

27.5 kV 永磁机构真空断路器动作特性仿真与试验研究

周丽丽¹, 方春恩¹, 李伟¹, 魏明¹, 程昌明², 王东³

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 四川电器有限责任公司, 四川 成都 611733;
3. 张家港市供电公司, 江苏 张家港 215600)

摘要: 针对 27.5 kV 永磁机构真空断路器并根据其动作特点,进行了基于 Ansoft 和 Matlab 软件的静态、动态特性仿真。首先,建立有限元模型,利用 Ansoft 软件包对永磁机构的静态特性进行仿真。其次,根据耦合电压平衡方程和达朗贝尔机械运动特征方程,在静态仿真基础上采用 Matlab 构建永磁机构断路器的运动模型,对永磁机构动铁心、断路器动触头运动特性进行了仿真分析。最后,对设计的样机进行了动态测试,测试结果表明仿真的正确性。

关键词: 真空断路器; 永磁机构; 动作特性

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0214-03

Simulation and Testing of Operating Characteristic of 27.5 kV Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator

ZHOU Li-li¹, FANG Chun-en¹, LI Wei¹, WEI Ming¹, CHENG Chang-ming², WANG Dong³

(1. College of Electrical Information, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Sichuan Electric Apparatus Corporation, Chengdu 611733, China; 3. Zhangjiagang Power Supply Company, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: Aiming at the permanent magnetic actuator of 27.5 kV vacuum circuit breaker and in accordance with its operating characteristics, simulations of static and dynamic characteristics were developed on the basis of Ansoft and Matlab softwares. Firstly, a finite element model was established to obtain the static characteristics of the permanent magnetic actuator via Ansoft software package. Next, coupling voltage balance equation with D'Alembert's mechanical movement characteristic equation, movement models of the circuit breaker with permanent magnetic actuator were constructed using Matlab package on the basis of static simulation, thus the movement characteristics of permanent magnetic actuator's dynamic core and circuit breaker's dynamic contacts were simulated and analyzed. Finally, a testing device was designed and an experiment was conducted in order to verify the simulation. The results show that the simulation coincides well with the experiment.

Key words: vacuum circuit breaker; permanent magnetic actuator; operating characteristic

0 引言

随着铁道电气化的快速发展和电力机车的提速,对铁道牵引供电系统的供电质量和可靠性的要求越来越高。真空断路器作为控制和保护设备,其分合闸可靠性对铁道牵引供电系统的可靠性有较大影响^[1-3]。影响真空断路器可靠性的一个重要因素是操动机构的可靠性。目前,铁道用 27.5 kV 真空断路器主要采用弹簧操动机构。传统的弹簧操动机构由许多机械零件和复杂的锁扣装置组成,具有传动机构较为复杂、制造工艺要求高、产品可靠性不易保证等缺点。近年来,一种电磁操动、永磁保持和电子控制的永磁操动机构受到了广泛关注。永磁操动机构

由于取消了弹簧机构的脱、锁扣装置,采用永久磁铁进行终端位置的保持,运动部件和零部件数目明显减少,可靠性大大提高^[4]。因此,开发 27.5 kV 永磁机构真空断路器成为铁道电气化发展的需要。

由于 27.5 kV 永磁机构真空断路器的触头开距大、铁心行程长、要求初始分闸速度高、研究难度大,因此,进行永磁机构动态特性的研究^[5-8],对提高 27.5 kV 永磁机构真空断路器的性能具有非常重要的意义。笔者采用的电磁场软件包 Maxwell 建立 27.5 kV 永磁机构真空断路器的有限元模型^[9],对永磁机构磁场和吸力进行了静态特性计算;在静态特性计算基础上,采用 Matlab 建立断路器运动模型,进行了动态特性仿真。根据电磁场数值计算和动态仿真结果,研制了 27.5 kV 永磁机构真空断路器样机,并对样机进行了测试。测试表明,动态特性仿真

收稿日期:2007-07-10; 修回日期:2007-12-26

基金项目:四川省教育厅重点项目(2005A119)。

作者简介:周丽丽(1979-),女,硕士研究生,研究方向为智能化电器。

结果与试验结果比较一致,样机的机械特性满足设计要求。

1 静态特性仿真

27.5 kV 真空断路器采用的圆柱形双稳态永磁机构主要由合分闸线圈、动铁心、静铁心、永磁体和驱动杆组成。对于圆柱形永磁机构,因其磁场分布具有对称结构,采用圆柱形坐标系 (r, θ, z) , r 为坐标半径方向, z 坐标为对称轴,计算永磁机构的磁场分布。根据麦克斯韦方程,对于永磁机构磁场的整个计算场域,矢量磁位满足关系

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu \cdot r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu \cdot r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \right] = -J_\theta \quad (1)$$

式中 A 为矢量磁位; μ 为磁导率; J 为电流密度。

磁场作用于动铁心的电磁吸力 F 满足关系

$$\begin{cases} F = \int_s \left[\frac{1}{\mu} (n \cdot B) B - \frac{1}{2\mu} B^2 n \right] dS \\ B = \nabla \times A \end{cases} \quad (2)$$

式中 n 为动铁心表面法线方向的单位矢量; B 为磁感应强度; S 为磁场包围的动铁心封闭表面。式(1)、(2)描述的静态磁场方程采用三维有限元方法求解。根据 27.5 kV 永磁机构真空断路器,使用有限元软件包 Maxwell 建立有限元模型对静态动铁心的电磁吸力 F 和线圈耦合磁链进行计算;同时为了减少有限元网格划分的数量和降低计算分析的复杂性,仿真中仅建立了永磁机构的 1/2 模型。建立的永磁机构静态特性仿真模型见图 1。

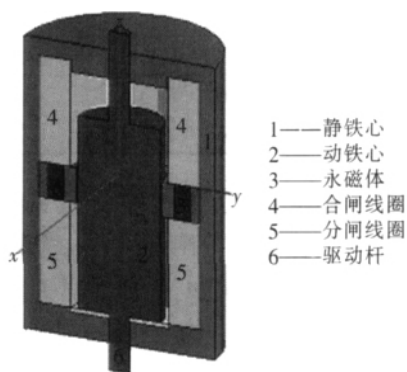


图1 永磁机构 3D 静态仿真模型

根据永磁机构原理,动铁心在运动过程中电磁力 F 和磁链 ψ 是动铁心位移 s 和励磁线圈电流 i 的函数

$$\begin{cases} F = F(s, i) \\ \psi = \psi(s, i) \end{cases} \quad (3)$$

由于永磁机构中具有铁磁材料,式(3)为非线性函数。为了获得式(3)描述的函数关系,对动铁心的运动位移 s 和励磁线圈的电流 i 进行离散化,由静态仿真获得每一个位移 s 和电流 i 对应的电磁力和磁链值,从而通过网格变换和三次样条非线性拟合

技术获得永磁机构动态特性仿真所需的关系 $F(s, i)$ 和 $\psi(s, i)$ 。对于断路器的合闸操作,永磁机构静态特性仿真中选取 31 个动铁心位移 s 的离散点和 51 个励磁线圈电流 i 的离散点。静态特性仿真获得的真空断路器合闸过程中动铁心所受的电磁力 $F(s, i)$ 见图 2,合闸线圈耦合的磁链 $\psi(s, i)$ 见图 3。

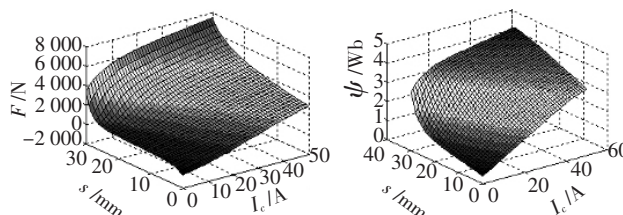


图2 永磁机构动铁心静态磁力 图3 永磁机构合闸线圈静态磁链

2 动态特性仿真

2.1 动态特性仿真模型建立

永磁机构静态特性反映的是操动机构在稳恒电流下电磁吸力、磁链与动铁心位移之间的关系,它不能反映断路器在操动过程中电磁参量、机械参量的真实变化以及相互间的影响规律。操动机构动态特性仿真考虑了两方面的影响,一是电磁参量对动铁心电磁吸力的影响,二是动铁心电磁吸力对断路器运动特性的影响,可以真实反映断路器在动作过程中的各种电磁参量和机械参量真实情况,为永磁机构的优化设计提供了技术基础,从而保证断路器动作过程中吸力与反力的合理配合,提高断路器的可靠性和可控性。永磁机构动态特性可由电压平衡方程、达朗贝尔运动方程组描述

$$\frac{d\psi(s, i)}{dt} = U_c - i(t) \cdot R \quad (4)$$

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = F_m(s, i) - F_f(s, \frac{ds}{dt}) \quad (5)$$

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (6)$$

式中 R 为线圈内阻; ψ 为线圈耦合磁链; i 为线圈励磁电流; U_c 为电容 C 两端电压; F_m 为磁场作用于动铁心的电磁吸力; F_f 为作用于动铁心上的反力; m 为动铁心的质量; s 为动铁心运动位移, v 为动铁心运动速度。其中,真空断路器的反力 F_f 是位移 s 的函数,笔者设计的 27.5 kV 永磁机构真空断路器的反力特性见图 4。

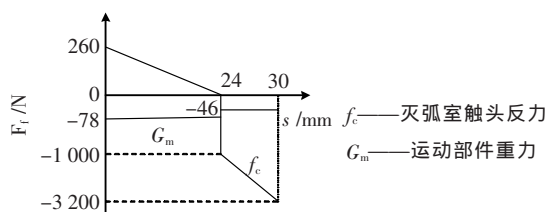


图4 27.5 kV 真空断路器的反力特性

式(4)~(6)所描述的永磁机构动态特性方程组

由 Matlab 软件的 Simulink 工具箱完成, 仿真过程中的部分数据由静态特性提供。其中式(5)、(6)描述的永磁机构运动特性的达朗贝尔方程的 Matlab 仿真模型见图 5。

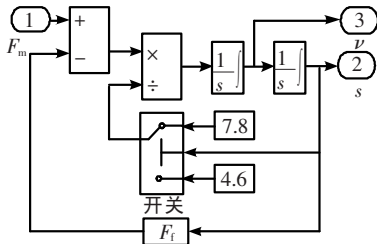


图 5 动态仿真的达朗贝尔运动方程模型

根据永磁机构原理可知, 在分合闸运动过程中线圈耦合磁链 $\psi(s, i)$ 是铁心运动位移 s 和线圈电流 i 的函数, 因此有关系

$$\frac{d\psi(s, i)}{dt} = \frac{\partial\psi(s, i)}{\partial i} \cdot \frac{ds}{dt} + \frac{\partial\psi(s, i)}{\partial s} \cdot \frac{di}{dt} \quad (7)$$

由式(4)、(7)可知永磁机构线圈励磁电流 i 满足关系

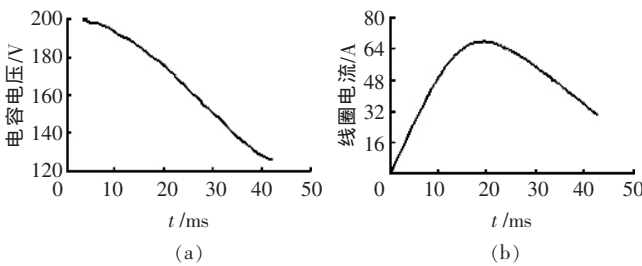


图 7 断路器合闸操作动态仿真结果

为了验证仿真结果的正确性, 对设计的 27.5 kV 永磁机构断路器样机的动态特性进行了测试, 测试系统的原理见图 8。测试中采用霍尔电流传感器 CSM200 检测合闸线圈中的励磁电流, 霍尔电压传感器 VSM500 检测断路器运动过程中储能电容 C 两端的电压; 为了保证位移测量的精度, 采用高精度的 13FLP50 直线位移传感器测量触头位移。传感器信号采样由 4 通道 16 位分辨率的同步采集卡完成, 信号的分析处理和显示由 Labwindows/CVI 软件开发实现, 样机动态特性测试结果见表 1。

表 1 中, $v_{1\text{合}}$ 为断路器刚合前 6 mm 的平均运动速度; $v_{2\text{合}}$ 为断路器全程平均合闸速度; $I_{m\text{合}}$ 为通过合

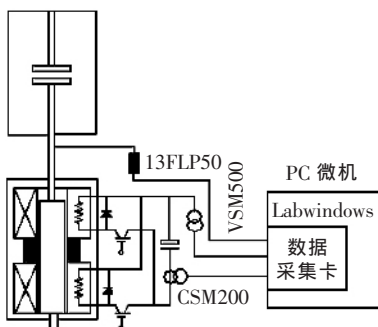


图 8 永磁机构断路器动态特性测试框图

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_c - i \cdot R - \frac{\partial\psi(s, i)}{\partial s} \cdot \frac{ds}{dt}}{\frac{\partial\psi(s, i)}{\partial i}} \quad (8)$$

式(8)描述的线圈励磁电流在 Simulink 中的模型见图 6。

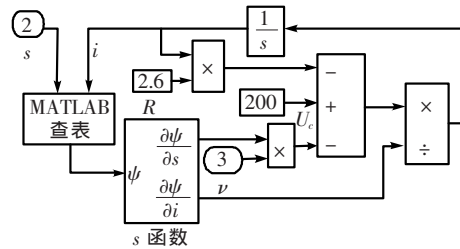
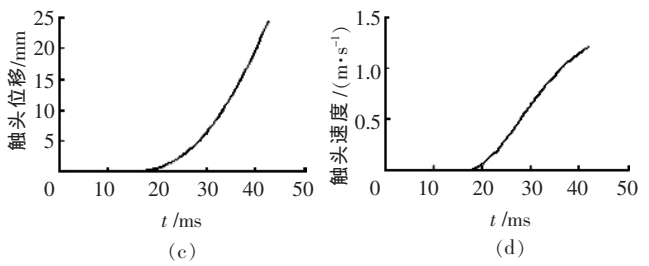


图 6 动态仿真的电压平衡方程

2.2 动态特性仿真与试验结果分析

应用笔者提出的仿真方法, 对设计样机的合闸操作进行仿真, 得出的永磁机构断路器合闸过程中储能电容两端电压 U_c 、线圈电流 i 、动触头运动位移 s 和速度 v 的变化曲线见图 7。



参数	合闸操作			分闸操作		
	$v_{1\text{合}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{2\text{合}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_{m\text{合}}/\text{A}$	$v_{1\text{分}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{2\text{分}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_{m\text{分}}/\text{A}$
测量	1.2	0.8	70	1.4	1.54	96
仿真	1.15	0.9	66	1.5	1.7	80

闸线圈的峰值电流; $v_{1\text{分}}$ 为触头刚分 12 mm 的平均分闸速度; $v_{2\text{分}}$ 为全程平均分闸速度; $I_{m\text{分}}$ 为通过分闸线圈的峰值电流。从表 1 可知, 设计的样机合分闸速度与动态特性仿真结果较一致, 从而验证了笔者仿真的正确性。

3 结语

(1) 笔者在用有限元软件 Maxwell 对 27.5 kV 永磁机构真空断路器的静态特性仿真基础上, 采用 Matlab 软件对永磁机构断路器的动态电压平衡方程和达朗贝尔运动方程进行建模求解, 获得断路器的动态特性, 动态特性测试结果验证了仿真的正确性;

(2) 在 Matlab 的 Simulink 环境下实现永磁机构的动态特性仿真可进一步对永磁机构的动态特性进行优化设计, 提高断路器的可靠性 (下转第 224 页)

相或三相故障的情况,此时短路电流的过程相当复杂,这对分析难免会有一些的影响。

2.3 故障持续时间

统计表明约 66%的故障持续时间在 50~70 ms,这个时间应包括保护动作时间、断路器合分时间和短路电流的燃弧时间。一般 500 kV 断路器的合分时间约为 40~50 ms,考虑燃弧时间后再加上一个周波属正常现象。虽然统计中也有大于 70 ms 的情况,约占到 17%,这可能与保护的動作时间有关,或本侧保护未动作靠对侧保护发讯使断路器分闸。

值得引起重视的是余下约 17%的那部分故障——持续时间小于 50 ms,这可能会存在一些问题。众所周知,现代继电保护装置动作时间相当迅速,最快的保护装置接受信号后不到 10 ms 即可出口(随保护装置性能而异,一般不大于 20 ms),而断路器的分闸时间一般也小于 30 ms,如果机构的辅助开关切换得快,重合闸时故障仍存在,就有可能在合分时间内开始进行分闸,此时对断路器的自卫能力是一个考验;而从断路器的型式试验中看,短路开断试验的条件是短路电流中的直流分量小于或等于 20%,试验中为满足该条件,一般是人为地将被试断路器的合分时间调到约 60 ms 左右,并没有真正在断路器的最小合分时间条件下去做开断试验,因此对该工况下断路器的开断能力是否有影响没有把握,笔者曾与多家制造厂探讨过此问题,结果仅西安西开高压电气股份有限公司做过短合分时间条件下的开断,而其余的国内产品及进口或合资产品对此均未有考虑。

按照电力系统稳定导则的要求,华东电网 500 kV 系统故障切除时间规定为 80 ms,如设保护动作为 15~20 ms,合分时间加燃弧时间为 60~65 ms 是可取的,作为用户当然希望后者能缩短,但前提是必须要有试验数据的支持。

(上接第 216 页)和可控性。

参考文献:

- [1] 钱家骊,袁大陆,徐国政.对 1000 kV 电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J].电网技术,2005,29(10):1-4.
- [2] CARLO C, CARLO G, CHRISTIAN R. Synchronous Medium Voltage Circuit Breaker; ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control[J]. ABB Review, 1999(6): 13-21.
- [3] DEFINO B, FORNARI F, GEMME C, et al. Power Quality Improvement in Transmission and Distribution Conference and Exposition [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES, 2001: 367-372.
- [4] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [5] 马少华,王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究

3 结论

(1)统计分析表明,系统时间常数出现频次最多的在 40~50 ms,最长不超过 70 ms,验证了文[1]的结论,虽然这仅是单相故障时的情况,但亦可供系统设计或设备选型时作参考。

(2)根据所获得的短路电流数据,反映出约 85.7%的故障电流不到 20 kA,实际上发生的最大的短路电流值为 50.86 kA,说明在目前的运行方式下可以将短路电流控制在 63 kA 水平以下,而制定的断路器选型技术原则——额定短路开断电流为 63 kA 是可行的。

(3)大部分的短路故障持续时间在 50~70 ms 范围内,能够满足系统稳定要求的故障切除时间,对少数持续时间较长的情况,随着保护装置的更新,选用性能好的设备完全可以解决问题。但对断路器在最小合分时间条件下的开断性能,用户希望能进一步获得试验数据的支持。

(4)故障性质表明,华东电网中短路故障以线路故障为主,其中雷击和大风又占了很大的比例,今后在努力减少故障跳闸率的工作中可将这两个问题作为主要矛盾加以考虑。此外因设备问题引起的故障仍有存在,对此除应加强维护和检修,在新设备选型中也应把好关,尽可能选用那些成熟的、有运行业绩的设备。

参考文献:

- [1] GB 1984-2003. 高压交流断路器[S].
- [2] SMEETS R P P, ALDROVANDI G, CHÈVRIER P, et al. Statistical Analysis of Electrical Stresses on High-voltage Circuit-breakers in Service[J]. ELECTRA, 2005(220): 24-29.
- [3] JANSSEN A L J, SÖLVER C E. 用于 CIGRE SC A3/WG13.08 和 IEC SC 17A/WG29 的高压断路器电寿命型式试验的统计数据[C]// CIGRE, 2004: A3-30.
- [4] BALZER G, DRESCHER D. 高压断路器的故障数据用于评估状态维护[C]// CIGRE, 2004: A3-305.
- [5] 研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [6] 荣命哲, 姜建勇, 王小华. 永磁式接触器动触头动作特性仿真分析与试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 109-113.
- [7] IVAN YATCHEV, KRASTIO HINOV, VULTCHAN GUEORGIEV. Dynamic Characteristics of a Bistable Linear Actuator with Moving Permanent [J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, June, 2004, 1(2): 207-214.
- [8] TOSHIE T, TAKAFUMI N, MITSURU T K K, et al. An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion [J]. IEEE Trans. PE, 2004, 124(2): 321-326
- [9] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.