

控制与开关保护电器的新型智能控制 应用技术及其动态特性*

杨东文¹, 季 良², 曾次玲³, 谷丰强⁴, 曾未伟⁴

(1. 国网湖南省电力有限公司 娄底供电分公司, 湖南 娄底 417000;

2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 国网湖南省电力有限公司 电力调度控制中心, 湖南 长沙 410004;

4. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘 要: 针对传统智能接触器线圈电流脉动较明显的缺点, 提出一种带电流反馈系统的智能控制方法应用于控制与保护开关电器(CPS)的电磁系统。不仅可以保持 CPS 线圈电流平稳, 还可有效降低 CPS 电磁系统的功率损耗。在此基础上, 提出一种对带电流反馈智能控制系统的 CPS 电磁传动机构进行动态特性仿真的方法。该方法建立一组多态方程组, 其状态与电流反馈信号动态耦合, 并随时间变化相互转化。仿真结果与试验结果一致。利用该方法, 研究了硬件参数对 CPS 智能控制系统性能的影响, 并根据分析结果对控制参数进行优化设计。

关键词: 带电流反馈智能控制; 控制与保护开关电器(CPS); 带智能控制电磁系统动态特性

中图分类号: TM561 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0014-09

doi: 10.12177/emca.2022.152

A New-Type Intelligent Control Applied Technology for Control and Protective Switch and Its Dynamic Characteristics Analysis*

YANG Dongwen¹, JI Liang², ZENG Ciling³, GU Fengqiang⁴, ZENG Weiwei⁴

(1. Loudi Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Loudi 417000, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Electric Power Dispatch and Control Centre, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd.,
Changsha 410004, China;

4. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The general intelligent contactor has a disadvantage of coil current pulsation. To overcome this disadvantage, a new-type intelligent control based on current feedback is innovatively applied in control and protective switch (CPS). The CPS with current feedback intelligent control module can not only keep the coil current smooth, but also improve the energy-saving effect and reduce the power consumption. On this basis, a new method which can be used to simulate the dynamic characteristics of the electric-magnetic operating mechanism of CPS with current feedback intelligent control is proposed. The method builds a set of multi-field equations, whose states are dynamically coupled with the feedback current signal and intertransform with time variation. The simulation result has a good agreement with the experiment result. The effects of hardware parameters on the performance of the control

收稿日期: 2022-09-09; 收到修改稿日期: 2022-11-03

* 基金项目: 中央基本科研业务经费项目(YWF-21-BJ-J-516)

作者简介: 杨东文(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高电压试验技术和开关设备。

季 良(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高电压试验技术和开关设备管理。

曾次玲(1976—), 女, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为高电压试验技术和开关设备管理。

system of CPS are analyzed with the constructed model, and the hardware parameters are optimized by the analysis.

Key words: intelligent control with current feedback; control and protective switch (CPS); dynamic characteristics of electric-magnetic system with intelligent control

0 引言

传统电控系统通过“断路器+接触器+过载继电器”组合实现电动机的控制保护,由于电器元件特性匹配不当等原因,易发生因接触器与断路器在短路电流下配合不佳,造成接触器主触头烧蚀甚至熔焊等情形,影响系统正常工作。为解决该问题,国际上推出一种集接触器、断路器等功能于一体的产品—控制与保护开关电器(CPS),在单一结构产品上集成控制、保护功能,代替断路器(熔断器)、接触器、热继电器等传统分离元器件。构成CPS的组件包括电磁传动机构、操作机构、主回路、脱扣器及扩展功能模块等。其中,电磁传动机构的工作原理与普通接触器的电磁系统相同,主要用于接收远距离控制信号和就地操作指令并带动其他模块执行接通或分断任务。可以说,电磁传动机构的性能好坏直接影响到CPS的整体性能与使用寿命。

第一代CPS的电磁传动机构未采用任何智能控制,体积较大^[1]。从第二代CPS开始,各种智能控制策略逐步应用于其电磁传动机构。最具代表性的当属施耐德电气的TesyS U系列产品,采用智能控制后节能效果明显,AC44电寿命可达3万次。总的来说,国际上关于CPS电磁传动机构的控制技术研究仍处于发展阶段。如何针对CPS空间小、集成度高、功能多样的特点,优化提升其智能控制策略,是低压电器领域需要进一步研究的内容。

另外,在电磁传动机构的动态特性研究方面,相关工作主要围绕接触器展开。文献[2-4]采用微分方程组描述电磁传动机构的机械、电路和磁场变化。国内研究机构将有限元法应用到电磁系统的磁场计算中,在考虑磁场非线性问题基础上计算了接触器的动态特性^[5-10]。文献[11]基于二维有限元法,提出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。但由于采用一定数量的规则单元剖分动静铁心之间的空气,难以保证铁心与空气交界处单元大小的合理过渡,计算精度较差。文献[12-15]考虑了合闸相角对智能接触器吸合过程的动态特性影响。文献[16-18]

针对各种智能终端的控制保护进行了研究。到目前为止,与接触器的智能控制策略研究相比,各国学者对采用智能控制策略后的接触器电磁系统动态特性研究尚不足,尤其是对于内部结构更为复杂的CPS电磁传动机构,国内外尚未发现对其动态特性进行研究的报道。

本文将电流反馈智能控制策略应用于CPS的电磁传动机构^[19],并对各功能模块进行详细设计。综合考虑电路、磁场、复杂机械运动的耦合作用,并基于带电流反馈智能控制系统脉冲宽度调制(PWM)占空比与电流反馈信号、内置锯齿波幅值以及线路中多个比较器的输出结果实时相关的特性,建立一组可全面描述智能控制系统工作过程各种可能状态的多态方程组。利用该方法,本文分析了放大系数、基准电压等硬件参数的影响,并根据分析结果对智能控制系统参数进行了优化设计。

1 带电流反馈智能控制方案在CPS的应用

1.1 带电流反馈的智能控制方案设计

根据GB 14048.4—2003,接触器吸合过程中,当电压在额定值的85%~110%范围内波动时,通过反馈调流系统,使线圈电流稍高于吸上电流并维持一个较平稳值,以达到减少触头闭合过程弹跳和降低磁系统损耗的目的。按照上述原理,本文对带电流反馈智能控制策略的各个功能模块进行了详细设计。图1为带电流反馈控制策略的硬件实现原理框图。

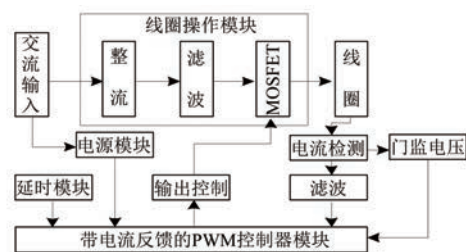


图1 带电流反馈控制策略的硬件实现框图

接通交流输入后,门槛电压模块检测励磁电压值,并在励磁电压达到设定值时发出指令,使反

馈电流与 PWM 控制器模块相连。PWM 控制器模块根据反馈电流信号,确定输出控制脉冲占空比,并通过驱动电路控制线圈供电回路中功率开关管的通断。在接触器吸合过程中,PWM 控制器模块根据电流反馈值不断改变输出占空比,使接触器线圈电流保持在一个合理且平稳的变化区间,达到减少线圈电流波动的目的。吸合后,延时模块调整线路参数,使接触器线圈在一个很小的平稳电流下保持闭合,达到减少电磁系统损耗的目的。

1.1.1 线圈操作模块

线圈操作回路包括整流、滤波、功率开关管以及接触器线圈,其电子线路如图 2 所示。图 2 中, C_1 为滤波电容,VD1 为续流二极管, R_1 是采样电阻。无论功率开关管关断与否,线圈电流始终流经电阻 R_1 , I_{sen} 端的电压信号作为电流反馈信号送给电流采样模块和阈值电压模块。为避免单片机受干扰,整个线路共地,并加入采样电阻检测线圈电流值。

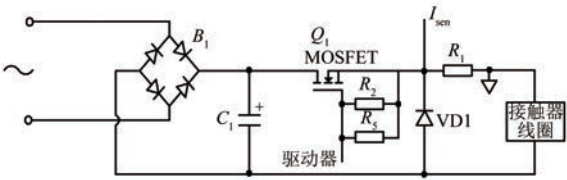


图 2 线圈操作回路线路图

1.1.2 电流反馈模块

图 3 为电流反馈模块的电路框图。线圈电流反馈信号经过一阶低通滤波器去除杂波干扰,然后经过比例放大器生成信号 V_i 输入 PWM 控制器模块,滤波截止频率取 250 kHz。为保持线路对称,与反馈信号比较的基准电压也经过一阶低通滤波,并经过比例放大器生成信号 V_e 输入 PWM 控制器。

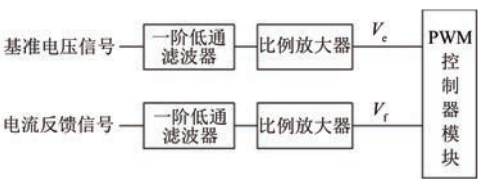


图 3 电流反馈模块电路框图

1.1.3 PWM 控制器模块

图 4 中 PWM 控制器模块采用集成脉冲发生器。集成芯片内部产生一定频率的锯齿波,加至

PWM 比较器和死区控制比较器。采样反馈信号与基准电压比较后,经过误差放大器加到 PWM 比较器的同向输入端,并与锯齿波比较。当电压 V_1 高于锯齿波电压时,PWM 控制器输出方波电压 V_2 。电压 V_2 通过或非门得到方波电压 V_3 ,驱动开关晶体管导通,接触器线圈接入励磁。当线圈电流减小时,采样反馈信号减小,误差放大器输出 V_1 也随之减小,并使 PWM 比较器输出的方波电压 V_2 宽度减小,开关晶体管导通占空比增大,反之亦然。

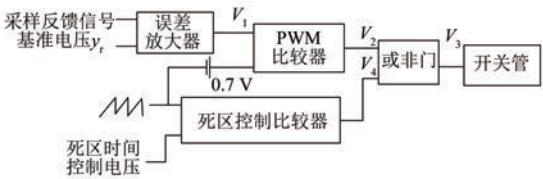


图 4 集成脉冲发生器工作原理

PWM 控制器工作原理如下:将指令电流与实际输出电流比较后,求出偏差电流,并经放大器放大后,与锯齿波比较产生 PWM 波形。误差放大器具有比例特性,其系数直接影响电流的跟踪特性。当电流很小时,采用大占空比使电流快速上升;当电流增加到接近期望值时,占空比变小并根据电流值的大小动态变化。通过这种方式,可以将电流值稳定在期望值附近。采用不同的指令电流与放大器的比例系数可以得到不同的控制电流。

1.1.4 阈值电压模块

阈值电压模块的作用是检测外加励磁电压是否达到吸上电压。在交流输入接通后,PWM 控制器模块给功率开关管一个非常小的占空比,产生一个非常小且远不足使接触器吸合的电流。阈值电压模块通过检测线圈电流的大小判断励磁电压值。当电压达到设定值时,阈值电压模块发出指令使反馈电流与 PWM 控制器模块相连。

1.1.5 延时线路

延时线路用于转换与反馈电流进行比较的基准电压,使基准电压在吸合阶段保持一个值,在吸持阶段转换为另一个值。相应地,线圈电流在吸合阶段为一个值,在吸持阶段为另一个值。在实现方法上,可采用任何已有的具有延时功能的线路,本文采用 RC 延时线路。

1.1.6 电源模块

控制线路只需一路+24 V 电源,可由任何开

关电源模块产生。开关电源模块在 85~265 V 交流电压下工作。当电压低于 85 V 时,电源模块不再工作,因而接触器释放电压为 85 V 且释放过程不存在抖动现象。

1.2 应用对象

为验证控制效果,将 1.1 节提出的带电流反馈智能控制方案应用于某国产 CPS 样机中。图 5 为该国产 CPS 样机的整体结构及其部分电磁传动机构模型。其中,电磁传动机构选用具有 C 型外磁轭的永磁结构。

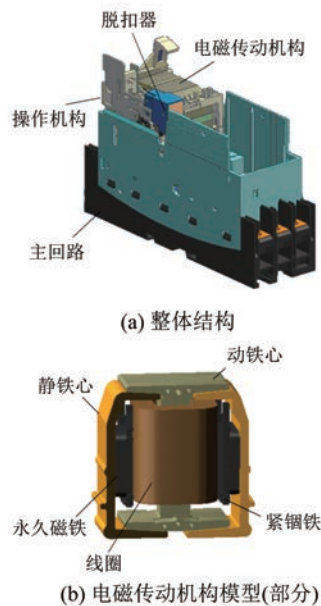


图 5 CPS 整体结构及其部分电磁传动机构模型

1.3 CPS 反力特性

CPS 的触头系统与普通交流接触器有很大不同,图 6 为 CPS 电磁机构及触头系统的模型图。要合理设计线圈电流,必须计算 CPS 的反力特性。包括:线圈通电产生的麦克斯韦力与永磁体产生力的合力、反力弹簧产生的力、触头弹簧产生的力、弹簧片对动铁心的作用力。

1.3.1 触头弹簧、反力弹簧及弹簧的作用力

反力弹簧始终提供打开的力,并随着工作气隙 1 的减小线性增加,表 1 为反力弹簧的参数值。触头弹簧给按钮施加竖直向上的力,此力通过挡板、旋转板在 A 点以碰撞力形式施加给动铁心。将碰撞力 F_j 分解为水平力 F_x 和竖直力 F_y ,仅有 F_x 对电磁机构的吸合过程产生影响。与普通交流接触器的触头弹簧提供反力不同,水平力 F_x 是

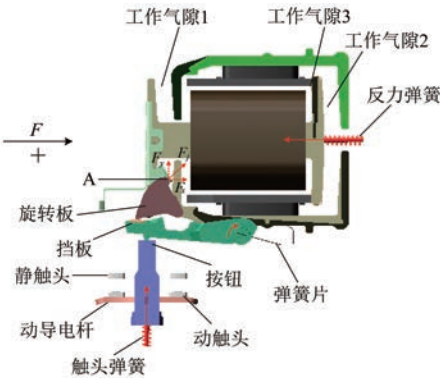


图 6 CPS 电磁机构及触头系统模型

使 CPS 电磁机构闭合的力,该力在触头闭合后消失。弹簧片对挡板施加一个顺时针力矩,该力矩也在 A 点对动铁心产生作用力。

表 1 反力弹簧参数

打开状态/N	吸合状态/N	刚度系数/(N·mm ⁻¹)
-2.60	-4.58	-0.46

在多体动力学分析软件 ADAMS 中,建立如图 5 所示的模型,并施加不同工作气隙下的 F_x 。图 7 为电磁结构在触头弹簧、弹簧片以及反力弹簧共同作用下的反力特性。总反力为反力弹簧、触头弹簧以及弹簧片共同作用在动铁心上的 F_x 代数之和。可见,随着气隙 3 增加,总反力由使电磁机构吸合的力逐渐变化为使电磁机构打开的力。当工作气隙 3 为 3.9 mm 时,由于动、静触头发生碰撞,按钮与挡板分离,触头弹簧的碰撞力消失,使作用在动铁心上的 F_x 有一个突变,从而总反力也产生相应突变。

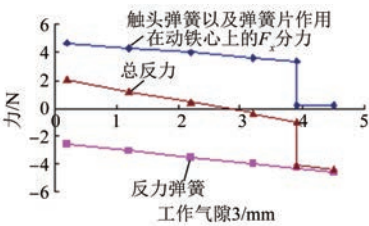


图 7 电磁机构的反力特性

1.3.2 线圈电流为零时电磁机构所受的合力

当线圈电流为零时,采用三维有限元仿真软件 ANSYS 计算动铁心所受的电磁力。由图 8 可知,总合力绝对值先减小后增大,在行程为 2.3 mm 左右时最小。

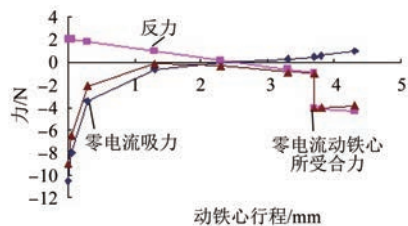


图 8 零电流时动铁心所受合力

1.4 不同阶段线圈电流的设计

图 9 为不同电流下 CPS 电磁机构的吸力、反力配合曲线。当电流大于 0.1 A 时,任何工作气隙下吸力、反力和均大于 0。因此,设吸合阶段的电流值为 0.1 A。当电磁机构处于闭合位置且电流大于 0.04 A 时,吸力与反力的代数和大于 0,因此设计其闭合阶段的电流值为 0.04 A。

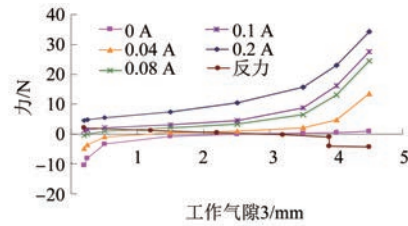


图 9 不同电流下的吸力和反力的配合曲线

得到 CPS 的反力特性后,可以利用 1.1 节介绍的带电流反馈控制系统,实现对线圈吸合过程的动态控制。通过调整带电流反馈控制系统的硬件参数,使线圈电流在闭合过程和吸合后分别保持在设计值,起到减少触头弹跳和节能降耗的目的。

1.5 采用智能控制后的样机性能

1.5.1 试验方法

为了验证采用智能控制后 CPS 样机的性能,本文测量了 CPS 闭合过程的线圈电流及触头弹跳。其中,线圈电流通过在线圈回路串联一个小电阻,并利用示波器测量电阻两端的电压波形间接得到电流波形,试验原理如图 10 所示。

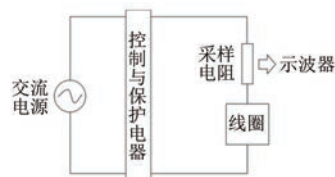


图 10 线圈电流测量原理

测量触头弹跳时,将直流电源通过电阻加于接触器触头两端,通过捕捉电阻两端电压的变化得到接触器闭合过程的触头弹跳情况。试验原理如图 11 所示。

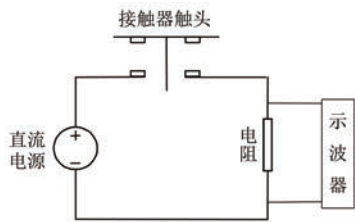


图 11 触头弹跳时间测量原理

1.5.2 试验结果

图 12~图 14 是 CPS 电磁系统采用带电流反馈智能控制后,在不同励磁电压下的试验电流波形。可见,线圈电流平稳,纹波很小。虽然励磁电压不同,但线圈电流几乎不受影响,吸合阶段电流约为 0.1 A,保持阶段约为 0.04 A。即,采用带电流反馈智能控制后,即使在不同励磁电压下,CPS 的工作特性也基本不变。当电磁系统处于闭合状态时,通过功率表测得不同励磁电压下的功耗基本相同,约为 0.8 W。

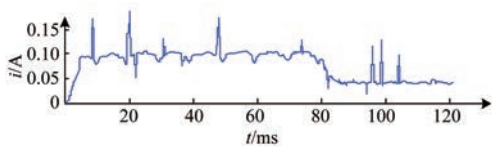


图 12 励磁电压为 220 V 时线圈电流波形图

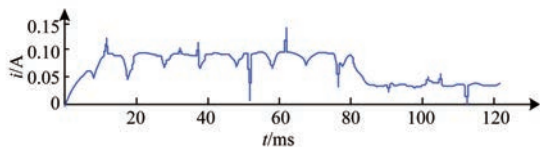


图 13 励磁电压为 150 V 时线圈电流波形图

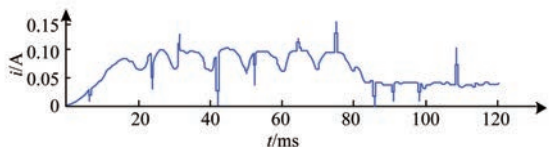


图 14 励磁电压为 87 V 时线圈电流波形图

图 15 为不同励磁电压下 CPS 样机的触头弹跳时间。采用带电流反馈智能控制后,触头弹跳时间保持在一个较低的稳定值。

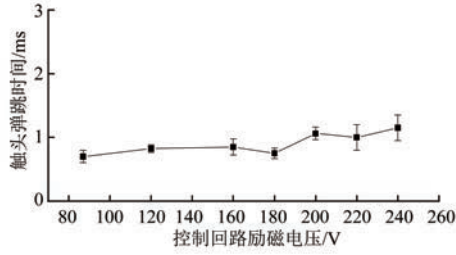


图 15 不同励磁电压下的 CPS 触头弹跳时间

2 带电流反馈智能控制的 CPS 电磁传动机构动态特性分析

2.1 数学模型

对于带电流反馈智能控制的 CPS 电磁传动机构,建立其动态特性仿真模型的难点在于如何处理反馈电流与系统控制状态的耦合关系。其中,线圈回路的电路方程为

$$\frac{d\psi_1}{dt} = |U_m \sin(\omega t + \varphi)| \cdot k(i, t) - iR \quad (1)$$

式中: ψ_1 为线圈磁链; U_m 为交流电压峰值; ω 为电网电压角频率; φ 为合闸相角; $k(i, t)$ 为与当前电流值和锯齿波幅值有关的函数; i 为线圈电流; R 为线圈电阻。

PWM 控制器模块的内部集成芯片可产生峰值为 3 V、周期为 40 μ s 的锯齿波,并同时加至死区时间控制比较器和 PWM 比较器。加至死区时间控制比较器的锯齿波函数表示如下:

$$\begin{cases} y_1(t) = 75\,000t \\ y_1(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_1(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y_1(t)$ 为 t 时刻的锯齿波大小; $0 \leq t \leq 40 \times 10^{-6}$; $n=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

由于芯片内部基准电源的原因,加到 PWM 比较器上的锯齿波值升高了 0.7 V,其函数为

$$\begin{cases} y_2(t) = 75\,000t + 0.7 \\ y_2(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y_2(t)$ 为 t 时刻的锯齿波大小; $0 \leq t \leq 40 \times 10^{-6}$; $n=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

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 V_1 。当 V_1 大于锯齿波时, PWM 比较器输出信号 V_2 为高电平。当死区时间控制电压大于锯齿波时,死区时间控制比较器输出信号 V_4 为高电平。当 V_2 和 V_4 任意一个

为高电平时,电力电子开关的控制信号 V_3 为低电平,即 $k(i, t) = 0$ 。反之, $k(i, t) = 1$ 。因此, PWM 比较器的数学模型可表示为

$$\begin{cases} V_1 = (iR_c - y_r)A \\ e = V_1 - y_2(t) \\ V_2 = 0, e < 0 \\ V_2 = 1, e \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_c 为采样电阻; y_r 为基准电压; A 为误差放大器的放大倍数。

死区时间控制比较器的数学模型为

$$\begin{cases} q = \beta_1 - y_1(t) \\ V_4 = 0, q < 0 \\ V_4 = 1, q \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: β_1 为死区控制电压。

函数 $k(i, t)$ 可由方程组表示如下:

$$\begin{cases} g = V_2 + V_4 \\ k(i, t) = 0, g \geq 1 \\ k(i, t) = 1, g < 1 \end{cases} \quad (6)$$

当可动部分开始运动时,带电流反馈智能控制系统的 CPS 电磁传动机构动态特性可由微分方程组描述:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = |U_m \sin(\omega t + \varphi)| \cdot k(i, t) - iR \\ \delta \mathbf{r}^T [m \ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{F}] + \delta \mathbf{\pi}'^T [\mathbf{J}' \dot{\omega}' + \tilde{\omega} \mathbf{J}' \omega' - \mathbf{n}'] = 0 \\ \psi = f_1(i_1, x) \\ F = f_2(i_1, x) \\ k(i, t) = 0, g \geq 1 \\ k(i, t) = 1, g < 1 \\ g = V_2 + V_4 \\ V_2 = 0, e < 0 \\ V_2 = 1, e \geq 0 \\ e = V_1 - y_2(t) \\ V_1 = (iR_c - y_r)A \\ V_4 = 0, q < 0 \\ V_4 = 1, q \geq 0 \\ q = \beta_1 - y_1(t) \\ y_1(t) = 75\,000t, 0 \leq t \leq 40 \times 10^{-6} \\ y_1(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_1(t), n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ y_2(t) = 75\,000t + 0.7, 0 \leq t \leq 40 \times 10^{-6} \\ y_2(t - n \times 40 \times 10^{-6}) = y_2(t), n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中: δr 为约束相容的虚位移; $\delta \pi'$ 为约束相容的虚转动; m 为物体总质量; F 为作用于物体上的总外力; n' 为外力相对于坐标系原点的总力矩; J' 为常惯性矩阵; $\ddot{r}$ 为物体加速度; ω' 、 $\tilde{\omega}$ 、 $\dot{\omega}'$ 为角速度、角速度矢量和角加速度。

智能控制系统的机械运动及电磁场可分别通过 ADAMS 和 ANSYS 软件求取,此处不再赘述。

本文通过 ADAMS 二次开发接口实现方程组式(7)中电路、电磁场和机械运动方程的耦合求解。在计算过程中,通过接口获得 t 时刻的气隙值;根据 t 时刻的电流值和锯齿波值判断方程组式(7)的状态;根据方程组状态计算 $t+\Delta t$ 时刻的吸力值并返回 ADAMS。求解过程和反馈电流值相互耦合,并且随着电流和时间变化,方程状态不断转换。

2.2 仿真与试验结果分析

以图 5 所示 CPS 为分析对象,利用上述方法模拟其电磁传动机构在闭合过程的动态特性,并进行试验验证。

2.2.1 电流波形仿真结果与试验结果对比

图 16 为励磁电压取 220 V、合闸相角取 11° 时的吸合过程电流仿真波形。本文只计算前 25 ms 的电流波形,计算步长为 $2\ \mu\text{s}$ 。图 17 是相同条件下试验测得的电流波形图。可以发现,试验与仿真结果基本一致。

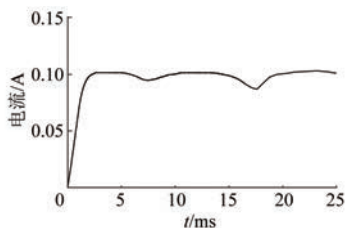


图 16 仿真电流波形图

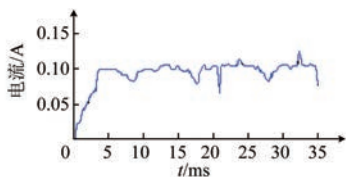


图 17 试验电流波形图

2.2.2 电压波形仿真结果与试验结果对比

图 18 为前 1 ms 的电压波形仿真波形。由于

线圈电流很小,占空比被钳位在 0.9。图 19 为前 1 ms 的试验电压波形图。可以看出,二者波形几乎一致。

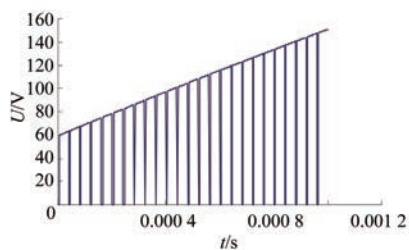


图 18 电压波形仿真图

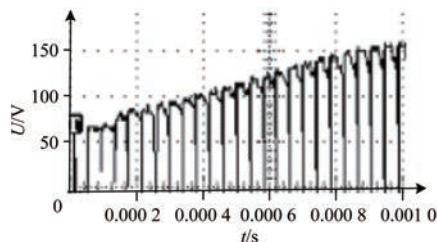


图 19 电压波形测量图

2.2.3 触头闭合时间仿真与试验结果对比

图 20 为动、静触头碰撞力的仿真结果,触头闭合时间(碰撞力突跳点)约为 19.5 ms。图 21 为试验测得的触头闭合时刻与线圈电流对应图,横坐标为 10 ms/格,可知闭合时间为 20.0 ms。仿真与试验结果误差为 2.5%。

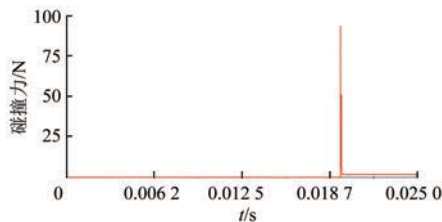


图 20 动静触头碰撞力仿真图

2.2.4 动铁心的闭合时间及速度

仿真与试验结果基本吻合,证明所提出的方法是正确的。利用仿真模型分析 CPS 电磁机构的动态特性,得到动铁心闭合时刻的速度仅为 $0.52\ \text{m/s}$,动、静触头及铁心的碰撞非常小。

2.2.5 线圈电流与动铁心行程对应关系

图 22 为 CPS 电磁机构线圈电流与动铁心行

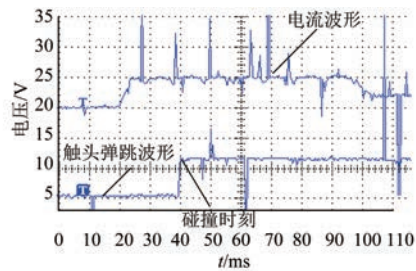


图 21 触头碰撞时刻示意图

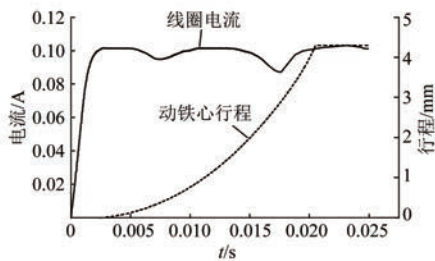


图 22 线圈电流与动铁心行程对应关系

程的对应关系。可见,动铁心在初始阶段速度很慢,前 4 ms 行程几乎为 0,而此时电流已迅速上升到 0.1 A。可以得出结论,在整个行程中,带电流反馈控制的智能电磁系统几乎为恒流控制。根据这一点,设计者可直接根据反力大小设计 CPS 电磁机构在吸合阶段的最佳电流值。

3 硬件参数对 CPS 智能控制系统性能的影响

利用第 2 节提出的仿真模型,本文研究了硬件参数对电磁系统性能的影响,并开展优化设计。由带电流反馈系统的智能控制原理可知,不同电流对应的占空比由误差放大器的放大系数 A 以及基准电压 y_r 共同决定。因此,本节将重点分析二者对 CPS 控制性能的影响。

3.1 不同参数对电流大小的影响

由 1.4 节可知,CPS 电磁机构在吸合阶段的最佳电流值为 0.1 A。上文通过试验手段不断调整放大系数 A 以及基准电压 y_r 的值,直至额定电压下线圈电流保持在 0.1 A。本节采用仿真方法分析不同硬件参数对线圈电流的影响。为便于分析,在试验获得的参数附近选 3 组数值进行比较。表 2 为选取不同基准电压和放大系数时,利用仿真方法得到的吸合阶段线圈电流大小。

表 2 不同参数下的吸合阶段线圈电流比较 mA

放大系数 A	基准电压 y_r/V		
	0.23	0.28	0.33
7.5	133.2	142.8	152.5
15.0	91.8	101.5	111.5
22.5	77.6	86.3	96.3

由表 2 可知,当放大系数 A 不变时,基准电压 y_r 越大,吸合阶段线圈电流的保持值越大;当基准电压 y_r 不变时,放大系数 A 越大,吸合阶段线圈电流的保持值越小。对表 2 进行拟合分析,可得到线圈电流保持值的近似计算式:

$$i_q = \frac{3.7 + y_r \times A}{R_c \times A + \frac{3\pi \times R_l}{220\sqrt{2}}} \tag{8}$$

式中: R_l 为线圈电阻。

因此,在已知硬件参数的情况下,可利用式(8)计算线圈的期望电流值。以本文分析的 CPS 样机为例,其电磁系统在吸合阶段的期望电流值为 0.1 A。

3.2 不同参数对不同励磁电压下电流差异的影响

对于带电流反馈的智能控制方案而言,除了在不同励磁电压下保持线圈电流不变外,在不同励磁电压下维持线圈电流不变也是其设计要求之一。因此,在保持线圈期望电流值 0.1 A 不变的前提下,选取不同放大系数 A 分析其对不同励磁电压下电流差异的影响。基准电压 y_r 根据式(8)求得,如表 3 所示。

表 3 不同放大系数所对应的基准电压值

放大系数 A	7.5	15.0	22.5
基准电压 y_r/V	0.06	0.28	0.35

利用上文提出的仿真方法,可求得不同励磁电压下、对应表 3 各参数的吸合阶段线圈电流值,如表 4 所示。

表 4 不同参数对不同励磁电压下电流的影响 mA

放大系数 A	励磁电压/V			
	150	190	220	240
7.5	96.8	100.1	81.7	82.0
15.0	99.9	101.3	101.5	102.0
22.5	100.5	101.1	101.2	101.5

由表 4 可知,随着励磁电压增加,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持电流差别越小。从这点来说,放大系数 A 应该越大越好,但考虑到硬件电路受阻值偏差等因素的影响,实际设计时只要电流差异不超过线圈期望电流的 5% 即可。另外,考虑到对元器件精密度要求的影响,基准电压设计值也不应过小,表 4 中放大系数 A 的最佳值为 15.0,对应基准电压为 0.28。

4 结 语

(1) 将带电流反馈的智能控制方案应用于控制与保护电器(CPS)后,其线圈电流更加平稳,纹波更小,相应的铁心涡流损耗也减少。

(2) 针对带电流反馈智能控制的 CPS 磁系统,提出一种对其动态特性进行仿真的方法,解决了反馈电流值与 CPS 系统状态方程的耦合问题。

(3) 仿真与试验结果表明,引入带电流反馈智能控制方案后,CPS 电磁系统的吸合过程几乎为恒流控制,因此可直接根据反力特性设计吸合和保持阶段的最佳电流值。

(4) 相同放大系数 A ,基准电压 y_r 越大,吸合阶段线圈电流的保持值越大;相同基准电压 y_r ,放大系数 A 越大,吸合阶段线圈电流的保持值越小。随着励磁电压增加,线圈保持电流略有增加,放大系数 A 越大,不同励磁电压的保持电流差别越小。

【参 考 文 献】

- [1] 胡景泰,曾萍,朱文灏,等. 可通信智能化控制与保护开关电器的发展与应用[J]. 低压电器,2004(8):37.
- [2] TANI K, NISHIO T, YAMADA T, et al. Transient finite element method using edge elements for moving conductor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 1384.
- [3] WADA M, YOSHIMOTO H, KITAIDE Y. Dynamic analysis and simulation of electromagnetic contactors with AC solenoids [C] // IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, 2002.
- [4] MOHAMMED O A, LIU Z, LIU S, et al. Finite-element-based nonlinear physical model of iron-core transformers for dynamic simulations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1027.
- [5] 王丽华, 苏秀苹, 姬丽娟, 等. 利用 ANSYS 软件进行双 E 型交流接触器吸力特性分析[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(1): 102.
- [6] 苏秀苹, 姬丽娟, 赵尚武, 等. 基于三维有限元分析的交流接触器磁系统动特性的计算[J]. 低压电器, 2005(10): 3.
- [7] 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(19): 286.
- [8] 纽春萍, 陈德桂, 林娜, 等. 基于三维有限元分析的交流接触器电磁铁的优化设计[J]. 低压电器, 2004(4): 10.
- [9] 武安波, 王建华, 耿英三, 等. 接触器用交流电磁铁三维磁场分析和静特性优化[J]. 电工技术杂志, 2002(6): 30.
- [10] 林娜. 交流接触器电磁机构的特性仿真与优化设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- [11] KUO-PENG 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.
- [12] 孙园, 许志红. 基于 ANSYS 软件的智能交流接触器电磁系统设计[J]. 低压电器, 2006(11): 3.
- [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(17): 156.
- [14] 张春茜, 李岩, 高波, 等. 交流接触器动态特征值处理方法的研究[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2017(3): 25.
- [15] 周小娜, 陈志英, 苏焕先, 等. 智能型节能交流接触器控制器设计[J]. 电气工程学报, 2015, 10(12): 27.
- [16] 程湘, 田昊, 周群, 等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 48.
- [17] 袁培, 王舶仲, 毛文奇, 等. 基于多重生成本对抗网络的智能开关设备状态感知与诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 67.
- [18] 朱吉然, 康童, 王风华, 等. 基于智能电子装置建模方法的配电终端自描述技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 149.
- [19] 刘颖异, 陈德桂, 袁海文, 等. 带电流反馈的永磁接触器动态特性仿真与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 118.