

带电压反馈的智能接触器动态特性及触头弹跳的仿真与研究

刘颖异, 陈德桂, 纽春萍, 季良

(西安交通大学电气学院, 陕西省 西安市 710049)

Analysis and Simulation of Dynamic Behavior and Contact Bounce for an Intelligent Contactor With Feedback Mechanism

LIU Ying-yi, CHEN De-gui, NIU Chun-ping, JI Liang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In optimum design of AC contactors, it is important to analyze its dynamic behavior. Moreover, movable contact and core bounces have remarkable effect on the lifetime of contactors. According to a new kind of intelligent contactor with feedback mechanism, this paper builds two different sets of periodically inter-transferred equations. The equations describe coupling of electric circuit, electromagnetic field and mechanical system taking account of the influence of friction. And with virtual prototyping technology, dynamic behavior of the contactor can be gotten. The paper introduces contact resistance to investigate the bounce of contact. Finally, the paper gives an optimum design to the duty ratio of intelligent contactor's pulse modulated wave (PWM) under different exciting, and proves, by experiment and simulation, that the bounce time of intelligent contactor working in optimized duty ratio is much less than that of general AC contactors.

KEY WORDS: intelligent contactor; dynamic characteristics; contact bounce; contact resistance; optimum design

摘要: 接触器的动态特性分析对于其优化设计非常重要, 触头及铁心的振动弹跳直接影响接触器的寿命。该文针对一种新型带反馈的智能接触器, 提出了2组周期性相互转换的方程组, 耦合了电路、电磁场和可动部分摩擦的影响, 并采用虚拟样机技术, 研究其闭合的动态过程。提出结合触头接触电阻, 对触头的弹跳情况进行仿真。最后, 利用提出的方法, 优化了不同电压下智能接触器脉宽调制器(PWM)波的占空比, 并采用仿真和实验2种方法验证了在该最优占空比下, 智能接触器的弹跳时间较普通交流接触器大幅减少。

关键词: 智能接触器; 动态过程; 弹跳; 接触电阻; 优化

0 引言

在各类的低压电器中, 接触器是使用面最广的一种产品。随着电气事业的发展, 接触器作为一种电磁开关电器, 使用量日增, 因而节能和提高其使用寿命成为提高接触器性能的关键。其中如何减少触头的弹跳, 是提高接触器寿命的关键。因而, 近年来不少研究工作围绕这一方面进行。在文献[1-2]中, 作者通过采用控制和限定线圈的通电时间来减少触头运动的速度; 在文献[3]中 Stefan Jorgens 研究了最能影响触头运动速度及弹跳的因素; 在动态仿真方面, 文献[4-15]分别采用不同的方法对接触器建立数学模型, 并进行了动态分析。但触头碰撞后的弹跳仿真一直没有得到关注, 研究较少。文献[16]不考虑摩擦力的影响, 研究了接触器闭合的动态过程中触头弹跳现象, 但该文采用均匀磁场来计算电磁磁力, 计算结果存在较大误差; 文献[17]结合磁路方法仿真了普通交流接触器的弹跳现象, 并研究了合闸相角对弹跳时间的影响, 与实际弹跳情况差别较大。因此, 到目前为止, 一方面少有对带反馈系统的接触器的动态特性分析, 另一方面更少有结合触头接触电阻对接触器进行弹跳仿真的研究。

本文研究的对象是一种带有反馈调压系统的新型智能接触器。在国标规定的85%~110%额定电压波动下, 通过反馈调压系统, 在吸合过程中, 保持接触器线圈电压 U_z 不变, 并使对应的吸力特性 $F_z=f(\delta)$ 仅稍高于反力特性, 如图1所示。当动铁心吸合后, 线圈供电电压降低, 并保持 U_b 以节能。智能接触器在吸合过程中线圈电压的变化如图2所示。

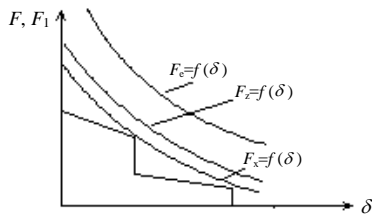


图 1 吸力与反力特性配合曲线

Fig. 1 The cooperative curve of the dynamic attraction and load force

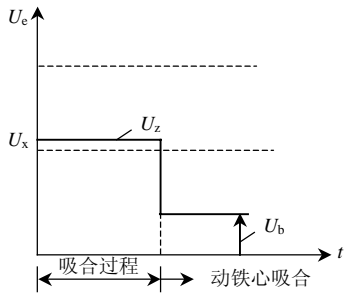


图 2 智能控制的线圈供电电压

Fig. 2 The coil voltage with feedback control

上述带反馈的调压系统利用单片机电路来实现，其框图如图 3 所示，交流输入经整流后，通过脉宽调制器 (PWM)给接触器线圈供电，由微处理器组成的控制模块接收线圈电路的电压和电流反馈信号，来实现对 PWM 调制器的控制，不同的外加电压段对应不同的 PWM 调制占空比，从而保持线圈的供电电压保持不变。其中 PWM 调制的实现是通过绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)的导通和关断来实现的。图 4 为电压为 220V，PWM 调制频率为 5kHz，占空比为某一固定值时测得线圈电压图。

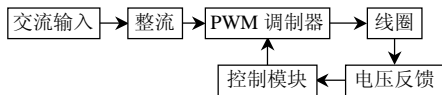


图 3 智能接触器框图

Fig. 3 The block diagram of intelligent contactor

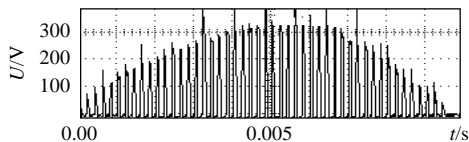


图 4 线圈供电电压波形示意图

Fig. 4 Waveform of the voltage of the coil

因而，一方面智能接触器可大大减少正常工作电压下电磁铁可动部分的动能，减小或消除触头振动，并大幅度提高电寿命；另一方面，通过调压器让吸上位置的线圈电压减小并保持低电压，以达到节能的目的。采用智能控制后，尽管总价格有所提高，但因其寿命提高了 2~3 倍，一台接触器可代替原接触器 2~3 台，再由于其节能的特点，在经济上非常合算。同时，接触器在改为智能控制后，接触

器的铁心可大大缩小且线圈也需重新设计，因此省铜和省铁的优点可以对价格给予适当的补偿。在应用条件上面，由于目前小型接触器较为便宜，大型的接触器价格在几百元，而电子线路在 70~80 元，因此大型接触器应用智能控制增加成本不高。

根据此种智能接触器的特性，本文采用多体系统动力学理论的虚拟样机软件 ADAMS^[18]，并对其进行二次开发，将机械运动方程和电磁场以及电路方程进行耦合迭代求解，并考虑可动部分的摩擦力，研究了上述带反馈调压系统的智能接触器的动态全过程，尤其是结合接触电阻对其触头的弹跳情况进行了较为深入地分析。同时，对仿真结果进行了实验验证。

1 分析模型及方法

1.1 研究对象

本文的研究对象为一额定电流为 160A 的交流接触器，将其改为一带电压反馈的智能接触器。图 5 所示为在 ADAMS 软件中建立的智能接触器模型。在这里根据 ADAMS 的等效原理，将 6 个触头弹簧等效成一个弹簧。当电磁吸力超过反力时，动铁心开始运动，首先动触头运动到与静触头闭合并发生第一次弹跳，接着经过超程后，动铁心与静铁心闭合并带动动触头发生弹跳。

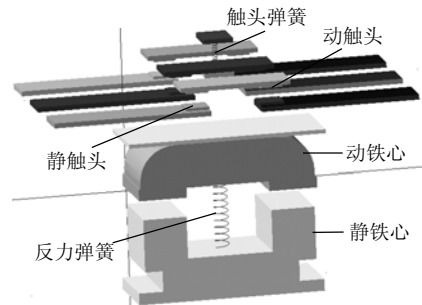


图 5 分析模型

Fig. 5 Analyzed model

1.2 数学模型

在电路方面，对引言中所描述的智能接触器，若线圈电阻为 R ，忽略铁心中涡流，线圈回路在线圈驱动电压不同时刻可分别由电路分方程(1)、(2)表示：

$$\frac{d\psi_1}{dt} = |U_m \sin(\omega t + \varphi)| - i_1 R_1 \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -i_1 R_1 \quad (2)$$

式中： $d\psi/dt$ 指磁链对时间的变化率，即线圈反电势； $|U_m \sin(\omega t + \varphi)|$ 表示交流电压的绝对值； U_m 为电源电

压峰值； φ 为合闸相角； ω 为角频率； i_1 和 R_1 为线圈的电流和电阻。

当线圈驱动电压处于脉冲波高电平时刻，即可控硅闭合时刻，线圈回路由方程(1)表示；当线圈驱动电压处于脉冲波低电平时刻，即可控硅关断时刻，线圈回路由方程(2)表示。

在机械方面，接触器在吸合过程满足物体的牛顿-欧拉变分运动方程：

$$\delta \mathbf{r}^T [m\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}] + \delta \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{J}'\dot{\boldsymbol{\omega}}' + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}'\boldsymbol{\omega}' - \mathbf{n}'] = 0 \quad (3)$$

式中： $\delta \mathbf{r}$ ， $\delta \boldsymbol{\pi}'$ 为约束相容的虚位移和虚转动； m 为物体总质量； \mathbf{F} 为包括摩擦力在内的作用于物体上的总外力； \mathbf{n}' 为外力相对于坐标系原点的总力矩； \mathbf{J}' 为常惯性矩阵； $\ddot{\mathbf{r}}$ 为物体加速度； $\boldsymbol{\omega}'$ ， $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ ， $\dot{\boldsymbol{\omega}}'$ 分别为角速度，角速度矢量和角加速度。

因此当可动部分开始运动时，在可控硅闭合和关断的时刻，电磁机构的动特性分别可由微分方程组(4)、(5)描述：

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - i_1 R_1 \\ \delta \mathbf{r}^T [m\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}] + \delta \boldsymbol{\pi}'^T [\mathbf{J}'\dot{\boldsymbol{\omega}}' + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}'\boldsymbol{\omega}' - \mathbf{n}'] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = -i_1 R_1 \\ \delta \mathbf{r}^T [m\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}] + \delta \boldsymbol{\pi}'^T [\mathbf{J}'\dot{\boldsymbol{\omega}}' + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}'\boldsymbol{\omega}' - \mathbf{n}'] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于一定的励磁电流 i 和行程 x ，接触器存在唯一的 ψ 和 F 数值^[15]，因此 ψ 和 F 可表示为式(6)、(7)：

$$\psi = f_1(i, x) \quad (6)$$

$$F = f_2(i, x) \quad (7)$$

这里函数 $f_1(i, x)$ ， $f_2(i, x)$ 是2个与接触器有关的特殊的传递函数，它们的值与自变量具有一一对应的关系，但是到目前为止，研究工作还不能得到它的解析表达式。因此，需要建立一个由一系列不同 i ， x 情况下函数值组成的数据网格，然后通过插值计算得出任意 i 、 x 情况下的函数值。

在具体计算过程中，机械方程的求解是由ADAMS自行实现^[18]，耦合电路、电磁场和机械运动是由对ADAMS进行二次开发接口来实现的。通过二次开发接口，可从ADAMS中获得 t 时刻的气隙值，首先判断 $t+\Delta t$ 可控硅所处的状态，然后连同此时刻的磁链、电源电压等，通过接口程序根据相应的方程计算出 $t+\Delta t$ 时刻的电磁吸力值以作为模型机械运动方程的一个参数，并返回到ADAMS中。通过这种双向的迭代计算，即可仿真出整个动态过程，包括触头间的碰撞弹跳情况。在整个过程中方程组(4)和(5)成周期性相互转换。

1.3 弹跳的处理

在操作电磁铁闭合过程，动、静触头接触造成的碰撞，是造成触头的第一次振动，随后，动铁心经过超程后，与静铁心相碰撞，也会引起触头的次振动。总的触头振动时间是2次振动时间的总和。

这里将考虑接触电阻以仿真触头弹跳波形的毛刺。接触电阻与触头压力的关系可由下式表示^[19]：

$$R \propto (F)^{-1/3} \quad (8)$$

式中： R 为触头的接触电阻； F 为触头压力。

在接触器的弹跳过程中，随着弹簧压缩量的变化，触头压力发生变化，接触电阻也相应发生变化。

假设触头回路串连一个 1Ω 的采样电阻和一个 $1V$ 的直流电源。在仿真时，模拟实际测量触头弹跳的方法，首先根据位移算出弹簧对触头的压力，再根据触头的压力算出接触电阻，通过计算采样电阻两端的电压值，即可得到弹跳的波形图。采样电阻电压值的计算见式(9)：

$$U_c = \frac{U_1 R_c}{R + R_c} \quad (9)$$

式中： U_c 为采样电阻两端的电压； U_1 为直流电源值，这里为 $1V$ ； R 为触头的接触电阻，当接触器触头未闭合时，为无穷大； R_c 为采样电阻值，这里为 1Ω 。

2 仿真结果及实验

2.1 电流波形仿真结果与实验结果的对比

应用1中方法，可以得到吸合过程线圈的电流波形。图6为当线圈供电电压为 $220V$ ，合闸相角为 0° 时的仿真波形图。

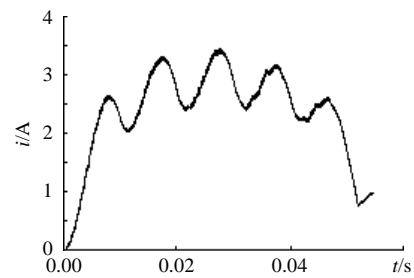


图6 仿真电流波形图

Fig. 6 Simulated result of current

为测量线圈中的电流，本文采用以下测量方法：采用型号为XZB-3型中容量(真空型)定向合闸装置选相合闸，并在每个线圈回路中串联一个小电阻，通过示波器测量电阻两端的电压波形，间接得到线圈中的电流波形。实验原理图如图7所示。

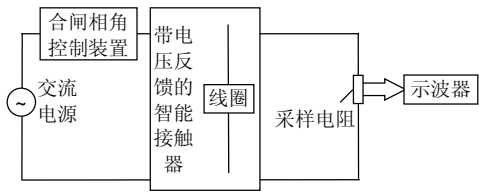


图 7 实验原理图

Fig. 7 Schematic diagram of experiment

图 8 为实验测得的电流波形。从图 6 与图 8 的比较中可以看出，仿真与实验的电流波形基本吻合。实验所得启动线圈最大电流为 3.2A，计算得到的启动线圈最大电流为 3.45A，误差在 10% 以内，仿真结果较为准确。

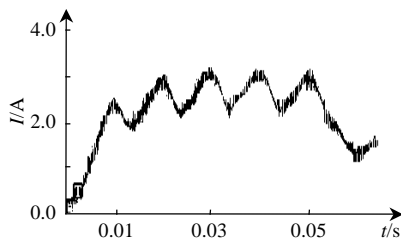


图 8 实验电流波形图

Fig. 8 Experimental result of current

2.2 触头速度

图 9 为当线圈供电电压为 220V，合闸相角为 0° 时仿真所得到的触头速度波形图。仿真所得闭合速度为 0.63m/s。

本文采用如下方法测量触头的闭合速度：首先测得位移曲线，在触头闭合时刻附近取一小段波形，然后利用微分的思想即可近似求得触头闭合时刻的速度。位移的测量装置图如图 10 所示。位移传感器的输出为一个电压波形，用其平均值乘以其

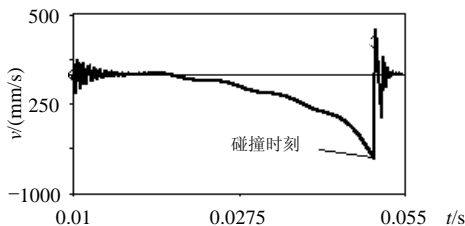
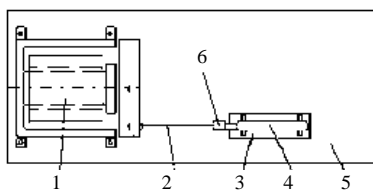


图 9 动触头速度

Fig. 9 Speed of movable contactors



- 1—电磁铁；2—连接钢丝；3—位移传感器支撑架；
- 4—位移传感器；5—固定底座；6—钢丝连接螺母

图 10 位移测量装置图

Fig. 10 Installing for displacement-measurement

转换调整值，就可以得到相应的位移的大小。将直流电压通过电阻分别加于触头两端，将位移曲线和触头两端电压一起通过示波器捕捉，当触头闭合时，其两端电压会有一个突变，此时对应的速度即为触头闭合时刻的速度。

实验所得触头闭合速度为 0.58m/s，仿真与实验基本吻合。

2.3 触头弹跳

采用 2 中的方法可得到弹跳波形。仿真中所需触头材料参数见表 1。图 11 为当线圈供电电压为 220V，合闸相角为 0° 时仿真所得到的触头弹跳波形图。

表 1 触头材料参数

Tab. 1 Material parameter of the contactor

| 刚度系数/ (N/mm) | 力的非线性 指数 | 最大的粘滞 阻尼系数/(N·S/mm) | 最大阻尼时构件的 变形深度/mm |
|-----------------|-------------|------------------------|---------------------|
| 1×10^5 | 2.2 | 1.0 | 0.1 |

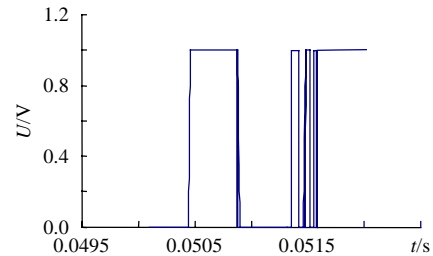


图 11 弹跳仿真波形图

Fig. 11 Simulated result of bounce of the movable contact

本文采用以下测量方法来实测触头的弹跳：将一直流电源通过电阻加于接触器触头两端，在接触器触头闭合的过程中发生的振动情况通过电阻两端的电压来反映，通过捕捉电阻的电压从而得到吸合过程中触头的振动情况，这种方法与仿真的方法类似。图 12 为当线圈供电电压为 220V，合闸相角为 0° 时的触头弹跳的一组实测波形图。从图 11 可以看出，智能接触器动触头仿真弹跳时间为 1.1ms，经由多次实验求平均值所得实验弹跳时间为 1.022ms，仿真与实验结果吻合。弹跳时间的仿真方法是有效的。

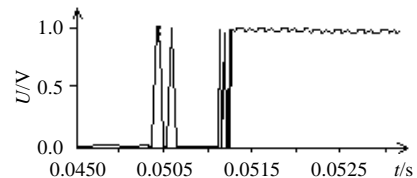


图 12 弹跳实测波形图

Fig. 12 Experiment result of bounce of the movable contact

3 PWM 占空比的优化及与交流接触器弹跳时间的对比

利用上述方法，可以预测此种智能接触器在电

磁设备中动态响应特性,进而对它的参数进行优化。

在吸合阶段,线圈的供电电压为整流后的经过 PWM 调制的脉冲波。在外界电压不变的情况下,占空比越小,触头的速度越小,触头的碰撞越弱。但过小的占空比会使得接触器不能正常吸合。

以智能接触器可靠吸合为约束条件,以减少触头与铁心碰撞弹跳为目标,通过动态特性计算,寻找最佳占空比。设计方法为:在程序中由大到小依次带入不同的占空比(占空比的精度为小数点后 3 位),当带入的占空比可以保证接触器可靠吸合且速度最小时,此时的占空比就是此激励电压下的最佳吸合占空比。

国标规定接触器应在 85%~110% 额定电压下完成吸合,因此本文选取了覆盖这一范围的 8 组电压来计算其最优占空比。表 2 为不同激励下仿真最佳占空比。

表 2 不同激励下仿真最佳占空比

Tab. 2 The optimum duty ratio for different exciting

| 激励电压/V | 仿真最佳占空比 |
|--------|---------|
| 150 | 0.36 |
| 160 | 0.325 |
| 170 | 0.305 |
| 180 | 0.302 |
| 190 | 0.28 |
| 200 | 0.265 |
| 220 | 0.23 |
| 242 | 0.205 |

在以上的最优占空比的基础上,比较有无智能控制下合闸相角为 0° 时的触头振动时间。智能接触器的弹跳时间采取仿真和实测 2 种方法。普通交流接触器采用实测的方法。每组电压下振动时间测量 50 次,取其平均值。有无智能控制情况下触头振动时间比较如图 13 所示。

从图 13 可知在各个励磁电压下,接触器弹跳的仿真时间和实验时间基本吻合。

同时根据比较可发现,带电压反馈的智能接触器,由于触头闭合的速度减少,从而触头的振动时

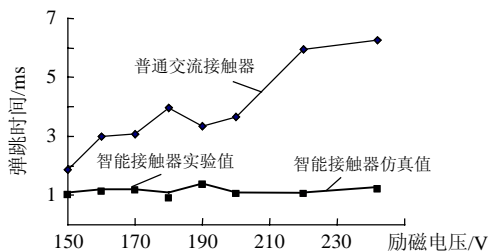


图 13 有无智能控制情况下触头振动时间对比图

Fig. 13 Comparison of the bounce time between AC contactor and the intelligent contactor

间大为减少,而普通交流接触器随着输入电压的增大,触头闭合时刻的振动时间逐渐增大,而采用智能控制后,触头闭合时刻的振动时间始终保持在一个较低稳定的程度。

图 14 为 180V 时,普通和智能 2 种接触器的实测弹跳波形图。可以看出,当在额定电压 180V 时,采用最优占空比的智能接触器,触头闭合时刻的振动时间和无智能控制相比,减少了 80% 左右。

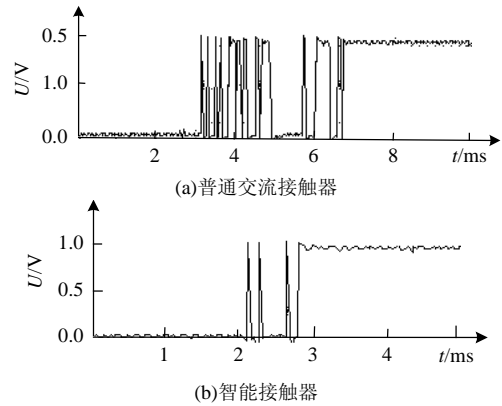


图 14 180V 下有无智能控制的弹跳波形图

Fig. 14 Experiment result of bounce of the movable contact of AC contactor and intelligence contactor when exciting is 180V

因此,一方面在不同励磁电压下,仿真所得弹跳时间与实验值较为吻合,证明所提弹跳仿真方法是有效的;另一方面,在最优占空比下智能接触器的弹跳时间较普通交流接触器大为减少,因而仿真得到的最优占空比是合理的。

4 结论

(1) 针对一种带电压反馈的智能接触器,本文提出 2 组成周期性互相转换的联立方程组来计算其整个动态过程。应用该方法,通过对机械动力学仿真系统 ADAMS 进行二次开发,耦合了电路、电磁场和机械运动并计及可动部分摩擦的影响,实现了接触器整个动态过程的仿真。实验证明该方法是有效的。

(2) 引入接触电阻的影响,在实现动态过程仿真的基础上,提出了对触头的弹跳情况进行仿真的方法,使其可实现弹跳过程以及弹跳波形毛刺的仿真。

(3) 对智能接触器的不同励磁电压下的 PWM 占空比进行了优化,仿真和实验 2 种方法均证明在此最优占空比下智能接触器的弹跳时间较普通交流接触器大为减少。

(4) 在不同励磁电压下,仿真所得弹跳时间

与实验值较为吻合, 提出方法是有效的。

参考文献

- [1] Davies T S, Nouri H, Britton F W. Towards the control of contact bounce[J]. IEEE Trans. Magnetic, 1996, 19(3): 353-359.
- [2] Kiely J H, Nouri H, Kalvelage F, et al. Development of an application specific integrated circuit for reduction of contact bounce in three phase contactors[C]. Proceedings of the Forty-Sixth IEEE Holm Conference, Chicago, IL, USA, 2000: 120-129.
- [3] Stefan J. A quantitative comparison of contactor characteristics for electronic controlled and conventional drives[C]. Proceedings of 20th International Conference on Electric Contact, Sweden, 2000.
- [4] Yoshihiro K, Osamu Mi, Tadashi Y. Numerical analysis of dynamic characteristics of electromagnets using finite element method with edge elements[J]. IEEE Trans. Magnetic, 1994, 30(5): 3248-3251.
- [5] Yoshihiro K, Satoshi T, Tadashi Y. 3-D finite element analysis of operating characteristics of ac electromagnetic contactors[J]. IEEE Trans. Magnetic, 1994, 30(5): 3244-3247.
- [6] Abdul-Rahman A, Mary J, Vander H. The coupled problem in electromagnetic AC Contactors[J]. IEEE Trans. Magnetic, 1997, 33(3): 1630-1633.
- [7] Sadowski N, Bastos J P A, Albuquerque A B, et al. A voltage fed AC contactor modeling using 3D edge element[J]. IEEE Trans. Magnetic, 1998, 34(5): 3170-3173.
- [8] 许志红, 张培铭. 智能交流接触器全过程动态优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 159-164.
Xu Zhihong, Zhang Peiming. Dynamic optimal design of intelligent AC contactor in the whole course[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 159-164(in Chinese).
- [9] 林莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
Lin Xin, Xu Jianyuan, Gao Huijun. Calculation and analyses of permanent magnetic actuator dynamic behavior[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 85-88(in Chinese).
- [10] 高会军, 林莘, 蔡志远. 永磁操动机构磁场计算及动特性分析[J]. 沈阳工业大学学报 2000, (6): 490-493.
Gao Huijun, Lin Xin, Cai Zhiyuan. Magnetic field calculation and dynamic behavior analyses of permanent magnetic actuator[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2000, (6): 490-493(in Chinese).
- [11] 荣命哲, 娄建勇, 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.
Rong Mingzhe, Lou Jianyong, Wang Xiaohua. Simulation analysis and experimental research of operating characteristic for moving contact of contactor with permanent magnet actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 109-113(in Chinese).
- [12] Patrick K, Nelson Si, Nelson B, et al. Coupled field and circuit analysis considering the electromagnetic device motion[J]. IEEE Trans. Magnetic, 2000, 36(4): 1458-1461.
- [13] 张敬菽, 陈德桂, 向洪岗, 等. 直流接触器磁系统动态特性计算及其可视化仿真[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 28-31.
Zhang Jingshu, Chen Degui, Xiang Honggang, et al. Dynamic characteristics of DC contactor electromagnetic system and its visual simulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 28-31(in Chinese).
- [14] 崔芮华, 贾峰, 柳杰, 等. 交流接触器电磁机构动态仿真分析[J]. 微计算机信息, 2006, 22(7-1): 286-288.
Cui Ruihua, Jia feng, Liu Jie, et al. Simulated analysis of the AC contactor electromagnetic mechanism's dynamic characteristics [J]. Control & Automation, 2006, 22(7-1): 286-288(in Chinese).
- [15] 许志红, 张培铭, 戴小梅. 智能交流接触器电磁机构动态分析[J]. 福州大学学报, 2005, 33(4): 468-476.
Xu Zhihong, Zhang Peiming, Dai Xiaomei. Dynamic analysis of electromagnetic system of intelligent AC contactor[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Sciences Edition), 2005, 33(4): 468-476(in Chinese).
- [16] Masayoshi W, Hiroshi Y, Yujiro K. Dynamic analysis and simulation of electromagnetic contactors with AC solenoids[C]. Industrial Electronics Society, IEEE 28th Annual Conference, USA, 2002, 4: 2745-2751.
- [17] 李兴文, 陈德桂, 孙志强, 等. 交流接触器动态过程及触头弹跳的数值分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 229-233.
Li Xingwen, Chen Degui, Sun Zhiqiang, et al. Numerical analysis and investigation of dynamic behavior and contact bounce of AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 229-233(in Chinese).
- [18] 郑建荣. ADAMS 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [19] Volm D, Bichler M, Fichtner K. System Level Simulation for Electromechanical Relays[C]. IEICE, Japan, 2006: 554-559.

收稿日期: 2007-02-12.

作者简介:

刘颖异(1980—), 女, 博士研究生, 研究方向为低压电器及其智能化, liuyingyi666666@eyou.com;

陈德桂(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为低压电器, 开关电弧现象;

纽春萍(1975—), 女, 山西人, 讲师, 在职博士生, 研究方向为电器及其智能化;

季良(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为低压电器开关电弧现象。

(编辑 车德竞)