

文章编号:1009-3087(2015)05-0146-07

DOI:10.15961/j.jsuese.2015.05.021

基于线圈电流的高压断路器操作机构性能研究

赵莉华¹,张浩¹,景伟²,阳薇²,荣强¹,付荣荣¹,丰遥¹

(1. 四川大学电气信息学院,四川成都 610065;2. 国网黑龙江电力有限公司检修公司,黑龙江哈尔滨 150090)

摘要:为研究分合闸线圈电流波形曲线与电磁系统及机构传动系统性能之间的关系,利用磁路法分别建立了高压断路器弹簧和液压操作机构分合闸电磁系统的数学模型,通过理论和仿真研究电磁系统线圈电压、线圈回路电阻、铁芯工作气隙等参数变化对分合闸线圈电流的影响。并选取带弹簧机构的126 kV高压断路器和带液压机构的550 kV高压断路器进行了电磁系统参数变化条件下的试验。仿真与试验结果表明,所建立的模型正确,能够反映电磁系统的实际运行状况,操作机构电磁系统分合闸线圈电压、线圈回路电阻及铁芯工作气隙等参数变化对操作机构动作性能产生很大影响,从而影响高压断路器分合闸动作性能及可靠性,研究结果对高压断路器操作机构的状态分析及评估具有重要意义。

关键词:高压断路器;电磁系统;线圈电流;机构性能

中图分类号:TM561

文献标志码:A

Research on Operating Mechanism Performance of High Voltage Circuit Breaker Based on the Coil Current

ZHAO Lihua¹,ZHANG Hao¹,JING Wei²,YANG Wei²,RONG Qiang¹,FU Rongrong¹,FENG Yao¹

(1. School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Maintenance Co. of Heilongjiang Electric Power Co. Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract:In order to study the relationship between coil current and electromagnetic system performance, an electromagnetic system mathematical model of hydraulic and spring high-voltage circuit breaker operating mechanism was established by magnetic circuit. The effect of parameters, such as coil voltage, coil loop resistance and the core air travel, on coil current was analyzed in theory and simulation. Tests were carried out on high-voltage circuit breakers of 126 kV spring mechanism and 550 kV hydraulic mechanism with changing electromagnetic system parameters. The simulation and experimental results showed that electromagnetic system parameters, such as closing coil voltage, coil loop resistance and core air travel, have a significant impact on the performance of the operating mechanism, and would affect the operation of high voltage circuit breakers performance and reliability. The research results could have important implications for the status assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism.

Key words:high-voltage circuit breakers;electromagnetic system;coil current;operating mechanism performance

电力系统的可靠运行是国民经济稳步发展的基石,而高压断路器是电力系统重要的保护和控制设备,其运行可靠性直接影响电力系统运行的可靠性,所以保证高压断路器运行可靠性是维持电力系统可靠运行的必要条件。高压断路器与其他电气设备相比,机械部分零部件特别多,加之这些部件动作频繁,因此断路器中机械部件故障率较高。中国电力

科学研究院对全国6 kV及以上高压断路器故障原因的统计分析结果表明,在断路器拒动、误动故障中因操作机构及其传动系统机械故障导致的故障比例高达41.63%;国际大电网会议(CIGRE)调查了1988年后运行的高压断路器故障状况,结果表明机构机械故障占43.5%,居于首位。所以,高压断路器操作机构机械零部件的安全可靠运行是保证断路

收稿日期:2015-01-17

基金项目:国家电网科技项目资助(SGHLJG00YJJS1400303)

作者简介:赵莉华(1968—),女,副教授,硕士生导师。研究方向:电器设备监测技术;新能源发电及并网技术;电能质量。E-mail:tyorika@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

器可靠运行的重要因素^[1-4]。而操作机构电磁系统是机构的前级,电磁系统的运行可靠性直接影响了操作机构的运行可靠性。

机构分合闸线圈电流是反映电磁系统性能的重要参数,线圈电流波形可以反映机构中电磁铁本身及所控制的锁闭或阀门以及与之相连的开关本体传动机构、辅助触头在操作过程中的工作情况,所以,研究影响操作机构电磁系统分合闸线圈电流波形的因素及影响情况对分析和评估操作机构运行性能具有重要的意义^[4]。国内外专家学者对断路器机构性能研究很重视,已经开展了一些研究工作。文献[5-13]进行了基于机构行程-时间曲线、分合闸线圈电流波形的机构故障诊断方面的研究,文献[14-15]针对 72.5 kV 及以下的中低压断路器弹簧机构电磁系统参数变化与机构性能的关系进行了试验研究,并未进行理论与仿真分析。而 110 kV 及以上高压断路器液压和弹簧机构中,电磁系统参数变化对机构性能的影响的理论分析和试验研究工作未见报道。

作者基于磁路法分别建立了高压断路器弹簧和液压操作机构电磁系统的数学模型,通过理论和仿真研究电磁系统参数变化对分合闸线圈电流的影响及与电磁系统、机构传动系统性能之间的关系。并选取带弹簧机构的 126 kV 高压断路器和带液压机构的 550 kV 高压断路器进行了试验。仿真与试验结果表明,操作机构电磁系统参数变化对机构动作性能产生很大影响,从而影响高压断路器动作性能及可靠性,研究结果对高压断路器操作机构的状态分析及评估具有重要意义。

1 操作机构电磁系统数学模型建立

目前,高压断路器操作机构主要是液压机构和弹簧机构 2 大类。由于 2 类机构动力源不同,所以其结构及工作原理也不同,对电磁系统的要求有所差别,其分合闸线圈电流波形也不尽相同。电磁系统根据电源类型的不同,又分为直流和交流 2 种,直流电磁系统具有可靠性高、适合频繁动作等特点,高压断路器操作机构几乎全部采用直流电磁系统。操作机构的分闸和合闸脱扣装置一般采用相同结构的电磁系统,所以,仅对直流合闸电磁系统进行研究。

电磁系统中电磁铁有很多种结构,在操作机构中主要采用螺管式结构,图 1 为常见的螺管式直流电磁系统结构图。

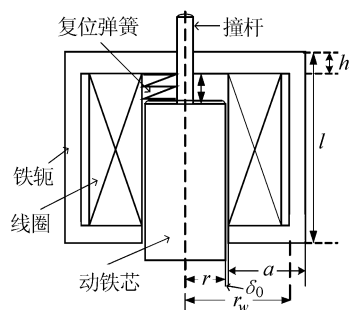


图 1 直流电磁系统结构示意图

Fig.1 DC electromagnet structure diagram

从图 1 中可以看出,主要由铁轭(静铁芯)、动铁芯、线圈、复位弹簧、撞杆等几部分构成。线圈通电,电磁铁动铁芯在电磁力作用下动作,带动和其连接的撞杆一起运动并撞击合闸触发器,释放储能,带动传动机构动作,实现断路器的合闸动作。

图 1 中, r 为动铁芯半径, r_w 为动铁芯中心线到铁轭内表面的距离, h 、 l 、 a 分别为铁轭的厚度、长度和下铁轭的宽度, δ 为工作气隙, δ_0 为非工作气隙。

图 1 的电磁系统等效电路如图 2 所示,其中, R 为线圈回路总电阻, $L(x)$ 为线圈电感, x 为铁芯运动行程, i 为线圈电流, U 为线圈电源电压。由于线圈电感大小与线圈匝数的平方及磁路磁导成正比,所以电感与铁芯运动行程 x 有关,铁芯气隙越小电感越大。根据等效电路,有回路方程:

$$U = Ri(t) + \frac{d(i \times L(x))}{dt} \quad (1)$$

由于线圈电感是行程的函数,所以式(1)可变形为:

$$U = Ri(t) + L(x) \frac{d(i)}{dt} + i \frac{d(L(x))}{dx} v \quad (2)$$

式中, v 为铁芯的运动速度。

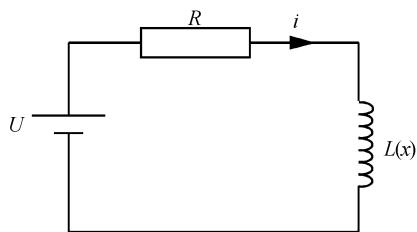


图 2 直流电磁系统等效电路

Fig.2 DC magnetic equivalent circuit

电磁系统的电磁力由 2 部分组成,一部分由动铁芯与静铁芯端面之间的磁通产生,称为表面吸力,另一部分由动铁芯与侧面铁轭之间的漏磁通产生,称为螺管力。根据文献[16],电磁力可用式(3)近似计算:

$$F = 6.4 \times 10^{-7} (iN)^2 \left[\frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{2\pi}{\ln \frac{r_w}{r}} \left(\frac{l-h-\delta}{l} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, N 为线圈匝数。

电磁铁的运动方程可表示为:

$$x = \int_0^t v dt = \int_0^t a t dt = \int_0^t \frac{F-f}{m} t dt \quad (4)$$

式中, a 为铁芯运动加速度, f 为铁芯运动过程中受到的阻力, t 为电磁铁的运动时间。

式(4)中, 阻力 f 的大小由复位弹簧的弹力、运动摩擦力及撞杆撞击产生的瞬时反力等决定, 是与铁芯行程 x 相关的函数。铁芯运动过程中, f 可表示为:

$$f = k(x+c) + f_0 + [\varepsilon(x-x_1) - \varepsilon(x-x_2)]f_z \quad (5)$$

式中: k 为弹簧的刚度系数; c 为弹簧的预压缩量; f_0 为运动过程中电磁铁受到的摩擦力, 可认为摩擦力为恒定值; f_z 为顶杆撞击分合闸触发器时受到的瞬时阻力, 作用范围为 $x_1 \sim x_2$; x_1 为撞击开始位置; x_2 为铁芯行程终止位置; ε 为单位阶跃函数。铁芯停止运动后, 阻力 f 等于电磁力 F 。

2 线圈电流波形分析及波形特征点

2.1 线圈电流波形分析

直流合闸线圈典型电流波形如图 3 所示, 根据波形可将铁芯的运动过程分为 5 个阶段, 分别为:

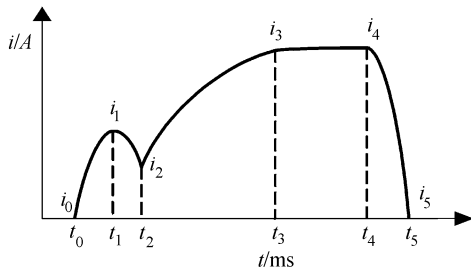


图 3 合闸线圈电流特性波形图

Fig. 3 Closing coil current characteristic waveform

阶段 1 ($t_0 \sim t_1$): t_0 时刻, 合闸线圈通电, 此时电流较小, 所产生的电磁力较小, 未达到铁芯的动作值。此阶段线圈通电, 铁芯不动作。当电流上升到第 1 个峰值 i_1 时, 电磁吸力大于反力, 铁芯开始动作, 进入阶段 2。阶段 1 中, 铁芯不动, 线圈电感为常数, 电流按指数规律上升。此时气隙最大, 电感最小。

式(6)为阶段 1 的电流表达式:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (6)$$

由式(6)可知, 电源电压、线圈电阻、铁芯工作气隙会影响电流的上升速度和阶段 1 的持续时间。阶段 1 的持续时间与线圈电压、回路电阻、铁芯工作气隙及铁芯是否卡滞等因素有关。

阶段 2 ($t_1 \sim t_2$): t_1 时刻, 动铁芯动作。随着铁芯的运动, 气隙减小, 磁阻减小, 线圈电感增大, 电流下降。 t_2 时刻, 铁芯运动速度达到最大, 运动到位, 撞杆撞击合闸触发器, 停止运动, 此阶段正常电流波形应为连续平滑变化。如果运动过程中存在异常, 铁芯运动过程将改变, 使电流波形偏离标准波形, 出现不连续的拐点或持续时间增大等现象, 表明铁芯存在卡涩、撞杆变形或脱口失灵等故障。

$t_0 \sim t_2$ 为断路器的固有动作时间, 固有动作时间越长, 断路器合闸时间越长。

阶段 3 ($t_2 \sim t_3$): t_2 时刻, 动铁芯运动到位, 储能机构释放储能, 断路器动触头开始动作。此阶段铁芯不动, 气隙不变, 电感是常数且达最大值。线圈电流呈指数规律上升, 经过暂态过程后不再增加, 进入阶段 4。

阶段 4 ($t_3 \sim t_4$): 此阶段是阶段 3 的延续, 此阶段铁芯撞杆与触发器相连。 t_3 时刻断路器动触头开始动作, 在辅助触头断开线圈电源前, 线圈电流处于近似稳态。线圈电压及回路电阻影响电流 i_3 、 i_4 的大小。在这个阶段如果线圈电流出现波动, 表明本该静止的铁芯由于非正常原因发生运动, 开关本体传动机构出现异常。如果辅助触头无法正常转换, 线圈电源为切除, 阶段 4 将一直持续, 长时间通电最终将烧坏线圈。

阶段 3、4 持续时间之和为断路器触头运动时间, 反映了触头运动速度。

阶段 5 ($t_4 \sim t_5$): 为电流切断阶段。 t_4 时刻, 断路器辅助触头切断线圈回路直流电源, 在辅助触头之间产生电弧并被迅速拉长, 电弧电压升高, 使电流减小, 直到电弧熄灭, 线圈电流减小为零。

所以, 线圈电流波形反映了电磁系统及开关本体传动系统的运行状况, 可通过对分合闸线圈电流波形的分析和研究, 评估机构电磁系统及开关本体机械部分的性能及变化趋势。

2.2 线圈电流波形特征点

从图 3 的电流波形及 2.1 节分析可知, 线圈电流波形中有 6 个反映电磁铁铁芯动作过程的关键点, 称为特征点。分别是 $(t_0, 0)$ 、 (t_1, i_1) 、 (t_2, i_2) 、 (t_3, i_3) 、 (t_4, i_4) 、 $(t_5, 0)$, 对应特征点 0 ~ 5。

特征点中: $(t_0, 0)$ 和 $(t_5, 0)$ 分别是线圈通电起始点及线圈电流为零的终止点, 二者之间的时间差即为

线圈通电时间; (t_1, i_1) 为线圈通电到铁芯刚开始动作的起始点; (t_2, i_2) 为动铁芯运动到位和断路器动触头开始动作的起始点; (t_3, i_3) 为线圈电流进入稳态初始点; (t_4, i_4) 为动触头动作到位及辅助开关动作断开线圈电源的时刻点。一般情况下,电流 i_1 的值大约为 i_3 的 1/2 左右; i_3 和 i_4 近似相等。所以,特征点参数可以反映电流波形所包含的关键信息,采用特征点进行分析不会影响分析结果,可大大简化分析过程。

3 电磁系统参数对线圈电流影响的仿真研究

3.1 弹簧机构合闸线圈电流波形仿真分析

弹簧机构储能为弹簧储能,其一般用于 126 kV 及以下高压断路器中,对合闸电磁脱扣力要求比液压机构的要求小,弹簧机构相对液压机构动作慢,其线圈通电时间一般较长。仿真弹簧操作机构电磁系统额定参数为:线圈电压 DC220 V,线圈电阻 125 Ω ,工作气隙 5 mm。

图 4 分别为 65%、100%、110% 额定线圈电压的线圈电流波形。从图 4 中可知,电源电压越低,阶段 1 电流上升速度越慢,阶段 1 持续时间越长,第 1 个电流峰值越小,阶段 3、4 的电流值降低。当电压为 65% 额定电压时,电流波形第 1 个峰值电流已远大于第 2 个峰值电流的 1/2,此时线圈电流波形已严重偏离正常电流波形。所以,线圈电压降低,电磁吸力减小,合闸时间增大。

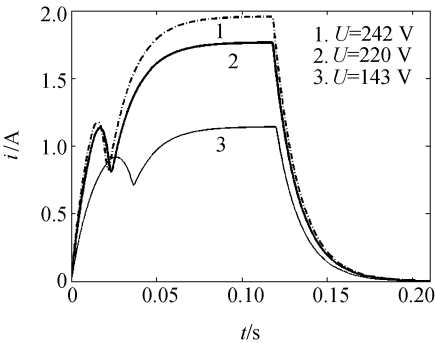


图 4 线圈电压变化时弹簧机构线圈电流仿真波形
Fig.4 Spring operating mechanism current simulation waveform of changing coil voltage

图 5 为线圈回路电阻分别为 125、139、152 Ω 时的电流波形。从图 5 中可以看出,线圈回路电阻变化主要影响阶段 3、4 的电流大小,随着电阻增加,阶段 4 电流值减小,并且阶段 1 电流值峰值略有减小。

图 6 为电磁铁铁芯工作气隙变化时的电流仿真波形,从图 6 中可以看出,铁芯气隙的改变主要影响电流波形的阶段 1、2,从而对机构的运行性能有一定的影响。气隙越大,阶段 1 时间会越长,第 1 个电

流峰值越大,对阶段 3、4 基本没有影响。

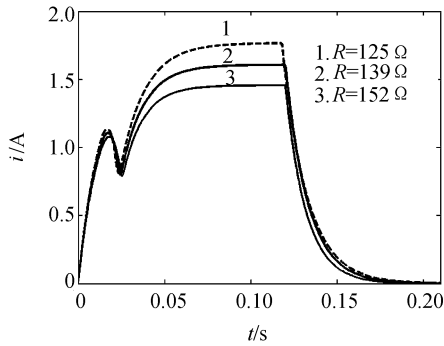


图 5 线圈回路电阻变化时弹簧机构线圈电流仿真波形
Fig.5 Spring operating mechanism current simulation waveform of changing coil resistance

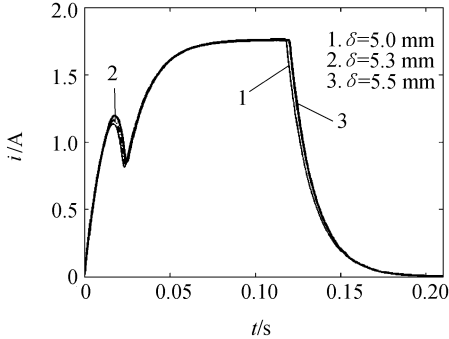


图 6 铁芯工作气隙变化时弹簧机构线圈电流仿真波形
Fig.6 Spring operating mechanism coil current simulation waveform of changing core spare travel

3.2 液压机构合闸线圈电流波形仿真分析

液压机构一般用于电压等级比较高的断路器中,对分合闸速度要求较高,其合闸电磁脱扣力较大,线圈通电时间较短。仿真液压操作机构电磁系统额定参数为:线圈电压 DC110 V,线圈电阻 40 Ω ,工作气隙 3 mm。图 7 为线圈电压分别为 65%、100% 及 110% 额定电压时的电流波形。图 8 为线圈回路电阻分别为 40、46.5、53 Ω 时电流波形。2 种情况下电流波形变化趋势与弹簧机构一致。

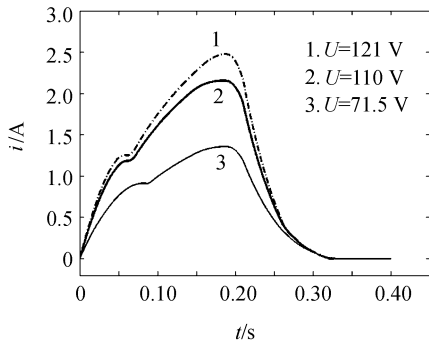


图 7 电压变化时液压机构线圈电流波形
Fig.7 Hydraulic mechanism coil current waveform of changing voltage

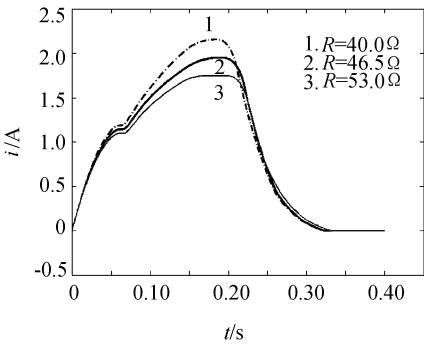


图 8 线圈电阻变化时液压机构线圈电流仿真波形

Fig.8 Hydraulic mechanism coil current simulation waveform of changing coil resistance

4 电磁系统参数对线圈电流影响的试验研究

4.1 126 kV 断路器弹簧操作机构

被测机构参数为: 分合闸线圈额定电压 U_{el} 为 DC220 V, 分闸线圈电阻 R_{n1} 为 100 Ω , 合闸线圈电阻 R_{n2} 为 122 Ω , 分闸线圈铁芯工作气隙 2.5 mm, 分闸机构触发器与脱扣器之间间隙 0.5 mm, 合闸线圈铁芯工作气隙 5.0 mm, 合闸机构触发器与脱扣器之间间隙 2.0 mm。试验时, 操作机构带模拟负载。图9为

额定参数情况下合闸线圈电流波形, 从图 9 可以看出, 电流试验波形与仿真波形基本一致。表 1 为合闸线圈电压分别为 65%、80%、85%、90%、100%、110% 额定电压时电流波形的特征点值, 时间起始点取线圈开始通电时刻, 故特征点 0 的值为 (0, 0), 表 1 中已略去。从表 1 可以看出, 线圈电压升高, 特征点 1~4 的电流增大, 时间减小, 与仿真结果一致。

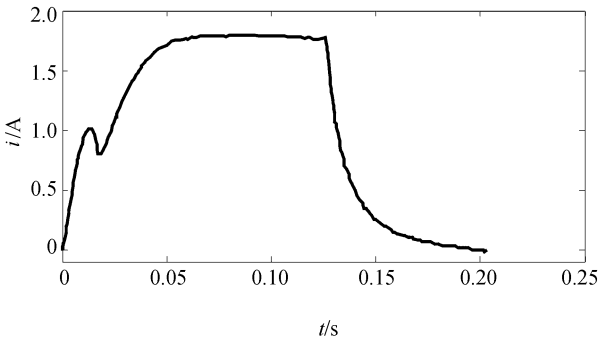


图 9 126 kV 断路器弹簧操作机构额定参数下合闸线圈电流波形

Fig.9 126 kV circuit breaker spring operating mechanism closing coil current waveform under rated parameters

表 1 弹簧机构线圈电压变化时电流波形特征点值

Tab.1 Spring operating mechanism current waveform feature point values of changing coil voltage										
线圈 电压	特征点 1		特征点 2		特征点 3		特征点 4		特征点 5	
	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A
65% U_{el}	15.9	0.74	24.4	0.46	97.4	1.12	122.9	1.12	210.5	0
80% U_{el}	15.7	0.85	22.4	0.58	97.4	1.39	122.8	1.39	213.6	0
85% U_{el}	14.6	0.88	21.2	0.62	82.9	1.47	123.8	1.48	215.7	0
90% U_{el}	14.1	0.88	19.9	0.62	80.6	1.47	123.4	1.47	214.6	0
100% U_{el}	12.9	0.98	18.0	0.77	71.5	1.79	125.4	1.80	215.6	0
110% U_{el}	12.3	1.04	16.4	0.83	86.5	1.93	122.8	1.93	216.3	0

表 2 为在合闸线圈回路串联 10%、21%、32% 线圈电阻值的电阻以改变合闸回路总电阻时的电流

特征点值, 回路电阻主要影响阶段 4 的电流值大小。电阻越大, 电流越小。

表 2 弹簧机构线圈回路电阻变化时电流波形特征点值

Tab.2 Spring operating mechanism current waveform feature point values of changing coil circuit resistance										
线圈 电阻	特征点 1		特征点 2		特征点 3		特征点 4		特征点 5	
	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A
R_{n2}	12.9	0.98	18.0	0.77	71.5	1.79	125.4	1.80	215.6	0
110% R_{n2}	12.5	0.94	18.2	0.71	89.6	1.58	122.8	1.58	206.5	0
121% R_{n2}	12.7	0.90	18.8	0.67	80.7	1.43	122.7	1.43	198.3	0
132% R_{n2}	13.5	0.87	19.7	0.63	81.9	1.31	122.4	1.31	191.4	0

表 3 给出了铁芯工作气隙变化时电流波形特征点值, 分别进行了 2 种情况下的试验: ①合闸电磁系统工作气隙 5.3 mm, 触发器与脱扣器间隙 2.2 mm;

②合闸电磁系统工作气隙 5.5 mm, 触发器与脱扣器间隙 2.5 mm。从表 3 中可以得知, 气隙越大阶段 1 的电流峰值越大, 阶段 1 的持续时间越长。

表 3 弹簧机构铁芯工作气隙变化时电流波形特征点值

Tab.3 Spring operating mechanism current waveform feature point values of changing core spare travel

线圈 间隙	特征点 1		特征点 2		特征点 3		特征点 4		特征点 5	
	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A
额定	12.9	0.98	18.0	0.77	71.5	1.79	125.4	1.80	215.6	0
①	13.5	1.05	19.5	0.77	81.8	1.75	121.5	1.74	214.2	0
②	14.1	1.10	20.4	0.78	81.0	1.76	121.8	1.76	214.7	0

试验结果与仿真结果一致,表明所建立的弹簧机构电磁系统模型正确。

4.2 550 kV 断路器液压操作机构

被测机构参数为:分合闸线圈额定电压 U_{e2} 为 DC110 V,分合闸线圈电阻 R_{n3} 均为 $(39 \pm 3.9) \Omega$ 。机构带模拟负载。

图 10 为额定参数情况下合闸线圈电流波形,从图 10 可以看出,试验电流波形与仿真波形一致。表 4 给出了合闸线圈电压分别为 85%、90%、100%、110% 额定电压时电流波形特征点值,表 5 是在合闸回路串联 17%、33%、50% 线圈电阻值的电阻时电流波形特征点值。试验结果与仿真结果一致,表明所建立的液压机构电磁系统模型正确。

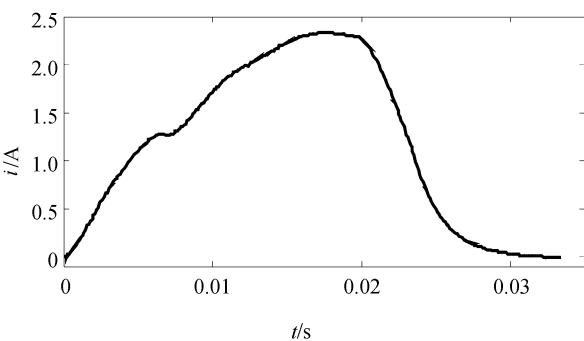


图 10 550 kV 断路器液压操作机构额定参数下合闸线圈电流波形

Fig. 10 Coil current waveform of 550 kV hydraulic circuit breaker closing under rated parameters

表 4 液压机构电压变化时电流波形特征点值

Tab.4 Hydraulic operating mechanisms current waveform feature point values of changing coil voltage

线圈 电压	特征点 1		特征点 2		特征点 3		特征点 4		特征点 5	
	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A
85% U_{e2}	8.0	1.27	9.5	1.18	18.4	1.89	21.8	1.82	34.6	0
90% U_{e2}	7.4	1.29	8.8	1.24	16.8	1.99	20.9	1.91	33.4	0
100% U_{e2}	6.6	1.28	7.0	1.27	17.0	2.32	20.0	2.27	32.4	0
110% U_{e2}	5.8	1.26	6.0	1.26	12.5	2.24	18.2	2.50	32.5	0

表 5 液压机构线圈回路电阻变化时电流波形特征点值

Tab.5 Hydraulic operating mechanisms current waveform feature point values of changing coil circuit resistance

线圈 电阻	特征点 1		特征点 2		特征点 3		特征点 4		特征点 5	
	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	电流/A
R_{n3}	6.6	1.28	7.0	1.27	17.0	2.32	20.0	2.27	32.4	0
117% R_{n3}	7.2	1.28	8.5	1.23	15.9	1.91	20.9	1.98	34.0	0
133% R_{n3}	7.4	1.25	9.1	1.16	16.8	1.72	21.3	1.67	33.3	0
150% R_{n3}	8.2	1.22	10.1	1.10	17.2	1.54	22.2	1.52	34.8	0

5 结 论

作者分别建立了高压断路器弹簧和液压操作机构分合闸电磁系统的数学模型,理论和仿真研究电磁系统线圈电压、线圈回路电阻、铁芯工作气隙等参数变化对分合闸线圈电流的影响及电磁系统线圈电流波形变化与电磁系统、开关本体传动系统性能之

间的关系。选取带弹簧机构的 126 kV 高压断路器和带液压机构的 550 kV 高压断路器进行了试验,试验结果表明所建立的弹簧、液压机构数学模型正确,能正确反映电磁系统的实际运行状况,而所建立的电磁系统数学模型为后续进一步仿真研究弹簧及液压机构的铁芯卡滞、开关本体故障等对线圈电流的影响打下基础。仿真及试验结果表明:线圈电压升

高,电流峰值增大,电磁系统脱扣力增加,合闸时间缩短;线圈电压降低、回路电阻增大,电流峰值降低,脱扣力减小,合闸时间增加;工作气隙增加,动铁芯行程增大,合闸时间增加。所以,电磁系统参数对线圈电流及机构分合闸动作性能均有较大影响。监测线圈电流波形,将其与标准波形比对,根据其波形形状及变化趋势可以分析电磁系统及开关本体机构的性能及运行状况,从而诊断机构的健康状况,为现场断路器运行及维护人员提供理论指导。

参考文献:

- [1] Zhao Hailong, Wang Fang, Hu Xiaoguang. Application of wavelet packet-energy spectrum in mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 46-58. [赵海龙, 王芳, 胡晓光. 小波包-能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 46-58.]
- [2] Peng Bo. Research about the on-line monitoring and fault diagnosis system of high voltage circuit breaker[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 2-5. [彭搏. 高压断路器在线监测与故障诊断系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 2-5.]
- [3] Song Gao, Cui Jinchun, Yuan Dalu. Operating analysis of high voltage circuit breaker in 1999—2003[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(2): 6-13. [宋杲, 崔景春, 袁大陆. 1999—2003年高压断路器运行分析[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 6-13.]
- [4] Tang Zhuanmin, Fan Xingming, Hu Zhichao, et al. Study for mechanical condition evaluation and diagnosis methods of high voltage circuit breaker[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2011, 31(1): 78-81. [唐专敏, 范兴明, 黄之超, 等. 高压断路器机械状态的评估与诊断方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2011, 31(1): 78-81.]
- [5] Huang Jian, Hu Xiaoguang, Gong Yunan, et al. Mechanical fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(10): 43-49. [黄建, 胡晓光, 巩玉南, 等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(10): 43-49.]
- [6] Huang Jian, Hu Xiaoguang, Gong Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 108-113. [黄建, 胡晓光, 巩玉南. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 108-113.]
- [7] Lü Chao, Yu Honghai, Wang Lixin. On-line self-learning fault diagnosis for circuit breakers based on artificial immune network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 128-134. [吕超, 于洪海, 王立欣. 基于人工免疫网络的断路器在线自学习故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 128-134.]
- [8] Yan Haining. Analysis of switchgear based on on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 119-123. [闫海宁. 基于在线监测的开关特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 119-123.]
- [9] Zhang Yongkui, Zhao Zhizhong, Feng Xu, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 37-42. [张永奎, 赵智忠, 冯旭, 等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 37-42.]
- [10] Song Jingang, Xu Changqing, Zhu Tongliang. Coil current monitoring of SF6 circuit breakers based on waveform identification[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(3): 65-68. [宋锦刚, 许长青, 朱统亮. 基于波形辨识技术的SF6断路器分/合闸线圈电流监测[J]. 电力建设, 2011, 32(3): 65-68.]
- [11] Jia Rong, Hong Gang, Xue Jianhui, et al. Application of particle swarm optimization-least square support vector machine algorithm in mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breaker[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 197-200. [贾嵘, 洪刚, 薛建辉, 等. 粒子群优化-最小二乘支持向量机算法在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 197-200.]
- [12] Xu Jianyuan, Zhang Bin, Lin Xin, et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural network optimized by the particle swarm in high voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1299-1306. [徐建源, 张彬, 林莘, 等. 能谱熵向量法及粒子群优化的RBF神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1299-1306.]
- [13] Johal H, Mousavi M J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers[C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. Chicago: IEEE, 2008: 1-7.
- [14] Andrusca M, Adam M, Pantelimon R, et al. About Diagnosis of Circuit Breakers[C]//Proceedings of 2013 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. Buchares: IEEE, 2013: 1-4.
- [15] Razi-Kazemi A A, Vakilian M, Niayesh K, et al. Circuit-Breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 283-290.
- [16] Li Da, Zhang Jun, Zhang Daoqing, et al. The modification of suction formula for DC solenoid electromagnet[J]. Journal of Gannan Normal University, 2010, 31(6): 54-60. [李达, 张军, 张道清, 等. 直流螺管式电磁铁吸力经验公式的修正[J]. 赣南师范学院学报, 2010, 31(6): 54-60.]

(编辑 赵婧)