

带电流反馈的永磁接触器动态特性仿真与分析

刘颖异¹, 陈德桂², 袁海文¹, 袁海斌¹

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京市 海淀区 100191;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Simulation and Analysis on Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Contactor With Current Feedback

LIU Ying-yi¹, CHEN De-gui², YUAN Hai-wen¹, YUAN Hai-bin¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China;

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

ABSTRACT: It is important to analyze dynamic behaviors for the optimum design of AC contactors. Based upon a kind of intelligent permanent magnetic (PM) contactor with current-feedback system, this paper presented a method to obtain the dynamic characteristics of the contactor, and constructed a set of multi-field equations with the state coupled with feedback current signals, the peak value of internal toothed wave, and outputs of several comparators in the circuit. The experimental results proved the correctness of the method. Then, the influence of the hardware's parameters on the performance of the control system was analyzed with this method; and the design criterion was given to these parameters based on the analysis results. The experiments prove that the intelligent permanent contactor with optimal parameters can reduce the contact bounce and save the energy.

KEY WORDS: intelligent permanent contactor; dynamic characteristics; current-feedback system; multi-field equations set

摘要: 接触器的动态特性分析对于其优化设计非常重要。针对一种新型带电流反馈系统的永磁智能接触器, 提出了一组多态方程组。该方程组的状态与反馈电流值相耦合, 并随着反馈电流和线路中多个比较器的输出信号的变化而相互转化, 同时其耦合了电路、电磁场和可动部分摩擦的影响。利用该方法, 基于多体动力学模型, 模拟仿真了带电流反馈永磁接触器的整个闭合过程。实验证明所提方法是正确的。利用所提出的方法, 研究了各硬件参数对控制系统性能的影响, 并给出了其设计准则。实验证明采用最佳控制参数的智能接触器较原样机可大幅节能并减少触头弹跳。

关键词: 永磁智能接触器; 动态特性; 带电流反馈系统; 多态方程组

0 引言

接触器是一种常用的电磁开关电器, 在接触器的设计中, 研究其整个动态过程对于电磁铁的优化设计、节能以及提高接触器使用寿命非常重要。

文献[1-4]分别采用不同的方法对普通交流接触器建立了数学模型, 并对其进行了动态特性分析。文献[5-8]研究了一系列永磁式接触器和操作机构的动态特性。近年来, 一种由法国施耐德公司提出的具有C型外磁轭的永磁接触器, 以其体积小且只有一个休止位置的特点受到国内外关注^[9-11]。K.Yoshihiro^[9]分析了这种接触器在直流励磁下的动态特性, 并得出了一些有意义的结论。目前, 对智能化接触器的动态特性分析相对与传统交流接触器较少。文献[12]提出了一种对带电子线路控制的接触器进行动态特性分析的方法, 并得到了一些有意义的结果; 但该方法基于二维有限元计算, 其采用数目一定的规则单元来剖分动静铁心之间的空气, 这使得接触器在大气隙下空气剖分过疏, 而在小气隙下剖分过密, 计算精度相对较差。福州大学和西安交通大学也做了相关研究, 文献[13-14]提出的一种智能接触器, 对其进行了全面的动态特性分析, 并对合闸相角和吸合过程中线圈励磁的通断时间进行了优化设计。文献[15-16]分别研究了一种双线圈和带电压反馈智能接触器的动态特性。到目前为止, 针对近年来出现的这类工作状态与电流反馈信号相耦合的智能接触器的动态过程研究还较少。

本文研究的对象是一种带电流反馈系统的新型智能永磁接触器, 其磁系统为具有C型外磁轭的

永磁结构；通过电流反馈机制，控制回路在对接触器闭合过程的运动速度进行控制的同时，还能加强对线圈电流纹波的控制；采用脉冲发生器件代替通常使用的单片机，节约了成本。该接触器具有线圈电流平稳、可靠性高、节能以及触头弹跳弱等优点。针对该接触器，本文提出了一种对其动态过程进行仿真的方法。该方法建立了一组多态方程组，方程组的状态与反馈电流值相耦合，并随着反馈电流和线路中多个比较器的输出信号的变化而相互转化，同时耦合了电路、电磁场和可动部分摩擦的影响。利用该方法，本文采用有限元软件 ANSYS 和虚拟样机仿真软件 ADAMS 相结合，对该带电流反馈系统的永磁接触器动态特性进行了仿真，并对仿真结果进行了实验验证。利用所提的方法，研究了各硬件参数对控制系统性能的影响，并给出了关键硬件参数的设计准则。最后，对采用智能控制前后的接触器性能进行了比较。

1 智能接触器的工作原理

带电流反馈智能永磁接触器的工作原理可描述如下：在国标规定的 85%~110% 额定电压波动下，通过反馈调流系统，在吸合过程中，保持接触器线圈电流 I_z 不变，并使其稍高于恰能使接触器吸上的电流 I_p ；当动铁心吸合后，线圈电流降低，并保持在 I_b 以节能。智能接触器在吸合过程中线圈电流的变化如图 1 所示。

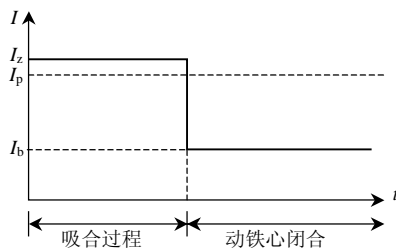


图 1 智能控制的线圈电流

Fig. 1 Coil current with current feedback control

图 2 为该智能接触器的控制框图。如图 2 所示，交流输入经整流后，通过电力电子开关 MOSFET 调制后给接触器线圈供电，由中央控制模块接收线圈电流的反馈信号，来实现对 MOSFET 的控制，不同的线圈电流对应不同的调制占空比，从而保持线圈中通过的电流不变。

智能控制的实现主要依靠中央控制模块中的脉冲控制芯片，图 3 为控制芯片的工作原理图。在控制芯片内部可以产生一定频率的锯齿波，该锯齿波同时加载于 PWM 比较器和死区时间控制比较

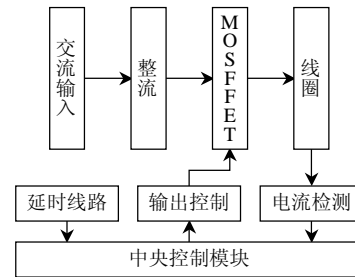


图 2 交流接触器智能控制框图

Fig. 2 Block diagram of the feedback system

器。同时，采样反馈信号与误差放大器的基准电压 y_r (可由控制芯片内部 5V 基准电压分压产生) 进行比较，经过误差放大器加载到 PWM 比较器的同向输入端和锯齿波进行比较，当锯齿波电压高于电压 U_1 时，PWM 控制器输出一方波电压 U_2 。 U_2 和 U_4 通过或非门得到方波电压 U_3 ， U_3 可驱动开关晶体管导通，从而驱动接触器的线圈。当线圈电流减小时，采样反馈信号减小，误差放大器的输出也随之减小，PWM 比较器输出的方波电压 U_2 的宽度增大，开关晶体管的导通占空比也随之增大；当线圈电流增大时，则相反，用这种方式可实现脉宽调制。

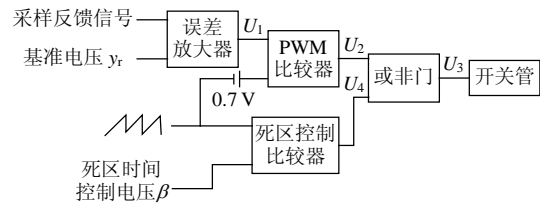


图 3 脉冲控制芯片工作原理说明图

Fig. 3 Principle of work for integrated impulse generator

为防止关断失效等问题，控制线路在工作时可对占空比进行死区控制(即令其最大占空比不超过某一固定值)。在实际工作时，加载到 PWM 反相输入端的锯齿波也同时加载到死区控制时间比较器，该比较器的同向输入端已事先加入某一电压 β ，该电压作为死区时间控制电压。死区时间控制比较器的输出与 PWM 比较器的输出共同加载于同一个或非门(见图 3)。中央控制芯片的脉宽调制波形如图 4 所示，死区控制时间比较器和 PWM 比较器的输出，只要有一个为高电平，或非门的输出电压就为 0，开关晶体管截止。改变死区时间控制电压 β 的数值，可改变最大导通占空比。

智能接触器电流反馈控制的实现机理可描述如下：将指令电流与实际输出的电流进行比较，求出偏差电流，通过放大器放大后，再和锯齿波进行比较，产生 PWM 波形。当电流很小时，采用固定大占空比使电流快速上升，当电流增加到接近期望

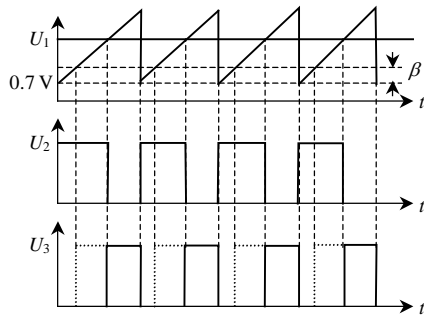


图4 脉宽调制波形
Fig. 4 Generation of PWM

数值时, 占空比变小并根据电流值的大小进行变化, 通过这种方式, 电流可稳定在期望值左右。采用不同的指令电流与放大器的比例系数可以获得不同的控制电流。本文研究的智能接触器前 100 ms 保持在一个较大的电流值, 其后电流值减小并保持在一个较小的值不变。

2 分析模型及方法

2.1 研究对象

本文的研究对象为一额定功率为 5.5 kW, 具有 C 型外磁轭的永磁接触器, 其线圈的额定电压为直流 24 V。加入控制回路后, 形成一带电流反馈控制的智能接触器。图 5 为在多体动力学仿真软件 ADAMS 中建立的接触器模型图。根据 ADAMS 的等效原理, 将 3 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。

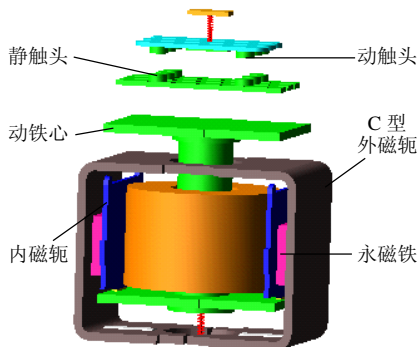


图5 分析模型
Fig. 5 Analyzed model

2.2 数学模型

在机械方面, 带电流反馈的智能接触器在吸合过程中满足物体的牛顿-欧拉变分运动方程:

$$\delta \mathbf{r}^T [m\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}_{\text{tot}}] + \delta \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{J}'\dot{\boldsymbol{\omega}}' + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}'\boldsymbol{\omega}' - \mathbf{n}'] = 0 \quad (1)$$

式中: $\delta \mathbf{r}$ 、 $\delta \boldsymbol{\pi}'$ 分别为相容的虚位移和虚转动; m 为物体总质量; \mathbf{F}_{tot} 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; $\boldsymbol{\omega}'$ 、 $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ 、 $\boldsymbol{\omega}'$ 分

别为角速度矢量的逆矩阵、角速度矢量和角加速度。

在磁场方面, 对于一定的励磁电流 i 和行程 x , 接触器存在唯一的磁链值 ψ 和吸力值 F , 因此 ψ 和 F 可表示为

$$\psi = f_1(i, x) \quad (2)$$

$$F = f_2(i, x) \quad (3)$$

式中 $f_1(i, x)$ 、 $f_2(i, x)$ 是与接触器有关的特殊传递函数, 它们的值与自变量具有一一对应关系, 但无法得到它的解析表达式。需要利用 ANSYS 建立在一系列不同 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。

在电路方面, 加载到死区控制比较器和 PWM 比较器上的锯齿波如图 6 所示, 它们均为周期函数, 周期值为 40 μs , 可分别由函数表达式(4)、(5)表示。

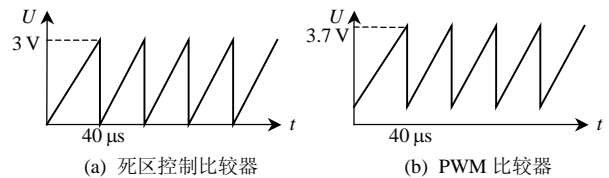


图6 锯齿波示意图

Fig. 6 Sketch map of the toothed wave

$$\begin{cases} y_1(t) = 75\,000t, & 0 \leq t \leq 4 \times 10^{-5} \\ y_1(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_1(t), & n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y_2(t) = 75\,000t + 0.7, & 0 \leq t \leq 4 \times 10^{-5} \\ y_2(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_2(t), & n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (5)$$

式中 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 分别为 t 时刻两锯齿波的大小。

若线圈电阻为 R , 忽略铁心中的涡流, 线圈回路可由微分方程(6)表示:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi) |k(i, t) - iR \quad (6)$$

式中: $\frac{d\psi_1}{dt}$ 为磁链对时间的变化率, 即线圈反电势; U_m 为电源电压峰值; φ 为合闸相角; ω 为角频率; i 、 R 分别为线圈电流和电阻; $k(i, t)$ 为与当前电流值和当前锯齿波幅值有关的函数。

由图 3 可知, 反馈电流信号与基准值 y_r 经误差放大器求差并放大后得到输出信号 U_1 。 U_1 与图 6(b) 所示的锯齿波进行比较, 当其大于锯齿波时, PWM 比较器输出信号 U_2 为高电平; 同时, 死区时间控制电压 β 与图 6(a) 所示的锯齿波进行比较, 当其大于锯齿波时, 死区时间控制比较器输出信号 U_4 为高电平。 U_2 和 U_4 中任意一个信号为高电平时, 电力电子开关的控制信号 U_3 就为低电平, 即 $k(i, t) = 0$; U_2 和 U_4 均为低电平时, $k(i, t) = 1$ 。

PWM 比较器的数学模型可由式(7)~(9)表示，死区时间控制比较器的数学模型可以由式(10)~(11)表示。

$$U_1 = (iR_c - y_r)A \quad (7)$$

$$e = U_1 - y_2(t) \quad (8)$$

$$\begin{cases} U_2 = 0, & e < 0 \\ U_2 = 1, & e \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$q = \beta_1 - y_1(t) \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_4 = 0, & q < 0 \\ U_4 = 1, & q \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： R_c 为采样电阻； y_r 为基准电压； A 为误差放大器放大倍数。函数 $k(i, t)$ 可由式(12)~(13)表示：

$$g = U_2 + U_4 \quad (12)$$

$$\begin{cases} k(i, t) = 0, & g \geq 1 \\ k(i, t) = 1, & g < 1 \end{cases} \quad (13)$$

当可动部分开始运动时，电磁机构的动特性可由微分方程组(14)描述：

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = |U_m \sin(\omega t + \varphi)| k(i, t) - iR \\ \delta \mathbf{r}^T [m\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}_{tot}] + \delta \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{J}'\dot{\boldsymbol{\omega}}' + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}'\boldsymbol{\omega}' - \mathbf{n}'] = 0 \\ \psi = f_1(i_1, x) \\ F = f_2(i_1, x) \\ g = U_2 + U_4 \\ \begin{cases} k(i, t) = 0, & g \geq 1 \\ k(i, t) = 1, & g < 1 \end{cases} \\ U_1 = (iR_c - y_r)A \\ e = U_1 - y_2(t) \\ \begin{cases} U_2 = 0, & e < 0 \\ U_2 = 1, & e \geq 0 \end{cases} \\ q = \beta_1 - y_1(t) \\ \begin{cases} U_4 = 0, & q < 0 \\ U_4 = 1, & q \geq 0 \end{cases} \\ \begin{cases} y_1(t) = 75\,000t, & 0 \leq t \leq 4 \times 10^{-5} \\ y_1(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_1(t), & n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ y_2(t) = 75\,000t + 0.7, & 0 \leq t \leq 4 \times 10^{-5} \\ y_2(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_2(t), & n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

在计算过程中，机械方程的求解是由 ADAMS 软件自行实现的，电路、电磁场的耦合和机械运动仿真则是通过对 ADAMS 进行二次开发来实现的。在整个计算过程中，首先通过二次开发接口获得 t 时刻的气隙值，再根据此时的电流值和锯齿波值判断方程组(14)的状态，根据相应的状态求解下一时刻的吸力值并作为参数返回至 ADAMS 中。求解过

程与反馈电流值相耦合，随着电流和时间的变化，方程的状态不断地进行相互转换，并在各转换时刻保持线圈电流及磁链值不变。

3 仿真结果分析与实验验证

3.1 电流波形与动铁心行程

图 7 为当外加励磁电压为 220 V，合闸相角为 11° 时，吸合过程的线圈电流及动铁心行程的仿真波形图。本文仅计算了前 57 ms 的电流波形。

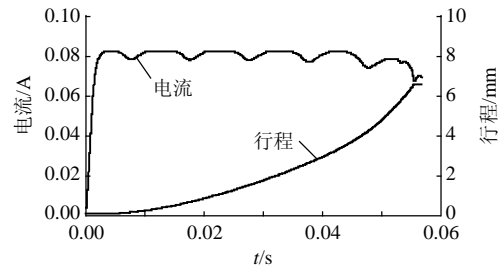


图 7 电流与行程仿真波形图

Fig. 7 Simulated results of current and displacement

为测量线圈的电流，在线圈中串联一个阻值为 1Ω 的电阻，通过测量其两端的电压波形来获得线圈电流波形。图 8 为试验测得的当外加励磁电压为 220 V，合闸相角为 11° 时线圈电流波形图。比较图 7、8 可知，试验波形与仿真波形基本一致。

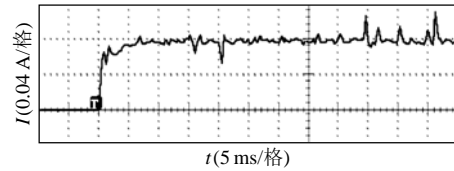


图 8 实验电流波形图

Fig. 8 Experimental result of current

由图 7 可以看出，动铁心在运动初始阶段速度很慢，前 8 ms 动铁心的行程几乎为 0，而此时电流已迅速上升至 0.08 A，因此可以认为这种带电流反馈系统的永磁智能接触器在整个行程几乎为恒流控制。这使设计者可以直接根据反力特性，方便合理地设计接触器在吸合阶段的电流值。

3.2 触头及铁心的闭合时间

图 9 为外加励磁为 220 V，合闸相角为 11° 时，

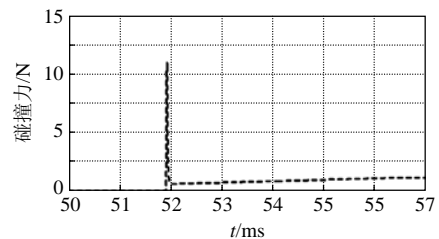


图 9 动静触头碰撞力仿真图

Fig. 9 Simulated result of the collision force of contacts

动、静触头碰撞力的仿真结果图。由图可知，动、静触头闭合的时间约为 52 ms。图 10 为相同情况下测得的触头弹跳波形图。由图可知，实验测得的触头闭合时间约为 54 ms。仿真与实验结果基本吻合，误差不超过 3.8%。

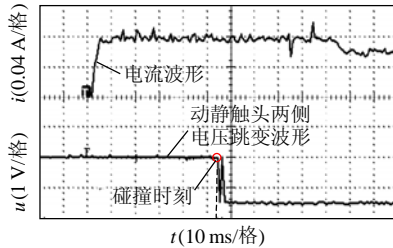


图 10 触头碰撞时刻示意图

Fig. 10 Experimental result of time of collision

4 硬件参数对系统性能的影响及其设计准则

4.1 硬件参数对线圈电流的影响

由该接触器的静态特性可知，其吸合阶段的最佳电流值应设计为 0.08 A。本文采用仿真的方法来分析不同硬件参数对线圈电流大小的影响。

表 1 为选取不同基准电压和放大系数时，利用模拟仿真得到的吸合阶段线圈电流所保持的数值。由表 1 可知，在放大系数 A 相同时，基准电压 y_r 越大，吸合阶段线圈电流所保持的值越大；在基准电压 y_r 相同时，放大系数 A 越大，吸合阶段线圈电流所保持的值越小。产生这种现象的原因是：若不考虑死区时间控制电压的作用，PWM 控制比较器的输出 U_2 决定了不同电流所对应的占空比，根据式(7)~(13)可知，函数 $k(i, t)$ 可表示为

$$e = (iR_c - y_r)A - y_2(t) \quad (15)$$

$$\begin{cases} k(i, t) = 0, & e \geq 0 \\ k(i, t) = 1, & e < 0 \end{cases} \quad (16)$$

表 1 不同参数下吸合阶段线圈电流的比较

Tab. 1 Comparison of current with different parameters

放大系数 A	线圈电流/A		
	$y_r = 0.15$ V	$y_r = 0.20$ V	$y_r = 0.25$ V
8.1	106.1	114.95	124.0
16.2	70.3	79.70	89.6
24.3	56.9	66.90	76.4

对于某一稳定的线圈电流 i_q ，在锯齿波的第一个周期 $40 \mu\text{s}$ 内，电流 i_q 所对应的占空比 k 可由式(17)~(18)计算。

$$m = 1 - [(i_q R_c - y_r)A - 0.7] / U_1 \quad (17)$$

$$\begin{cases} k = m, & m > 0 \\ k = 0, & m \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 U_1 为锯齿波幅值，这里为 3 V。

由式(17)~(18)可知，放大系数 A 相同时，基准电压 y_r 越大，相同电流所对应的占空比就越大，则相应的保持电流就越大，基准电压越小，保持电流就越小。

由以上分析可知，如果要线圈电流保持在期望电流值，必须合理设计其硬件参数。通过对表 1 中数据进行拟合分析，额定电压 220 V 下一定硬件参数下的线圈电流保持值可由式(19)近似求得

$$i_q = \frac{3.7 + y_r A}{R_c A + 3\pi R / (220\sqrt{2})} \quad (19)$$

式中 R 为线圈电阻。

表 2 为利用式(19)计算得到的不同硬件参数下的线圈电流值。可见，表 1 和 2 基本相同，因此，在已知硬件参数的情况下，可方便地利用式(19)来预知线圈电流值。同时，将式(19)代入式(17)~(18)，可获得 i_q 所对应的占空比 k_q ：

$$k_q = i_q R_c \pi / 220\sqrt{2} \quad (20)$$

表 2 不同参数下计算得到的线圈电流值

Tab. 2 Comparison of the calculated current with different parameters

放大系数	线圈电流/A		
	$y_r = 0.15$	$y_r = 0.20$	$y_r = 0.25$
8.1	106.6	115.4	124.2
16.2	70.8	80.1	89.5
24.3	57.8	67.3	76.9

利用式(20)可预先设计期望电流所对应的占空比。以本文研究的永磁接触器样机为例，其吸合阶段的期望电流值为 0.08 A，线圈电阻为 185 Ω ，则其对应的占空比应设计为 0.15。

4.2 硬件参数对不同励磁电压下电流差异的影响

除了保证额定电压下线圈电流保持在期望值以外，不同励磁电压下的线圈电流能基本保持在相同数值也是设计的要求之一。

由 4.1 节可知，对于本文研究的永磁接触器样机，期望电流 0.08 A 所对应的占空比应为 0.15。因此，保持 0.08 A 电流对应的占空比 0.15 不变，选取不同的放大系数，以分析其对不同励磁电压下电流差异的影响。已知期望电流值和放大系数 A ，利用式(19)可求得对应的基准电压 y_r ，如表 3 所示。

利用本文提出的方法，求出采用表 3 所示的各参数时，在不同励磁电压下所对应的吸合阶段的线圈电流值，如表 4 所示。

由表 4 可知，在期望电流对应的占空比相同的情况下，随着励磁电压的增加，线圈的保持电流略有增加。放大系数 A 越大，不同励磁电压之间的保

表 3 不同放大系数所对应的基准电压值

Tab. 3 Parameter y_r with different parameter A

放大系数	8.1	16.2	24.3
基准电压 y_r/V	0.001	0.2	0.266

表 4 不同参数对不同励磁电压下电流差异的影响

Tab. 4 Influence of some parameters on the current with different voltage

放大系数	线圈电流/A			
	$U=150\text{ V}$	$U=190\text{ V}$	$U=220\text{ V}$	$U=240\text{ V}$
8.1	77.8	79.2	81.7	82.0
16.2	78.4	79.6	79.7	80.0
24.3	78.7	79.1	79.4	79.6

持电流值差别越小，从这方面说 A 应该设计的越大越好，但 A 过大会使得硬件电路对阻值偏差等因素过于敏感，因此实际设计时，只要仿真得到的励磁电压 150 V 与 240 V 所对应的线圈电流差异不超过期望电流的 5% 即可；另一方面，相应的基准电压设计值也不应过小，其过小时对元器件精密度的要求过高，例如表 3 中当放大系数为 8.1 时，基准电压值仅为 0.001 V，在实际设计时难以保证其精度。由以上分析可知，表 4 中放大系数的最佳参数值为 16.2，其对应的基准电压值为 0.2。

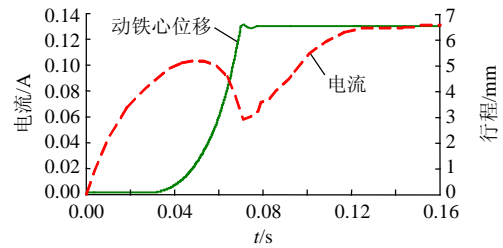
5 智能控制前后性能对比分析

5.1 功耗

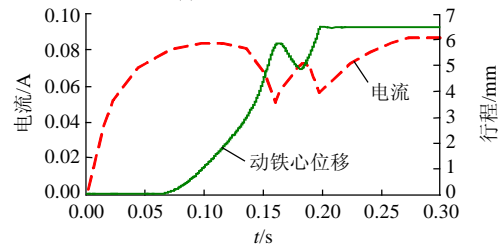
由图 7、8 可知，采用智能控制后接触器的线圈电流很平稳，纹波很小，其铁心的涡流损耗很小。同时由于闭合后线圈电流降低，因此这种接触器可实现大幅节能。经试验测量，原样机在额定电压 24 V 时的吸持功耗为 3.2 W。采用智能控制后，接触器在不同励磁电压下的功耗基本相同，约为 1.0 W，较原样机节能 68.8%。

5.2 动态特性

图 11(a)、(b) 分别为当励磁电压为 24 和 16 V 时，原样机的线圈电流及动铁心行程的实验曲线。由图 11 可以看出，当外加励磁电压为 24 V 时，接触器的吸合状态良好；但在临界吸上电压 16 V 时，受线圈电感变化的影响，线圈电流在 160 ms 左右被压到最低点，由于外施电压较低，在电流降低的过程中，动铁心所受的吸力小于其所受的反力，因此动铁心在闭合过程中出现返回现象。当动铁心返回至一定位置后，线圈电流再次增加，促使动铁心再次向闭合方向运动直至完全闭合。这一现象将会使动触头在动铁心的带动下，在闭合一段时间后再次打开，这将使铁心和触头产生强烈的振动，对接触器的性能极为不利。



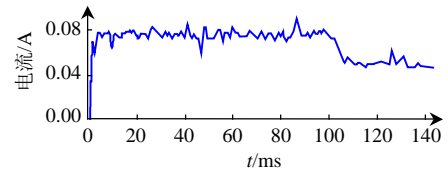
(a) 励磁电压为 24 V



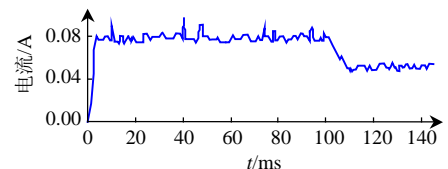
(b) 励磁电压为 16 V

图 11 不同直流励磁电压下的线圈电流与动铁心行程曲线
Fig. 11 Experimental results for current and displacement of the movable core with different voltage

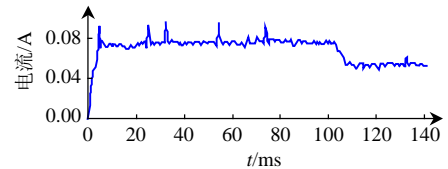
图 12 为永磁接触器采用智能控制后的实验电流波形图。由图可知，接触器在不同励磁电压下的电流波形基本相同，且吸合阶段的电流皆基本保持在 0.08 A，可有效避免原样机在低电压下铁心和触头剧烈抖动的现象，提高接触器的电寿命。



(a) 励磁电压为 220 V



(b) 励磁电压为 150 V



(c) 励磁电压为 87 V

图 12 不同励磁电压下的线圈电流波形图
Fig. 12 Experimental results of current with different voltage

6 结论

1) 针对一种带电流反馈系统的永磁智能接触器，提出了一组多态方程组来计算其动态特性，有效解决了反馈电流值与系统状态方程的耦合。应用该方法，通过对多体动力学仿真系统 ADAMS 进行

二次开发,完成电路、电磁场耦合和机械运动仿真,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。实验证明该方法是正确的。

2) 该带电流反馈系统的智能接触器在整个行程几乎为恒流控制,因此可直接根据反力特性设计其吸合和保持阶段的最佳电流值。

3) 在相同的放大系数下,基准电压越大,相同电流所对应的占空比越大。在期望电流对应的占空比相同的情况下,随着励磁电压的增加,线圈的保持电流略有增加,放大系数 A 越大,不同励磁电压的保持电流差别越小。但放大系数过大会使得硬件电路对阻值偏差等因素过于敏感,因此对于放大系数的设计应满足以下要求:①不同励磁电压所对应的线圈电流差异不超过期望电流的 5%;②相应的基准电压设计值不应过小。

4) 采用智能控制后的接触器,其线圈电流平稳,纹波很小,因而其铁心的涡流损耗很小。由于闭合后线圈电流降低,因此该接触器可实现大幅节能,同时可有效避免原样机在低电压下铁心和触头剧烈抖动的现象。

参考文献

- [1] Yoshihiro K, Satoshi T, Tadashi Y. 3-D finite element analysis of operating characteristics of AC electromagnetic contactors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5): 3244-3247.
- [2] Abdul-Rahman A, Mary J, Vander H. The coupled problem in electromagnetic AC Contactors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(3): 1630-1633.
- [3] Sadowski N, Bastos J P A, Albuquerque A B, et al. A voltage fed AC contactor modeling using 3D edge element[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(5): 3170-317.
- [4] Patrick K, Nelson Si, Nelson B, et al. Coupled field and circuit analysis considering the electromagnetic device motion[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1458-1461.
- [5] 荣命哲, 姜建勇, 王小华. 永磁式接触器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).
- [6] 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).
- [7] Fang Shuhua, Lin Heyun, Ho S L. Transient co-simulation of low voltage circuit breaker with permanent magnet actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1242-1245.
- [8] Liu Fugui, Guo Hongyong, Yang Qingxin, et al. An improved approach to calculate the dynamic characteristics of permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1918-1921.
- [9] Yoshihiro K, Tadashi Y, Kei I, et al. 3-D finite element analysis of dynamic characteristics of electromagnet with permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1339-1342.
- [10] 汪先兵, 林鹤云, 房淑华, 等. 永磁接触器的发展与研究综述[J]. 低压电器, 2009(7): 4-9.
Wang Xianbing, Lin Heyun, Fang Shuhua, et al. Over view of development and research of permanent magnet contactor[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(7): 4-9(in Chinese).
- [11] 陈德桂, 刘颖异. 讨论和分析近期低压电器的若干新技术[J]. 低压电器, 2009(3): 1-6.
Chen Degui, Liu Yingyi. Discussion and analysis of several recent techniques for low voltage electrical apparatus[J]. Low voltage apparatus, 2009(3): 1-6(in Chinese).
- [12] Kuo P, Sadowski N, Batistela N J, et al. Coupled field and circuit analysis considering the electromagnetic device motion[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1458-1461.
- [13] 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): 156-161.
Xu Zhihong, Zhang Peiming. Dynamic optimal design of intelligent AC contactor in the whole course[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 156-161(in Chinese).
- [14] 许志红, 张培铭. 智能交流接触器动态吸合过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 108-113.
Xu Zhihong, Zhang Peiming. Research on dynamic closing course of intelligent AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 108-113(in Chinese).
- [15] 刘颖异, 陈德桂. 双线圈节能接触器的动态特性仿真及优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 161-165.
Liu Yingyi, Chen Degui. Dynamic characteristic simulation and optimization for the energy-saving contactor with double coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 161-165(in Chinese).
- [16] 刘颖异, 陈德桂, 纽春萍, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 20-25.
Liu Yingyi, Chen Degui, Niu Chunping, et al. Analysis and simulation of dynamic behavior and contact bounce for an intelligent contactor with feedback mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 20-25(in Chinese).



刘颖异

收稿日期: 2009-12-10。

作者简介:

刘颖异(1980—), 女, 在站博士后, 研究方向为低压电器及其在线检测与智能化, yingyiliu@163.com。

(编辑 李婧妍)