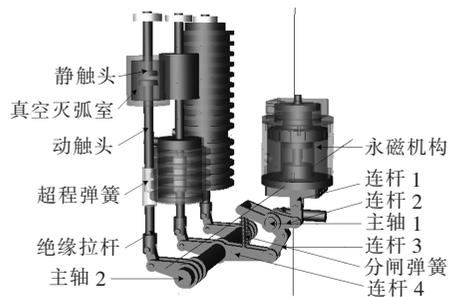


图 1 永磁操动机构真空断路器模型

Fig.1 Model of permanent magnetic actuator vacuum circuit breaker

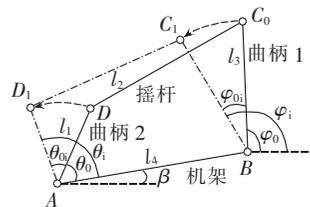


图 2 四连杆传动关系示意图

Fig.2 Relationship of four-link drive

对于四连杆机构,最重要的是连杆的运动状态和

收稿日期:2016-08-06;修回日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577135)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577135)

运动变化过程,而传动角是衡量运动变化过程的一个关键变化量。对于图 2 中的四连杆机构,利用余弦定理及四连杆的参数可得到曲柄 1 旋转角 φ_{0i} 与曲柄 2 旋转角 θ_{0i} 两者之间的关系:

$$\varphi_{0i} = \arctan \frac{l_1 \sin \theta_0}{1 - l_1 \cos \theta_0} + \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + l_3^2 + 1 - 2l_1 \cos \theta_0}{2l_3 \sqrt{l_1^2 + 1 - 2l_1 \cos \theta_0}} - \arctan \frac{l_1 \sin(\theta_0 + \theta_{0i})}{1 - l_1 \cos(\theta_0 + \theta_{0i})} - \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + l_3^2 + 1 - 2l_1 \cos(\theta_0 + \theta_{0i})}{2l_3 \sqrt{l_1^2 + 1 - 2l_1 \cos(\theta_0 + \theta_{0i})}} \quad (1)$$

其中,设图 2 中 l_4 为单位长度, l_1, l_2, l_3 为相对长度。

2 12 kV 真空断路器反力归算

反力归算是将机构受到的所有非电磁作用力等效加载到永磁机构的动铁芯上,包括触头作用力、触头超程弹簧作用力、分闸弹簧作用力、复位弹簧作用力、摩擦阻力、真空压力等。

反力归算的过程如图 3 所示,触头超程弹簧预压力 2350 N,动触头达到 9 mm 行程后与静触头结合时才对绝缘导杆产生作用力,真空压力 150 N,摩擦阻力不计,合力 F_1 。分闸弹簧作用力 F_2 ,利用力矩守恒原理,将这 2 个力等效归算至 F_B ,一直归算至 F_E ,考虑复位弹簧的初始作用力 F_3 。利用 MATLAB 编程进行计算得到动铁芯上总的反力作用。在图 3 中, $F_F = F_1 \cos(\omega - 90^\circ)$, $F_A = F_2 \sin \beta$, $F_B = F_A l_A + F_F l_F$, $F_C = F_B / \cos(\gamma - 90^\circ)$, $F_D = F_C \cos(\varphi - 90^\circ)$, $F_E = F_D l_D / l_E$, $F'_E = F_E / \cos(\phi - 90^\circ)$, $F_0 = F_3 + F'_E$ 。

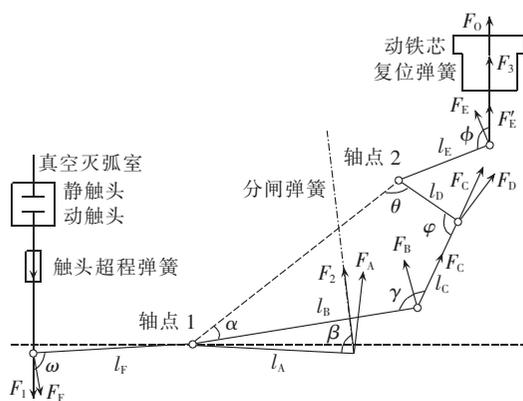


图 3 真空断路器反力计算过程

Fig.3 Calculation of reaction force for vacuum circuit breaker

归算到动铁芯上的反力特性如图 4 所示,触头闭合前,反力主要来自分闸弹簧和复位弹簧,反力随着动铁芯向下运动而增加,当动触头与静触头闭合后,由于触头超程弹簧有 2350 N 的初始压力,反力呈现陡增状态,之后反力表现出随着动铁芯继续向下移动而减小的特性,这是该机构的一个特点,主要原因是传动机构中的连杆 2 的下臂与连杆 3 之间的

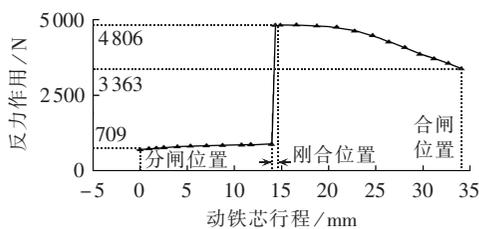


图 4 动铁芯所受反力作用

Fig.4 Reaction force on moving core

夹角 φ 会随着动铁芯不断向下而增大,按上面的方法归算到沿连杆 3 的反力 F_C 与归算到连杆 2 上的力矩 F_D 的关系 $F_D = F_C \cos(\varphi - 90^\circ)$,虽然由于触头弹簧的作用力增大使得 F_C 增大,但是 φ 的增大使得归算的 F_D 减小。

3 ANSYS 永磁机构操动特性仿真实验

根据上述归算至动铁芯上的反力作用,在电磁仿真软件 ANSYS-Maxwell 建立永磁操动机构模型,将外部反作用力导入模型铁芯中,将外部激励导入模型线圈中,通过施加激励和负载分别进行永磁操动机构的合闸、分闸动态仿真实验^[17-18],得到动铁芯运动速度曲线并计算出平均合闸速度曲线、线圈电流变化曲线、电容电压变化曲线等。

本文研究的永磁操动机构外部激励采用 44 mF 储能电容对动作线圈进行供电,初始电压 220 V,线圈匝数 400 匝,线径 1.8 mm,线圈等效电阻 0.79 Ω ,等效电感 21 mH,其模型类似 RLC 供电回路,当断路器进行合闸操作时,外部激励对动作线圈通正反向电流,通电时间 60 ms,抵消永磁体在合闸位置对动铁芯的保持作用力,并产生电磁作用力将动铁芯吸引至合闸位置,动铁芯合闸过程中经过线圈时引起线圈电感变化,产生相应的感应电动势,该感应电动势与电容电压相反,外部激励回路满足电压平衡方程:

$$U_C = iR + L \frac{di}{dt} + E_e, \quad i = C \frac{dU_C}{dt} \quad (2)$$

即:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{dE_e}{dt} + R \frac{di}{dt} - \frac{i}{C} = 0 \quad (3)$$

动铁芯在运动过程中受到线圈的电磁作用力和反作用力,其速度受这 2 个力的作用并影响感应电动势的大小,进而影响电磁作用力的大小,运动过程满足达朗贝尔运动方程:

$$\int_0^t F_H dt = Mv_t, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F}{M}, \quad \frac{dS}{dt} = v, \quad F_T = F_{\text{mag}} - F_L \quad (4)$$

其中, F_H 为动铁芯受到的合力; M 为动铁芯的质量; v_t 为动铁芯 t 时刻的速度; S 为动铁芯的位移; F_{mag} 为动铁芯受到的电磁力; F_L 为动铁芯受到的反作用力; F_T 为电磁力和反作用力的合力。

分闸操作时给线圈通反方向电流,线圈产生的

电磁作用力抵消在合闸位置永磁体产生的保持力,动铁芯在分闸弹簧、复位弹簧及其他反力作用下分闸,分闸操作通电时间 30 ms。

ANSYS-Maxwell 将电压平衡方程和达朗贝尔运动方程组结合在一起,综合考虑动铁芯运动过程中的电磁作用和机械作用,通过有限元分析计算,仿真得到动铁芯位移曲线、线圈电流变化曲线、电容电压变化曲线,并根据反力归算的原理推导真空灭弧室内动触头的位移曲线,其中合、分闸动作的仿真结果如图 5—7 所示。

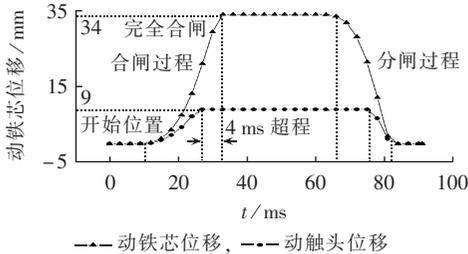


图 5 动铁芯、动触头位移曲线
Fig.5 Position of moving core and moving contact

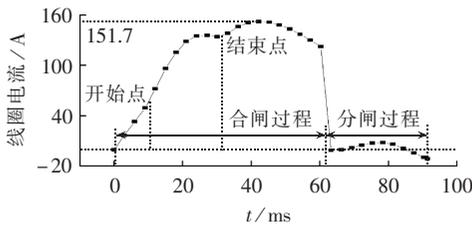


图 6 线圈电流变化曲线
Fig.6 Current of coil

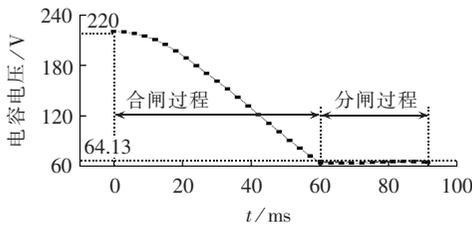


图 7 电容电压变化曲线
Fig.7 Voltage of capacity

根据仿真结果计算出动触头平均合闸速度 0.6 m/s,平均分闸速度 1.12 m/s,满足 12 kV 真空断路器合、分闸要求(平均合闸速度 (0.6 ± 0.2) m/s^[19],平均分闸速度 (1.1 ± 0.2) m/s),电流峰值 151.7 A。

由单次合闸操作过程线圈中的电流变化曲线,计算出 400 匝 1.5 mm 线径的铜线圈发热 654.3 J,不考虑散热(时间 50 ms 内)情况下线圈温升达到 0.65℃。

该永磁机构采用紧凑型设计,机构体积小,线圈处于内部环境,无任何通风降温措施,如果操动机构处于高频次工作环境下,线圈温升过高,导致线圈导线的漆包层绝缘性能破坏,易引起线圈匝间短路故障,线圈匝间短路时,等效电阻减小,电流增大,发热

量也越大,导致发热恶性循环,使永磁机构产生故障,影响断路器的可靠稳定性。

为验证通过四连杆机构反力归算进行永磁机构真空断路器仿真实验的准确性,对 12 kV/31.5 kA 永磁机构真空断路器进行机构动态特性实测。实测基于某型号的断路器试验台,在真空断路器空载的情况下,进行合闸-分闸-自动重合闸操作实验,实验准确测出真空断路器操动机构的动态特性,包括分、合闸时动触头动铁芯行程曲线、电容电压以及线圈电流等。

断路器实验台测得的动铁芯行程曲线与仿真结果比较如图 8 所示。动铁芯实时位移误差不大于 10%,两曲线拟合度达 92%,可以验证仿真实验的准确性,ANSYS-Maxwell 仿真因不涉及机械碰撞问题,因此在合闸位置没有反映弹跳作用。

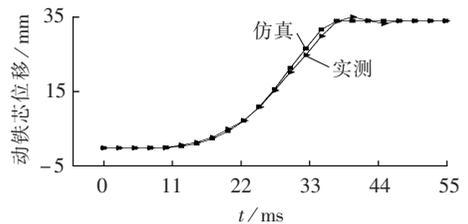


图 8 动铁芯行程曲线仿真与实测对比
Fig.8 Simulative and experimental curves of moving core stroke

4 操作功与线圈参数耦合求解

匝数 400 匝、线径 1.8 mm 的线圈执行一次合闸动作,电容电压由 220 V 降至 65.5 V,压降为 154.5 V,电容输出的能量为:

$$Q = \frac{1}{2}CU_0^2 - \frac{1}{2}CU_1^2 = \frac{1}{2} \times 0.044 \times (220^2 - 65.5^2) \approx 970.41 \text{ (J)} \quad (5)$$

为确定操作功、线圈峰值电流、平均合闸速度与线圈参数的耦合关系,在 ANSYS-Maxwell 中进行正交回归仿真实验。正交回归实验^[20-21]是在已定参数范围内选择实验点进行实验,通过实验结果建立回归方程,从而解决实验优化问题。步骤包括确定参数范围、编码、实验、设计正交矩阵、导入数据、计算系数、得到函数模型。

确定线圈参数范围,并进行编码。考虑线圈骨架可绕空间和线圈导线承受电流的能力,永磁机构合闸线圈的匝数分布为 400 匝至 800 匝,线径可选用 1.5 mm 至 2.1 mm 的铜导线,参数因素水平和编码表如表 1 所示。

$$r^2 = \frac{-m_c + \sqrt{m_c^2 + 2m_c(m + m_0/2)}}{2} \quad (6)$$

其中, m 为因素个数; m_c 为二水平(+1 和 -1)的全因

表 1 正交实验设计编码表

Table 1 Code for orthogonal experiment

因素	编码	匝数	线径/mm
上水平	1	800	2.1
零水平	0	600	1.8
下水平	-1	400	1.5
r 水平	r	600×r	1.8×r
间隔	1	200	0.3

素实验点; m_0 为 x_1, x_2 均取零水平所组成的中心实验点, x_1, x_2 为正交实验的 2 个因素。

在因素空间内选择实验点,组合起来形成实验计划,在有 2 个变量(线圈匝数 N 和线径 d) 的场合下,组合设计由 9 个实验点组成,见图 9。对应的正交实验计算矩阵及实验结果见表 2。由上述计算矩阵及正交回归实验系数计算方法得到操作功 y_{power} 关于线圈匝数、导线线径的函数关系式可表达为:

$$y_{\text{power}} = 566.70 - 263.11x_1 + 48.76x_2 - 29.80x_1x_2 + 54.76(x_1^2 - 2/3) - 5.70(x_2^2 - 2/3) \quad (7)$$

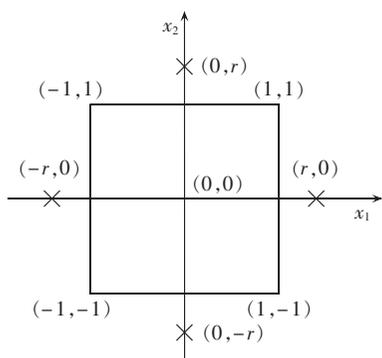


图 9 二变量组合设计试验点分布

Fig.9 Distribution of two-variable test point

合闸电流峰值 A_{peak} 关于线圈匝数、导线线径的函数关系式可表达为:

$$A_{\text{peak}} = 84.33 - 42.30x_1 + 10.38x_2 - 8.45x_1x_2 + 15.09(x_1^2 - 2/3) + 0.69(x_2^2 - 2/3) \quad (8)$$

断路器平均合闸速度 V_{ave} 关于线圈匝数、导线线径的函数关系式可表达为:

$$V_{\text{ave}} = 0.511 - 0.066x_1 + 0.026x_2 - 0.015x_1x_2 + 0.022(x_1^2 - 2/3) - 0.003(x_2^2 - 2/3) \quad (9)$$

表 2 正交实验设计计算矩阵

Table 2 Calculation matrix for orthogonal experiment

编号	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2 - 2/3$	$x_2^2 - 2/3$	$y_{\text{power}}/\text{J}$	A_{peak}/A	$V_{\text{ave}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	1	1	1	0.333	0.333	343.98	50.31	0.464
2	1	-1	-1	0.333	0.333	299.67	43.75	0.439
3	-1	1	-1	0.333	0.333	924.32	152.04	0.625
4	-1	-1	1	0.333	0.333	760.80	111.69	0.542
5	1	0	0	0.333	-0.667	322.72	47.25	0.455
6	1	0	0	0.333	-0.667	859.93	131.39	0.588
7	0	1	0	-0.667	0.333	573.23	82.61	0.520
8	0	-1	0	-0.667	0.333	488.50	67.23	0.474
9	0	0	0	-0.667	-0.667	527.14	72.73	0.495

其中, $x_1 = \frac{N-600}{200}$, N 为线圈匝数; $x_2 = \frac{d-1.8}{0.3}$, d 为导线直径。

5 基于遗传算法的线圈参数寻优

根据上述正交回归实验得到的操作功与线圈参数的耦合函数关系、基于遗传算法一定寻优条件下的永磁机构操作功最优的线圈参数值,寻优条件设置如下: $V_{\text{ave}} = (0.6 \pm 0.2) \text{ m/s}$; $A_{\text{peak}}(N_{n+1}, d_{n+1}) \leq A_{\text{peak}}(N_n, d_n)$, 其中 N_n, N_{n+1} 分别为第 $n, n+1$ 次迭代时的线圈匝数, d_n, d_{n+1} 分别为第 $n, n+1$ 次迭代时的线径;线圈骨架限制为 $N \times d^2 \leq 2280 \text{ mm}^2$ (2280 mm^2 为骨架一半截面积);操作功取满足上述条件的最小值。

遗传算法模拟生物进化论自然选择和遗传学机理搜索最优解,从可能潜在解集寻找最优个体作为问题最优解。遗传算法在全局方位内寻找最优,适用于本文研究的永磁机构线圈参数最优设计问题,计算过程如图 10 所示。

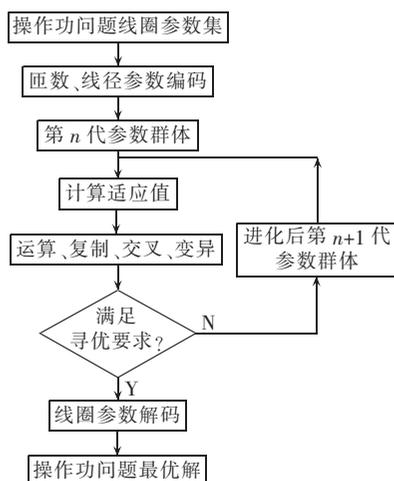


图 10 基于遗传算法的计算流程

Fig.10 Calculation flowchart based on genetic algorithm

在 MATLAB 中进行遗传算法的编程计算,群体规模 2400,仿真代数 100,交叉概率 0.05,变异概率 0.85,根据编码条件,匝数和线径参数取值范围均为 $[-1, 1]$,单个参数字串长度 10,目标函数为操作功,

在寻优条件的限制下,通过遗传算法得到的操作功最优适应度进化曲线如图 11 所示。

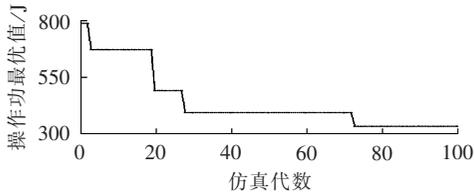
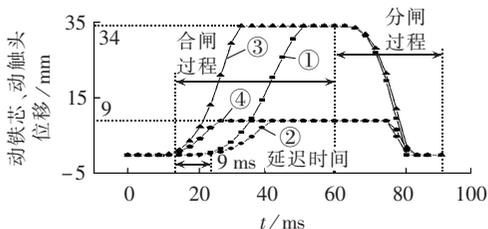


图 11 操作功最优适应度进化曲线
Fig.11 Curve of optimal fitness evolution of operating power

操作功最优值 337.55J,对应 $x_1=0.99$ 、 $x_2=-0.87$,即对应的线圈匝数 798 匝、线径 1.54 mm。考虑实际工程线圈材料选用问题,12 kV 永磁机构的线圈最优参数设为匝数 800 匝、线径 1.6 mm。

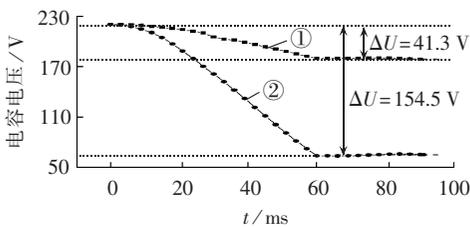
对线圈参数优化机构进行仿真实验,得到相应的峰值电流 49.0 A、平均合闸速度 0.45 m/s、电压降 41.3 V、操作功 362.26 J。优化机构与原始机构合分闸行程曲线、电压变化曲线、电流曲线对比如图 12—14 所示。对比结果可以得到经过优化的永磁操动机构不仅满足 12 kV 真空断路器的合分闸要求,而且降低了合闸线圈中的峰值电流,使机构所需要的操作功最少,动铁芯刚合速度由 1.53 m/s 降低至 1.17 m/s,提升了该永磁操动机构的动作可靠性和能量利用率。优化机构由于电流增长减慢,永磁机构的出力特性延缓,触头启动产生 9 ms 的延迟,但是合闸动作在 60 ms 以内完成,满足了真空断路器的配合要求。



① 优化动铁芯位移, ② 优化动触头位移
③ 动铁芯位移, ④ 动触头位移

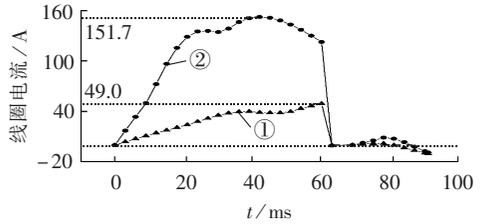
图 12 优化机构与原机构动铁芯、动触头位移曲线对比

Fig.12 Position comparison of moving core and moving contact between original and optimal actuators



① 优化电容电压, ② 原电容电压

图 13 优化机构与原机构电容电压曲线对比
Fig.13 Comparison of capacitor voltage between original and optimal actuators



① 优化线圈电流, ② 原线圈电流

图 14 优化机构与原机构线圈电流曲线对比
Fig.14 Comparison of coil current between original and optimal actuators

6 结论

本文通过对四连杆传动机构运动规律的研究,将断路器本体操动元件及传动机构的反力作用归算至永磁操动机构的动铁芯上,在 ANSYS-Maxwell 软件中实现永磁操动机构动力学特性的仿真,为配永磁机构的真空断路器特性研究提供了新的方法,通过样机实验验证了仿真结果的正确性。得到如下结论。

a. 通过四连杆传动规律将断路器本体及传动机构反力作用归算至永磁机构动铁芯,在 ANSYS 电磁软件中实现了永磁机构真空断路器的仿真实验,该仿真方法得到了实测的验证,准确度高,误差小。

b. 通过设计正交回归实验建立了操作功、线圈峰值电流、平均合闸速度关于线圈线径、匝数参数的耦合关系,并利用遗传算法计算出永磁机构在满足合闸要求、抑制峰值电流的条件下操作功最优的线圈参数。

c. 优化的永磁操动机构线圈匝数由 400 匝提升至 800 匝,导线线径由 1.8 mm 优化至 1.6 mm,优化机构合闸峰值电流由 151.7 A 降至 49.0 A,电容压降由 154.5 V 降至 41.3 V,永磁机构操作功由 970.41 J 降至 362.26 J,平均合闸速度 0.45 m/s,刚分速度 1.12 m/s,满足该等级真空断路器合、分闸要求。刚合速度由 1.53 m/s 降至 1.17 m/s,提高了永磁操动机构的使用寿命和安全稳定性,降低了机构的生产成本,提升了能量利用效率。

参考文献:

[1] 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.
SUN Liqiong,WANG Zhenxing,HE Sainan,et al. 126 kV vacuum circuit breaker separation magnetic circuit type permanent magnetic operating mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(20):49-56.

[2] GUO Kaikai,FANG Shuhua,YANG Hui. A novel linear-rotary permanent-magnet actuator using interlaced poles[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(11):1-4.

[3] 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.
HUANG Xinbo,WANG Yanmei,ZHU Yongcan,et al. The nonstable

- permanent magnetic actuator column circuit breaker design of power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 160-165.
- [4] 张庆杰,袁海文. 配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 98-103.
ZHANG Qingjie, YUAN Haiwen. The vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator synchronized switch control system design and implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 98-103.
- [5] 李斌,郭凤仪,王喜利,等. 双稳态永磁机构智能控制器研制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 118-120.
LI Bin, GUO Fengyi, WANG Xili, et al. Bistable permanent magnetic actuator intelligent controller development[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 118-120.
- [6] 田铭兴,石鹏太,马亚珍. n 级饱和磁阀式可控电抗器结构特性和仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 95-101.
TIAN Mingxing, SHI Pengtai, MA Yazhen. Structure characteristics and simulation method of n stage saturable magnetic valve controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 95-101.
- [7] LEE C H, BU S H, BANG Y B. Designing a permanent-magnetic actuator for vacuum circuit breakers using the taguchi method and dynamic characteristic analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1655-1664.
- [8] 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. Bistable permanent magnetic mechanism design and optimization of intelligent controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Technology, 2013, 28(10): 83-89.
- [9] ZÁRATE J J, TOSOLINI G, PETRONI S, et al. Optimization of the force and power consumption of a microfabricated magnetic actuator[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2015, 64(234): 57-64.
- [10] 马静,裴迅,马伟,等. 基于方向权重的广域后备保护跳闸策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 107-114.
MA Jing, PEI Xun, MA Wei, et al. Tripping strategy of wide area backup protection based on directional weight[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 107-114.
- [11] 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 method of permanent magnet mechanism based on magnetic circuit saturation adjustment[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 61-65.
- [12] 李昊旻,林莘,徐建源. 126 kV 真空断路器永磁摆角电机操动机构的设计与动态特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1664-1669.
LI Haomin, LIN Shen, XU Jianyuan. 126 kV vacuum circuit breaker permanent magnet swing angle motor operation dynamic mechanism design and dynamic characteristics analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1664-1669.
- [13] RO J S, HONG S K, JUNG H K. Characteristic analysis and design of a novel permanent magnetic actuator for a vacuum circuit breaker[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(2): 87-96.
- [14] 曹文思,郭恒,巩鲁洪,等. 真空断路器永磁操作机构控制器保护电路元件参数优化设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 83-88.
CAO Wensi, GUO Heng, GONG Luhong, et al. Vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator controller protects the circuit element parameters optimization design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 83-88.
- [15] 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.
LÜ Jinbai, WANG Yi, CHANG Guang, et al. Optimization of permanent magnetic vacuum circuit breaker control method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2836-2844.
- [16] 汪倩,陈德桂,李兴文,等. 一种分析多连杆永磁操动机构动态特性的方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 128-133.
WANG Qian, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. An analysis of the dynamic characteristics of the mechanism method of permanent magnetic actuator with multi bar linkage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 128-133.
- [17] 周丽丽,方春恩,李伟,等. 27.5 kV 永磁机构真空断路器动作特性仿真与试验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 214-216.
ZHOU Lili, FANG Chunen, LI Wei, et al. 27.5 kV permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker action characteristic simulation and experimental study[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 214-216.
- [18] 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 Shen, CAO Chen, LI Bin, et al. Dynamic simulation and experiment of vacuum circuit breaker with permanent magnetic mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 1-5.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 交流高压断路器:GB 1984—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [20] 郑跃胜,刘志远,王仲奕,等. 基于正交设计的杯状纵磁真空灭弧室磁场特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 23-27.
ZHENG Yuesheng, LIU Zhiyuan, WANG Zhongyi, et al. Analysis of magnetic field characteristics of cup longitudinal magnetic vacuum arc extinguishing chamber based on orthogonal design[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 23-27.
- [21] SILVEIRA L R, TANSCHKEIT R, VELLASCO M. Quantum-inspired genetic algorithms applied to ordering combinatorial optimization problems[C]//2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC). Brisbane, Australia: IEEE, 2012: 1-7.

作者简介:



金立军

金立军(1964—),男,浙江杭州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统及其检测技术(**E-mail**: jinlj@tongji.edu.cn);

王泽泽(1991—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为电机与电器(**E-mail**: zezewang7@163.com);

郭裕(1990—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其检测技术。

Parameter optimization of permanent magnetic actuator based on optimal operating energy

JIN Lijun¹, WANG Zeze¹, GUO Yu¹, LI Shuiqing², FANG Linchuan²

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. CHIINT Electric Co., Ltd., Shanghai 201620, China)

Abstract: To satisfy the closing operation of vacuum circuit breaker and power performance requirements, the reaction characteristics of 12 kV vacuum circuit breaker body and transmission mechanism are converted to the moving core based on four-link transmission rule, and the mathematical model of the operating characteristic of permanent magnetic actuator is established. The core's displacement, the coil current and the capacitance voltage are obtained through the ANSYS-Maxwell simulation to calculate the average closing speed, the operating power and other parameters. Taking the optimal operating power of vacuum circuit breaker as objective function and the number of coil turns, the wire diameter and the operating current as the constraints, the orthogonal regression experiment is established based on simulations. The coil parameters are optimal designed by genetic algorithm. Experimental results show that the operating characteristics of permanent magnetic actuator meet the demand characteristics of vacuum circuit breaker, the operating power of permanent magnetic actuator is reduced from 970.41 J to 362.26 J with the optimal design, the impact velocity of the moving iron core is reduced, and the stability of the permanent magnetic actuator is improved.

Key words: permanent magnetic actuator; electric current breakers; optimal operating power; dynamic simulation; parameter optimization

(上接第 111 页 continued from page 111)

[13] 胡亚平,吕飞鹏,周鑫,等. 基于 PRONY 法的超高压线路单相自适应重合闸故障识别原理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9):23-26.

HU Yaping, LÜ Feipeng, ZHOU Xin, et al. Identification of faults occurred on the extra high voltage transmission line based on PRONY method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9):23-26.

[14] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京:科学出版社, 2009: 186-190.

作者简介:



张云柯

张云柯(1988—),男,河南周口人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:yunke@tju.edu.cn);

李博通(1981—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:libotong@tju.edu.cn)。

Three-phase permanent fault identification for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors

ZHANG Yunke, LI Botong, JIA Jianfei, JING Fangjie, LIU Yichao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The residual voltage characteristics of different two-phase and three-phase faults are analyzed for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors and a criterion based on the frequency measurements of differential mode voltage is proposed for identifying the interphase faults. After the breakers of both sides are tripped for a fault of hybrid line, the frequency of differential mode voltage is quickly obtained by the extended Prony algorithm, which is slightly below the power frequency for a transient fault while close to zero for a permanent fault. A method based on this property can be easily implemented to distinguish the instantaneous fault from the permanent fault. A lot of EMTDC simulations show that, immune to transition resistance, fault location and cable proportion, the proposed method effectively and reliably distinguishes the instantaneous fault from the permanent fault of EHV cable-overhead hybrid line.

Key words: hybrid line; shunt reactors; permanent fault; transient fault; differential mode voltage; failure analysis