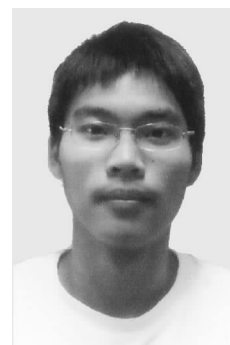


控制与保护开关电磁系统 动态仿真研究

陈 聪¹, 郭其一¹, 黄世泽¹, 屠瑜权²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200331;

2. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江 乐清 325604)



陈 聪(1990—), 男, 研究方向为电力系统自动化。

摘 要: 对加了节能装置的控制与保护开关(CPS)电磁系统动态仿真方法进行了研究。针对电磁系统的耦合电压平衡和达朗贝尔机械运动特征微分方程, 利用 Ansys 软件包, 采用有限元模型, 进行了动铁心动态吸力和磁链的仿真; 利用 Matlab 软件构建 CPS 电磁系统的机械模型, 通过二元二次插值算法和四阶 Runge-Kutta 法, 模拟动铁心的动态运动过程, 获得了吸合过程中的电流、吸力、磁链等一系列物理量。为 CPS 电磁系统性能改进及实际产品优化设计提供了仿真环境下的理论支持。

关键词: 节能装置; 电磁系统; 有限元分析; 动态仿真

中图分类号: TM 564 文献标志码: A 文章编号: 1001-5531(2013)21-0027-04

Electromagnetic System Dynamic Simulation Research on Control and Protective Switching Device

CHEN Cong¹, GUO Qiyi¹, HUANG Shize¹, TU Yuquan²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China;

2. Zhejiang JONK Technology Co., Ltd., Yueqing 325604, China)

Abstract: The electromagnetic system dynamic simulation methods on control and protective switching device (CPS) with energy-saving device were researched. According to couple of electrical and mechanical differential equations which describe the dynamic behavior of electromagnetic system, using Ansys software package and FEM model, the dynamic attraction force acted on the moving core and coil flux were obtained. By constructing the mechanical model of CPS electromagnetic system, utilizing the binary quadratic interpolation algorithm and fourth-order Runge-Kutta method, the dynamic movement of moving core was simulated based on Matlab software package. Meanwhile, the current, attraction force and flux were also got. It provides theoretical support for CPS electromagnetic system performance improvements and product optimization design in simulation environment.

Key words: energy saving device; electromagnetic system; finite element analysis; dynamic simulation

0 引 言

控制与保护开关(Control and Protective Switching Device, CPS)是近年来发展起来的新型低压电器,采用模块化的单一产品结构型式,集成了断路器、接触器、过载(或过流)保护器、欠电压、缺相保护器、隔离器等电器元件的综合功能。根据需要选配功能模块或附件,即可实现对各类

电动机负载、配电负载的控制与保护。

电磁系统是保证电磁式低压电器可靠工作的核心部件,其操作系统一般采用交流电源控制。同时,采用节电技术,一般有功率节电率可高达85%以上,有的竟可超过95%^[1-4]。当前节能运行方案主要有3种:采用节电线圈、设计节能型低压电器产品以及通过外接节电器^[5-7]。本文在上述研究的基础上提出了通过外加晶闸管节能装置

郭其一(1961—)男,教授,研究方向为控制理论与方法及其在电力系统中应用、虚拟样机在低压电器中的应用。

黄世泽(1983—)男,博士后,研究方向为虚拟样机在低压电器中的应用。

的新方案。

目前节能方案通常仅从节能效益的角度来设计,往往不重视对电磁系统的工作特性的影响。本文对增加了节能模块的 CPS 电磁系统动态仿真方法进行了研究,在 CPS 电磁系统有限元静态仿真的基础上,通过 Matlab 进行数值计算,实现了 CPS 电磁系统动态过程的仿真。

1 数学模型及其分析

1.1 节能装置

交流电磁系统的直流运行,可以消除部分功率损耗,并降低噪声、改善工作环境,是最具发展空间的电磁系统节能方案。本文采用的晶闸管直流运行方案就是利用脉动直流电压代替交流电压加在电磁系统操作线圈上,以达到节能运行的目的。通过合理调整节能模块元器件参数与 PCB 布线,节能模块能顺利通过电磁兼容试验。

1.1.1 节能装置原理

根据电磁系统强激磁吸合、弱激磁保持的特点。当电磁系统刚通电时,需要较大的激磁来吸合,此时调节晶闸管控制电路,使得晶闸管的导通角较大,输出电压较高,保证电磁系统的快速吸合;在电磁系统吸合后,仅需较小的激磁即可使电磁系统稳定在保持状态。因此,合理区分电磁系统的吸合与保持状态,进行电路转换,能够有效降低能量损耗,达到节能运行的目的。节能装置的原理框图如图 1 所示。

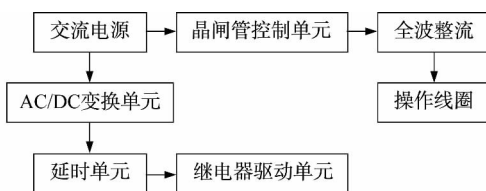


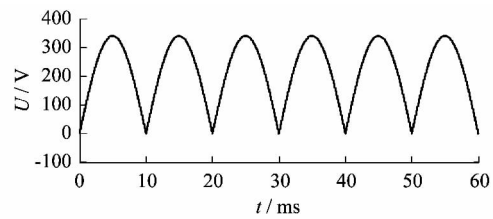
图 1 晶闸管直流运行方案原理框图

1.1.2 节能装置对 CPS 电磁系统仿真的影响

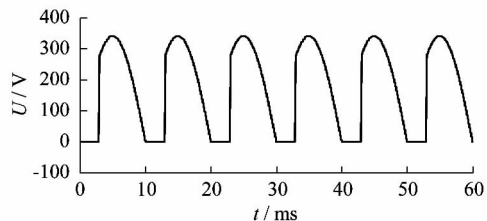
与传统的交流电压不同的是,增加节能模块后,CPS 电磁机构线圈两端所通的为经过全波整流后的脉动直流电压。通过控制晶闸管导通角,得到的是经过削波的脉动直流电压波形。导通角为 0° 和 30° 时脉动直流电压波形如图 2 所示。

1.2 CPS 电磁系统的数学模型

双 E 型电磁机构如图 3 所示,主要组成部分为动铁心、静铁心和反力弹簧等。其在接通电源



(a) 导通角为 0°



(b) 导通角为 30°

图 2 不同导通角下的脉动直流电压波形

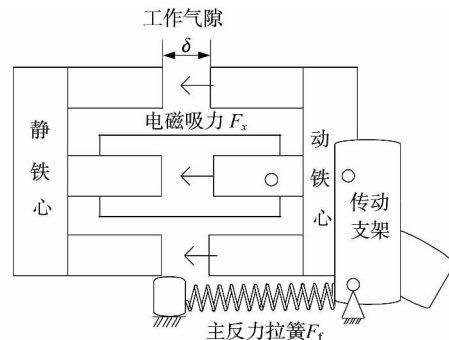


图 3 CPS 电磁系统操作机构结构

时要经历一个吸合过程,切断电源时也要经历一个释放阶段,也就是通常所说的吸合和释放过程。

该过程在电路上必须遵循电压平衡方程,在运动上必须遵循达朗贝尔运动方程,在磁场上必须遵循麦克斯韦方程。因为动态过程历时极短,电磁系统又存在热惯性,热的变化小,故可忽略不计。若同时忽略铁心中的涡流,计铁心磁阻,将这些方程进行转化和综合之后,电磁机构吸合过程的状态方程组可描述为^[8]

$$\begin{cases} \frac{d\psi(t)}{dt} = u(t) - i(t)R \\ \frac{dv}{dt} = \frac{[F_x - F_f(x)]}{m} \\ \frac{dx(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,初始条件为 $\psi|_{t=0} = 0, x|_{t=0} = 0, v|_{t=0} = 0$ 。

式中 $\psi(t)$ ——通过磁系统的磁链值
 u, i ——分别为电路中的电压和电流值
 R ——铁心磁阻
 v ——动铁心在任一时刻的速度
 F_x ——磁系统中的电磁吸力
 F_f ——动铁心受到的反力弹簧系统的反力
 x ——动铁心在任一时刻的位移
 m ——铁心质量

2 研究方法 with 程序实现

2.1 研究方法

通常低压电器电磁系统动态特性计算方法有基于磁场计算和基于磁路计算两种不同途径。求解电磁系统动态特性方程时的经典法是简化分析法、图解法、图解分析法等工程简化计算方法。目前,最广泛流行的是应用电子计算机及有限元分析技术对电磁系统进行数值求解^[9]。

将时间变量 t 离散化,用四阶 Runge - Kutta 法求解。由于变量 i, F_x 是在 u, R, m, F_f 都给定的条件下的 ψ, x 的函数,所以,其求解实质是在已知系统的磁链 ψ 和给定动铁心位移 x 的条件下,反求电流 i 和吸力 F_x 的问题。

通常情况下,在已知 t 时刻的 ψ, x 条件下,都从求解磁路微分方程得到电流 i 和吸力 F_x ,其中涉及到用弦截法进行磁路计算,用分割磁场法求解气隙磁导,用3次样条函数插值法求解磁场强度等。每次必须多次求解磁路微分方程组,而每解一次磁路微分方程又至少要迭代9~25次,计算量相当大。所以,考虑将插值法引入该过程,不去求解磁路微分方程组,就可得到 i 和 F_x 的值。

2.2 插值法在动特性求解过程中的应用

通过本试验组对 CPS 电磁系统有限元静态仿真的研究发现涡流和磁滞对磁链 ψ 和吸力 F_x 的影响很小,可忽略不计。在不考虑涡流和磁滞的条件下,对同一电磁机构,电流 i 和吸力 F_x 都是磁链 ψ 和气隙 δ (或位移 x) 的二元函数,此函数没有直接的数学表达式,可用离散数据来表示,按一系列不同的磁链 ψ 和气隙 δ 求出对应的 i 和 F_x 。在使用 Ansys 进行有限元分析计算时,只能施加电流密度,磁链无法作为载荷进行施加。关于磁链和吸力的二元数据表如表1所示^[10]。

表1 关于磁链和吸力的二元数据表

气隙	电流			
	i_1	i_2	...	i_m
σ_1	(F_{x11}, ψ_{11})	(F_{x12}, ψ_{12})	...	(F_{x1m}, ψ_{1m})
σ_2	(F_{x21}, ψ_{21})	(F_{x22}, ψ_{22})	...	(F_{x2m}, ψ_{2m})
⋮	⋮	⋮	...	⋮
σ_n	(F_{xn1}, ψ_{n1})	(F_{xn2}, ψ_{n2})	...	(F_{xnm}, ψ_{nm})

此数据表格在进行动态特性计算之前已经事先通过 Ansys 计算并存储于磁盘。待进行动特性计算时,只要给出任一对固定磁链 ψ 和气隙 δ 的值,就可先用二元二次插值法求得电流 i ,然后再用二元二次插值法计算出对应 δ 和 i 下的 F_x 。利用表格求解电流和吸力的步骤流程图如图4所示。

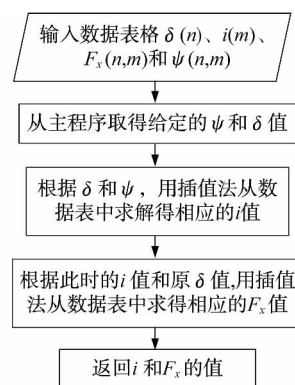


图4 插值法求电流和电磁吸力的流程图

2.3 主程序流程

主程序流程图如图5所示,通过不断地调用插值算法,由龙格-库塔法解微分方程得到电流、磁链、速度、气隙等物理量的变化过程。

3 结果分析与验证

3.1 仿真结果

在线圈电压 $U = 380\text{ V}$,合闸相角为 0° 时脉动电压的仿真结果曲线。由图6可见当 CPS 电磁系统的动触头被触动后,电磁吸力一直都大于弹簧反力,保证了该接触器能够可靠吸合。动触头速度和位移的仿真计算结果如图7所示,线圈磁链和线圈电流的仿真计算结果如图8所示。接触器的触动时刻为 15.694 ms 时,吸和时刻为 28.322 ms 时,最大气隙为 9.5 mm 。合闸相角为 0° 时,吸合时间随吸合电压的变化如图9所示。当吸合电压小于 134 V 时,接触器不能可靠吸合。

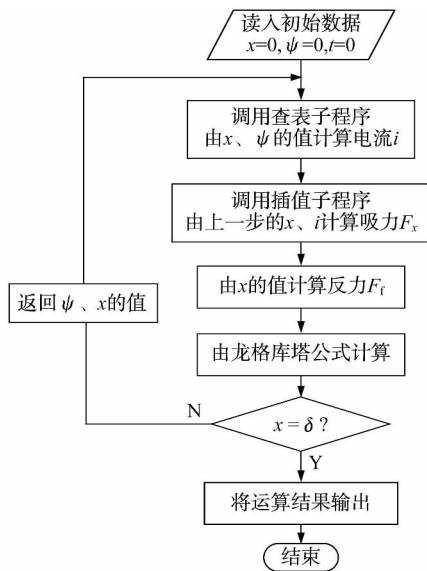


图5 主程序流程图

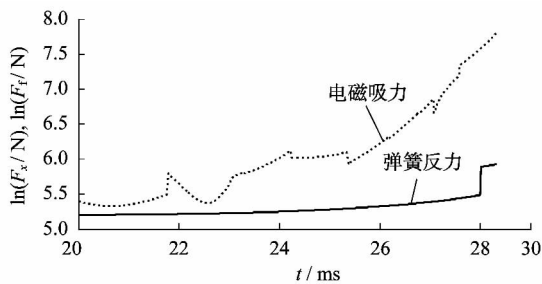


图6 电磁吸力和弹簧反力取对数后的比较图

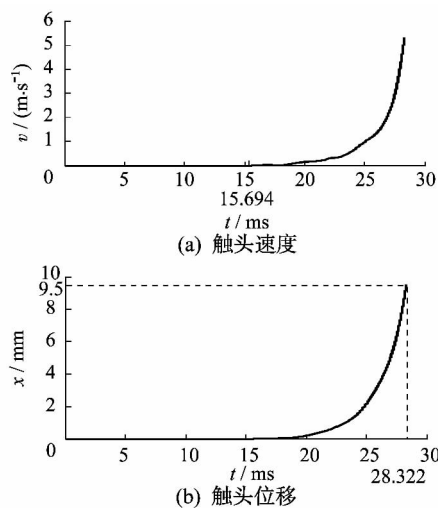


图7 动触头速度和位移的仿真计算结果

3.2 仿真结果分析

(1) 时间特性。动作时间与电压及合闸相角有关。同一合闸相角电压越高,动作时间越短。一定电压下在某一合闸相角会出现最慢动作,此

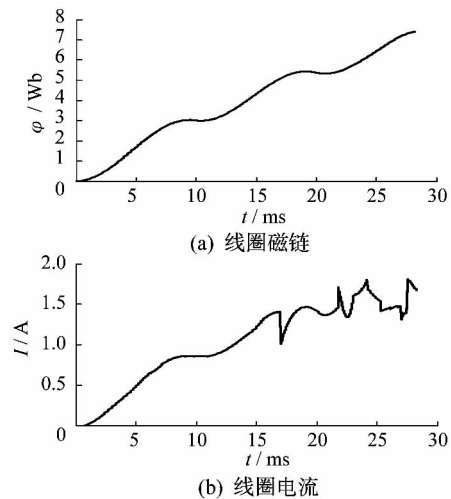


图8 线圈磁链和线圈电流的仿真计算结果

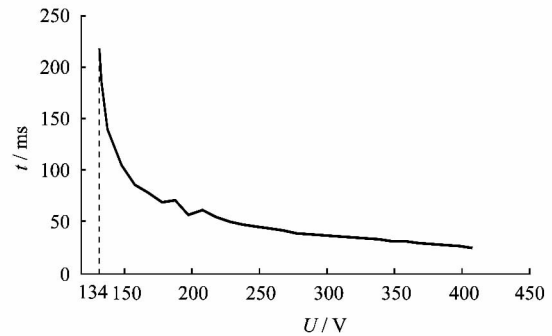


图9 吸合时间随吸合电压的变化

时的动作时间为最长。不同工作电压下,最长动作时间出现的相角各不相同。

(2) 速度特性。衔铁末速度与合闸相角有关,其变化规律复杂,为多峰函数。在不同电压时,末速度最大值与最小值出现的合闸相角不同。

(3) 动态吸力与速度特性的匹配。吸力与反力的配合必须保证在所有合闸相角下,当衔铁可靠地触动后 $\mu > 0$,以保证可靠吸合。

4 结 语

(1) 在 CPS 电磁系统有限元静态仿真的基础上,通过 Matlab 进行数值计算,实现了 CPS 电磁系统动态过程的仿真,从理论上验证了对加了节能模块将交流电压改为脉动直流电压供给操作线圈时,电磁系统的特性仍能很好地满足低压电器工作的要求。

(下转第 58 页)

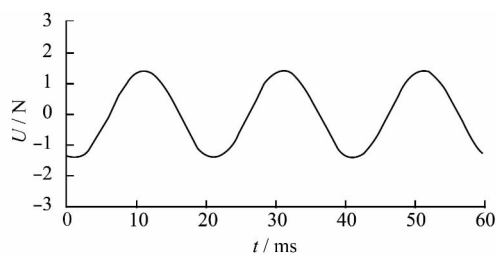


图6 监测终端采集到的电流传感器信号

5 结 语

本文在分析了环网柜智能监控终端现状的基础上,提出了一种基于FPGA的环网柜监测终端方案,研究实现了多路模拟参量的监测方案和数据检验方法,满足了环网柜内监测参量多、实时性高的要求,提高了监测数据的可靠性。同时充分利用FPGA丰富的逻辑资源,把实时性要求高的计算任务在FPGA内实现,提高了系统的响应速度。该方案易于实现FTU终端的小型化和紧凑化,满足环网柜的发展要求。

【参考文献】

[1] 王加臣,吉玉雯,鲁晔. 浅谈环网柜在配电网中的应用[J]. 电力安全技术, 2010(7): 62-63.
 [2] 叶建军. 探讨环网柜在配电系统中的应用[J]. 广东科技, 2009(1): 127-128.

[3] 李继华. 中压环网柜的应用及发展[J]. 电力电气, 2006(10): 14-17.
 [4] 高亮. 配电设备及系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
 [5] LEEUWERKER P, BRAYFORD A L, ROBINSON A, et al. Developments in ring main unit design for improved MV network performance [J]. Power Engineering Journal, 2000(12): 270-277.
 [6] TORBEN S, GULBRANDSEN T. The intelligent ring main unit [C]//Trends in Distribution Switchgear, 10-12 November 1998, Conference Publication, 1998 (459): 167-172.
 [7] 孙健. 基于CANopen协议的新型分布式环网柜监控终端的研发[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
 [8] 高伟, 陈清川, 郭谋发, 等. 基于CAN总线的环网柜监控系统[J]. 电气技术, 2010(6): 50-54.
 [9] 刘革新. 智能型馈线远方测控终端设备的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
 [10] 周洪, 罗星, 邓其军. 基于DSP的智能配电网环网柜FTU的设计[J]. 电力自动化设备, 2011(2): 124-128.
 [11] 陈艳霞. 配电网保护与控制新技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
 [12] 王汝文, 宋政湘, 张国钢. 电器智能化原理及应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 63-70.

收稿日期: 2013-07-30

(上接第30页)

(2) 通过控制与保护开关电磁系统动态仿真,在实际应用时,根据不同场合对吸合时间的不同要求而选择恰当的吸合电压,且通过设置合适的延迟时间,及时进行吸合电路和保持电路的转换,既能提高节能效率,又能保证该电磁系统的性能,对CPS电磁系统参数设计和优化提供仿真环境下的理论支持。

【参考文献】

[1] 彭成. 交流接触器节能芯片的研发与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
 [2] 方鸿发. 低压电器及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
 [3] 陆俭国, 何瑞华, 陈德桂, 等. 中国电气工程大典第11卷配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] 周茂祥. 低压电器设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
 [5] 钱金川, 贾文军. 交流接触器节能技术综述[J]. 中国电子商情: 基础电子, 2011(4): 70-71.
 [6] 姚芳, 李奎, 赵靖英, 等. 交流接触器节能技术的研究[J]. 低压电器, 2002(6): 56-58.
 [7] 刘炳彰, 林李杰. 交流接触器节能综述(二)[J]. 江苏电器, 2002(3): 6-14.
 [8] 周志凯, 任万滨, 杨文英, 等. 基于虚拟样机技术的大功率直流接触器动态特性的仿真研究[J]. 低压电器, 2012(15): 12-15.
 [9] IGNIZIO J P. Linear programming in single & multiple objective system[M]. London: Prentice Hall, 1982.
 [10] 郑鹏, 张国钢, 施磊, 等. 智能交流接触器动态仿真和实验研究[J]. 低压电器, 2009(15): 8-12.

收稿日期: 2013-05-20