

文章编号: 1001-1609(2007)03-0169-03

ZN12-12型断路器动力学仿真与分析

朴吉兴, 徐国政, 黄瑜珑

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

Dynamic Simulation and Analysis of Type ZN12-12 Circuit Breaker

PIAO Ji-xing, XU Guo-zheng, HUANG Yu-long

(Department of Electrical Engineering and Applied Electronic Technology Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 以 ZN12-12 型真空断路器为对象, 通过使用机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 对操动机构进行仿真分析, 可以清楚地观察到任意时刻的机构运动状态, 并获得各部件的运动特性及振动事件的发生顺序。

关键词: 真空断路器; 动力学仿真; ADAMS

中国分类号: TM56

文献标志码: A

Abstract: Taking Type ZN12-12 vacuum circuit breaker as the study object, it was practical to observe the moving status of the mechanism at any moment, and to acquire the moving characteristic of each part as well as the occurring order of vibrating events by using of ADAMS software to carry out a simulation analysis to the operating mechanism.

Key words: vacuum circuit breaker; dynamic simulation;

automatic dynamic analysis of

mechanical systems(ADAMS)

0 引言

机械系统动力学自动分析软件 ADAMS 提供了一个集建模、求解、可视化技术于一体的虚拟样机环境^[1,2], 是一款非常著名的虚拟样机分析软件。利用 ADAMS 软件, 可以快速、方便地创建完全参数化的机械系统几何模型。该模型可以是在 ADAMS 软件中直接建造的简化几何模型, 也可以是从其它 CAD 软件中传过来的造型逼真的几何模型。通过在几何模型上施加力(或力矩)和运动激励, 并执行一组与实际情况十分接近的运动仿真测试, 从而计算出系统的各种参数值, 例如速度、加速度、转动惯量、支座反力等, 以供实际设计系统时参考。

笔者利用机械系统动力学仿真软件 ADAMS 建立了 ZN12-12 型真空断路器的机械动力学仿真模型, 对断路器的动力学特性进行了仿真分析^[3]。动力学仿真已在中国高压、低压电器研究中广泛应用, 但

主要是针对触头运动速度, 而对碰撞和振动等问题基本没有涉及。笔者在这方面做了一些探索性的工作, 主要目的在于为振动信号的分析诊断提供参考。

1 ADAMS 采用的算法

ADAMS 采用世界上广泛流行的多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程法, 建立系统的动力学方程。他选取系统内每个刚体质心在惯性参考系中的 3 个直角坐标和确定刚体方位的 3 个欧拉角作为笛卡尔广义坐标, 用带乘子的拉格朗日方程处理具有多余坐标的完整约束系统或非完整约束系统, 导出以笛卡尔广义坐标为变量的运动学方程。ADAMS 的计算程序应用了吉尔(Gear)的刚性积分算法以及稀疏矩阵技术, 大大提高了计算效率。

在进行动力学分析时, ADAMS 采用两种算法:

①提供 3 种功能强大的变阶、变步长积分求解程序: 用 GSTIFF 积分器、DSTIFF 积分器和 BDF 积分器来求解稀疏耦合的非线性微分代数方程, 该方法适于模拟刚性系统(特征值变化范围大的系统)。②提供 ABAM 积分求解程序, 采用坐标分离算法来求解独立坐标的微分方程, 该方法适于模拟特征值经历突变的系统或高频系统。

利用 ADAMS 软件中提供的零件库、约束库、力库等建模模块, 按照所要分析的系统的物理参数, 建立起多刚体系统模型。ADAMS 软件进行运算时, 首先读取原始的输入数据, 在检查正确无误后, 判断整个系统的自由度。如果系统的自由度为零, 进行运动学分析。如果系统的自由度不为零, ADAMS 软件通过分析初始条件, 判定是进行动力学分析还是静力学分析; 在确定了分析类型后, ADAMS 软件通过其功能强大的积分器求解矩阵方程。如果在仿真时间结束前, 不发生雅可比矩阵奇异或矩阵结构奇异(如

收稿日期: 2006-12-19; 修回日期: 2007-05-15

作者简介: 朴吉兴(1967-), 男, 朝鲜人(留学生), 博士研究生, 研究方向为电气设备状态监测、故障诊断。

位置锁死), 则仿真成功。此时, 可以通过人机交互界面再输入新的模拟结束时间, 或者进行有关参数的测量及绘制曲线。如果在仿真过程中, 出现雅可比矩阵奇异或矩阵的结构奇异, 则数值发散, ADAMS 软件显示为仿真失败, 这需要检查系统模型(特别是运动机构的位置锁死点以及约束的类型), 或者重新设置时间步长、系统阻尼、数值积分程序中的控制参数等, 直到得出正确的仿真结果。

2 ZN12-12 型断路器弹簧操动机构虚拟样机模型建立

为了使导入的模型能进行动态仿真分析工作, 必须在各个部件之间按照实际的工作情况添加约束关系及作用力。添加约束时应注意选择约束的类型、作用部件、作用点和方向。各构件添加完约束及作用力后, 整个虚拟样机模型即在 ADAMS 中建立起来。

建模过程中为了仿真需要简化了模型, 可不考虑构件链接之间的间隙和系统的一些辅助机构。

ZN12-12 型真空断路器配用的弹簧操动机构结构较复杂, 多达五十几个零部件^[4]。为了方便仿真分析, 可对操动机构作适当简化。而且由于合闸操作涉及的相关部件要比分闸过程多, 合闸操作产生的振动事件也比分闸操作多, 因此笔者仅对 ZN12-12 型真空断路器的合闸过程建立了仿真模型, 根据断路器及其操动机构所有主要运动另部件的结构、尺寸、材料、硬度等情况以及下列各弹簧的尺寸、参数进行建模, 见表 1、2。

表 1 合闸外、内弹簧(拉簧)的尺寸和参数

弹簧名称	刚度系数/ (N·mm ⁻¹)	未储能时		储能时	
		拉力/N	长度/mm	拉力/N	长度/mm
外弹簧	31.75	444	176.1	2 984	256.1
内弹簧	17.04	200	173.6	1 563	253.6

表 2 分闸、触头弹簧(压簧)的尺寸和参数

弹簧名称	刚度系数/ (N·mm ⁻¹)	分闸位置		合闸位置	
		压力/N	长度/mm	压力/N	长度/mm
分闸弹簧	13.68	752	150	1 436	100
触头弹簧	130.20	1 463	83	2 765	73

决定断路器合闸特性的还与机构中存在的众多反力有关。其中包括动触头重力、真空灭弧室的自闭力、波纹管的反力、触头弹簧的反力以及各运动部件之间的摩擦力等。此外还要输入各零件的形状、尺寸、位置、密度、硬度、弹性系数和碰撞的衰减系数等。

断路器结构的复杂性导致需要对仿真模型做反复的调整才能和实际的操作过程相吻合。

为了使仿真过程方便、直观, 结合操动机构运动的特点, 对断路器合闸仿真过程进行合理的控制。合

闸过程的起始时刻为分闸结束状态以及合闸弹簧的储能状态。

利用 ADAMS 建立的 ZN12-12 型真空断路器合闸过程的动力学仿真模型及分闸位置正视图和合闸后正视图见图 1~3。

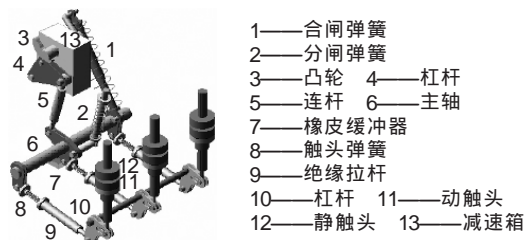


图 1 ZN12-12 型真空断路器合闸过程的动力学仿真模型

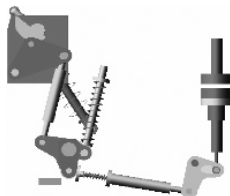


图 2 分闸位置正视图

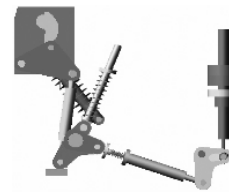


图 3 合闸后正视图

3 仿真结果分析

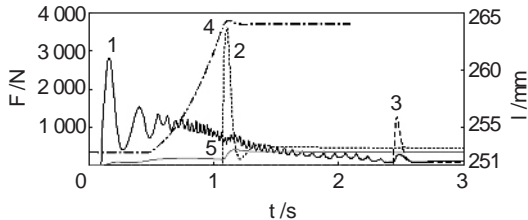
在仿真分析之前, 应该对样机模型进行最后的检验, 排除建模过程中隐含的错误, 以保证仿真分析顺利进行。

ADAMS/View 提供了一个功能强大的样机模型自检工具, 在 Tools 菜单中选择 Model Verify 命令, 可以启动模型自检, 完成自检后, 程序会显示自检结果表。整个模型调试与检验完毕后, 便可以进行仿真分析。在进行仿真分析时, ADAMS/View 可以自动地调用 ADAMS/Solver 求解程序, 该程序可以完成 3 种类型的仿真分析: ①动力学分析: 通过求解一系列的非线性的微分和代数方程组, 仿真分析自由度大于零的复杂系统的运动和各个作用力; ②运动学分析: 通过求解一系列的方程仿真自由度等于零的确定运动系统的运动; ③静态分析: 通过力平衡条件, 求解构件各种作用力的静态分析。

ADAMS 软件仿真分析结果的后处理是通过调用 ADAMS/PostProcessor 模块来完成, 该模块主要提供仿真结果回放和分析曲线绘制两种功能。在运行完仿真分析过程后, 选择后处理工具图标, 即可启动并显示 ADAMS/PostProcessor 窗口。在后处理窗口中很容易得到所需要的输出结果。

凸轮和滚针轴承之间的接触力变化曲线, 触头的碰撞力(3 相)和动触头位移与时间的动态变化曲线见图 4。

接通合闸电磁铁电源, 合闸掣子被解脱, 储能轴在合闸弹簧力的作用下反向转动, 凸轮压在三角杠杆上的滚针轴承上, 杠杆上的连杆将力传给断路器主轴, 导电杆向上运动, 主轴转动约 60° 时被分闸掣



1——凸轮和滚针轴承之间的接触力变化曲线 2——触头碰撞力曲线 3——连杆与橡皮缓冲器的碰撞力曲线 4——动触头位移与时间的动态变化曲线 5——触头弹簧张力变化曲线

图4 合闸过程中各参数变化曲线

子锁住, 断路器合闸。

图4的零点从合闸掣子被解脱, 储能轴在合闸弹簧力的作用下反向转动时开始, 储能轴和动触头开始运动的时间差约为5ms。

实际工作中滚针轴承是最容易受损的零件, 因此知道两者之间的接触力变化曲线十分重要。从合闸过程中接触力的变化曲线(图4中的曲线1)可以看出, 凸轮在整个合闸过程中所受外力非常大, 而且在整个过程中受力幅值存在较大的波动, 这对凸轮机构的抗疲劳强度会有很高的要求, 也直接导致轴承使用寿命的降低。在断路器中, 影响动触头速度的因素很多, 如一些构件的质量和部件尺寸、系统铰链中的摩擦、机构之间碰撞等。

从图4的曲线2、4上可以看出, 动触头在合闸过程中有反弹, 但其反弹量较小。弹回的动触头在触头弹簧力的阻尼下, 速度逐渐减小, 与此同时, 动触头支架还在继续向静触头方向运动。对于触头弹簧来说, 由于动触头回弹使触头弹簧的压缩增加, 动触头支架继续向前运动又使弹簧的压缩增加, 所以触头碰撞时刻触头弹簧力也会变化(图4的曲线5)。在凸轮和滚针轴承分离的时候, 合闸弹簧还有较大的能量没有释放, 合闸缓冲器可以降低合闸弹簧对机构产生的振动(图4的曲线3)。

图5为220V电压下合闸电磁铁的线圈电流和从电磁铁正面得到的振动信号, 其中采样频率为25kHz, 采样长度为100ms, 点数为2500个。

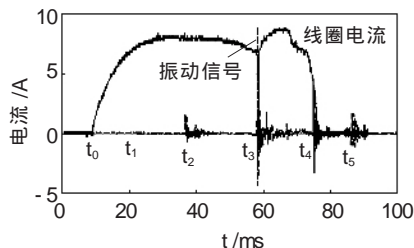


图5 合闸电磁铁线圈电流和正面振动信号

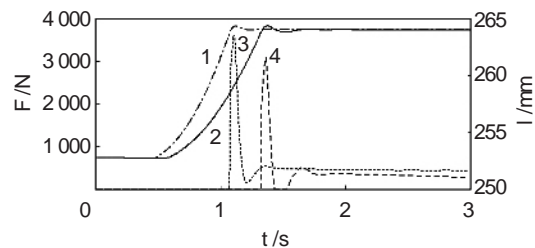
结合图4、5来分析, 操动机构动作过程中有6个重要的时刻, 分别设为 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$, 以合闸过程为例, 电磁铁铁心运动的基本过程可描述如下: 在 t_0 时刻合闸线圈通电以及以后的一段时间内, 由于线圈电流还比较小, 铁心受到的电磁吸力小于阻力, 铁

心不能运动。在此过程中, 由于电磁铁磁路中有很大的空气隙, 电流也较小, 电磁铁的电感可视为常数, 因此电流按指数规律增加。当电流增加到一定值后, 电磁吸力足以克服铁心的阻力, 铁心开始运动(该时刻为 t_1), 电流开始偏离原来的指数规律曲线, 但仍然继续增大。由于该时刻振动很微弱, 加速度传感器不能直接测量到 t_1 。要想确定 t_1 , 需要结合线圈电流来分析。

然后随着铁心速度的逐渐增加, 电磁铁气隙减小, 电磁铁电感增大, 线圈电流增加到达峰值之后开始减小。当铁心运动到 t_2 时刻(第1次振动发生时刻)时与合闸掣子相碰撞, 合闸掣子开始动作。在 t_3 时刻铁心运动到最大行程(对应图4的零点), 发生第2次振动, 此时电流到达局部最低点, 就是电磁铁的运动时间。此后储能轴在合闸弹簧力的作用下反向转动, 凸轮压在三角杠杆上的滚针轴承上, 杠杆上的连杆将力传给断路器主轴, 导电杆向上运动, 断路器完成合闸(t_4 时刻, 第3次振动, 对应图4的曲线2上的触头碰撞时刻), t_5 就是连杆与缓冲器之间的碰撞时刻(对应图4的曲线3所示的夹缝时刻)。虽然图4和图5中的振动事件时间间隔上有一些差异(原因是振动传感器位置和振动原距离有关), 但是可以确认图4、5中的振动事件。

这6个时刻是断路器及操动机构运动特性的重要参数, 可作为断路器机械状态监测的重要依据。如果单纯从线圈电流来分析, 难以对电磁铁整个运动过程了解清楚, 结合振动信号后, 能够对电磁铁的运动过程有更清晰、全面的了解, 也更利于确定电磁铁运动中的几个重要时间点。对这些时刻进行确定, 可以得到电磁铁的动作时间特性, 分析是否存在有故障。

合闸弹簧疲劳的一种典型情况是其刚度系数的减小, 仿真中将合闸外弹簧的刚度系数从31.75N/mm降低到20N/mm(此时, 未储能时拉力200N, 储能时拉力1800N), 合闸弹簧的疲劳损伤将导致合闸操作功的减少, 进而会引起触头运动速度的变化。仿真结果见图6、7。



1——动触头位移与时间的动态变化仿真曲线(正常) 2——动触头位移与时间的动态变化仿真曲线(疲劳损伤) 3——触头的碰撞力仿真曲线(正常) 4——触头的碰撞力仿真曲线(疲劳损伤)

图6 合闸弹簧正常和弹性疲劳时触头力和位移曲线

可以看到当合闸弹簧弹性疲劳时, 随着合闸弹簧刚度系数的降低, 动触头的速度(下转第175页)

FFT 算法计算至 63 次谐波的幅值。其中有效值、FFT 基波测量的测量结果见表 2, 表 3 为功率测量的结果。

表 2 有效值、FFT 基波测量的测量结果

信号幅值/V	基波幅值/V	误差/%	理论有效值/V	测量有效值/V	误差/%
1.374	1.362	0.87	0.972	0.969	0.31
1.916	1.906	0.52	1.355	1.356	0.07
3.001	2.982	0.63	2.122	2.119	0.14
3.540	3.520	0.56	2.503	2.500	0.12
4.518	4.497	0.47	3.195	3.192	0.09

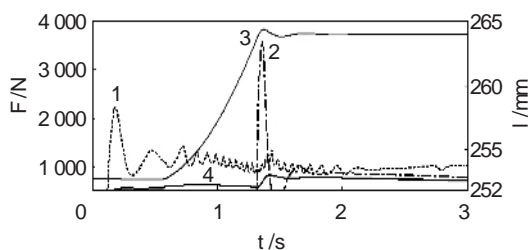
表 3 功率测量的结果

输入信号有效值/V	U _{a,rms} =1.960			U _{b,rms} =2.156			
	相位差/(°)	0	15	30	45	60	90
有功功率	理论值/W	4.226	4.082	3.660	2.988	2.113	0
	测量值/W	4.22	4.07	3.65	2.99	2.11	0
	误差/%	-0.14	-0.29	-0.027	0.07	-0.014	0
无功功率	理论值/var	0	1.094	2.113	2.978	3.660	4.226
	测量值/var	0	1.12	2.13	2.99	3.64	4.21
	误差/%	0	2.30	0.80	0.40	-0.51	-0.38

4 结语

频率跟踪作为电能质量在线监测技术的核心技术之一, 有着极其重要的地位, 其中一个重要环节是保证实时监测系统频率的变化并实时调整数据采样的时间间隔。笔者采用基于高精度数字倍频的频率跟踪技术, 该倍频器具有自适应补偿, 解决了采样周期误差累积的问题。设计经过在 FPGA 上的验证, 结果表明该技术的正确性, 并且设计可以作为子模块

(上接第 171 页)



1——凸轮和滚针轴承之间的接触力变化曲线 2——触头力曲线
3——动触头位移与时间的变化曲线 4——触头弹簧力变化曲线

图 7 合闸弹簧弹性疲劳时位移和力变化仿真曲线

和碰撞力都显著降低, 整个合闸过程比正常情况下延长了约 2.5ms, 连杆与橡胶缓冲器之间已没有碰撞。

合闸过程中凸轮所受外力非常大, 而且在整个过程中受力幅值存在较大的波动。因此可以根据动触头的动特性需要对样机模型添加理论和经验数据, 对凸轮的升程曲线和分、合闸弹簧刚度系数作适当的修改, 以减小合闸过程中凸轮及滚针轴承的受力, 增加轴承及整个操动机构的使用寿命。

应用到其它数据采集处理系统中, 尤其是基于 FPGA 的电能质量在线监测装置中。

参考文献:

- [1] 王 宾, 潘贞存, 赵建国, 等. 电能质量监测数据的同步处理与装置设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 45-49.
- [2] 丁屹峰, 程浩中, 占 勇, 等. 电能质量监测技术现状及发展[J]. 中国电力, 2004, 37(7): 16-19.
- [3] 杨淑英. 电能质量监测装置研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 58-62.
- [4] 段成刚, 欧阳森, 宋政湘, 等. 新型在线实时电能质量监测设备的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 60-63.
- [5] ANANTH I, MORCOS M M. A Power Quality Monitoring System: a Case Study in DSP-based Solutions for Electric Power Industry [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(7): 47-50.
- [6] LAKSHMIKANTH A, MORCOS M M. A Power Quality Monitoring System: a Case Study in DSP-based Solutions for Power Electronics [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2000, 50(3): 724-731.
- [7] 刘 强, 张元芳, 张晓冬. 过电压在线监测数据采集的研究[J]. 高压电器, 2002, 38(6): 43-45.
- [8] 刘凤新, 徐晓明. 电力参数非同步采样误差分析 [J]. 电测与仪表, 2003, 40(10): 9-11.
- [9] 肖雁鸿, 毛 筱, 周靖林, 等. 电力系统谐波测量方法综述 [J]. 电网技术, 2002, 26(6): 61-64.
- [10] 王宝安, 蒋 平, 高 亮, 等. 基于 DSP 技术的电能质量监测仪研制[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 56-58.
- [11] 黄 纯, 彭建春, 刘光晔, 等. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 75-79.
- [12] 林霄舸, 段尚枢, 付景峰. 一种低频高精度全数字化倍频器 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(3): 109-113.

4 结语

以 ZN12-12 型真空断路器为对象, 建立了 ADAMS 仿真模型, 对断路器合闸过程的动力学特性进行了仿真分析, 得到断路器操作过程中机构零部件的相互碰撞的机械力、碰撞力和机械振动过程以及在一次操作过程中产生的几个振动事件。分析还表明, 当合闸弹簧弹性疲劳时上述有关过程都发生明显变化, 这对改善断路器机械设计和帮助断路器机械部分监测及故障诊断都有作用。

参考文献:

- [1] 李 军, 邢陵文, 覃文洁, 等. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 郝云堂, 金 焯, 李 辉. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 中的实践[J]. 机械设计与制造, 2003, 7(3): 16-18.
- [3] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 钱家骊, 关永刚. 高压断路器操动机构的碰撞分析 [J]. 高压电器, 2001, 37(6): 20-23.