

永磁接触器位移分段 PWM 控制及 吸合过程动态特性分析

汪先兵, 林鹤云, 房淑华, 任其文, 金平

(东南大学伺服控制技术教育部工程研究中心, 江苏省 南京市 210096)

Analysis of Displacement Subsection PWM Control and Dynamic Characteristic for Closing Process of Permanent Magnet Contactor

WANG Xian-bing, LIN He-yun, FANG Shu-hua, REN Qi-wen, JIN Ping

(Engineering Research Center for Motion Control of MOE, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A control strategy of displacement subsection was proposed based on analyzing closing characteristics of permanent magnet (PM) contactor. The armature displacement was detected in real time so as to adjust the pulse width modulation (PWM) duty ratio of control voltage. The dynamics attraction force and anti-force characteristics of PM contactor matched well so that the optimum closing control characteristics was achieved. Dynamic characteristic equation of closing process under the PWM intelligent control of displacement subsection was established by coupling the voltage equivalence equation and mechanical motion equation. Simulation results of the whole closing dynamic process of PM contactor using 4-order Runge-Kutta method coincided with experimental results well, so the validity of dynamic characteristic equation and simulation method was verified. Finally, an optimum control method was proposed by comparing four different subsection PWM control methods experimentally with the proposed control strategy, which could decrease the closing velocity of movable contact and armature of PM contactor significantly, and could reduce the first and the second contact bounces.

KEY WORDS: permanent magnet contactor; intelligent control; closing process; displacement subsection; dynamic characteristic

摘要: 在分析永磁接触器吸合特性的基础上, 提出位移分段的控制策略, 实时检测接触器动铁心位移, 并据此调整控制电压脉宽调制(pulse width modulation, PWM)占空比, 使接

触器的动态吸力和反力特性达到良好的配合, 实现最优运动特性下的吸合控制。建立在位移分段 PWM 智能化控制下吸合过程的动态特性方程, 耦合电压平衡方程和机械运动方程, 采用 4 阶龙格-库塔算法仿真永磁接触器整个吸合动态过程。仿真结果与实验测量较吻合, 验证了动态特性方程和仿真方法的正确性。最后, 针对提出的控制策略, 通过实验比较了 4 种不同分段的 PWM 控制方案, 选出了最佳, 可显著降低永磁接触器动触头及动铁心的闭合速度, 并减少由其碰撞带来的触头一、二次弹跳。

关键词: 永磁接触器; 智能化控制; 吸合过程; 位移分段; 动态特性

0 引言

永磁(permanent magnet, PM)接触器是在电磁式接触器基础上发展起来的一种新的开关设备, 具有显著的节能、降噪和抗晃电性能等优点^[1-5]。随着工业生产现代化水平的不断提高, 对其寿命和可靠性的要求也越来越高, 实现吸合过程中动态吸力与反力特性合理配合, 减小触头一、二次弹跳和增强接触器控制单元的可靠性, 是提高永磁接触器的综合性能并延长其使用寿命的关键。

近年来, 关于永磁接触器的研究多集中于操动机构的静动态特性仿真、触头弹跳与模拟、电子控制单元开发等方面。文献[1-3]利用 ANSYS 和 ADAMS 对永磁接触器机构动力学和动触头动作特性进行了研究。文献[4-8]提出一种模拟或电子控制单元实现对永磁接触器的分合闸控制, 并对其动态特性进行了研究。目前, 国内外大多采用对动态特性进行智能控制, 来提高电磁式接触器的寿命和可

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA05Z224); 江苏省“青蓝工程”基金项目。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2006AA05Z224); Qing Lan Project Foundation of Jiangsu.

靠性^[9-14],取得了一定的成果,为永磁接触器的智能化控制研究奠定了良好的基础。但它们在原理和结构上的明显差异,决定了两者的智能控制方法也有所不同。从现有的资料来看,未见针对永磁接触器智能化控制及其吸合过程动态特性的研究,深入开展相关设计研究,有利于提高永磁接触器的智能化控制水平和寿命,进而提高其综合动态性能和机械电气寿命。

本文研究了永磁接触器吸合过程的智能化动态控制方法,提出吸合过程中位移分段脉宽调制(PWM)控制的策略:通过位移传感器实时检测接触器吸合过程中的位移信号变化,在不同的位移区域调整PWM占空比,使接触器的动态吸力和反力达到良好的配合,实现最优运动特性下的吸合控制,有效地减少了触头的一、二次弹跳,提高了接触器的电气和机械寿命。建立了PWM控制下吸合过程的动态特性方程,采用有限元方法,利用龙格-库塔法求解动态微分方程,对永磁接触器整个吸合动态过程进行仿真。实验与仿真结果比较吻合,表明本文提出的永磁接触器位移分段PWM控制策略与仿真方法是有效的。

1 智能化控制原理和位移分段控制策略

1.1 智能化控制原理分析

永磁接触器不同于传统电磁式接触器,当外部工作电源断电时,必须提供瞬间的分闸电流来实现分闸。现有的控制方法均采用线圈串联电容的方式^[4-8],线圈电流的大小主要取决于电容大小、线圈匝数和线径。表1给出了电容、线圈参数变化对接触器吸合过程影响的定性分析,其中 I 为线圈电流, NI 为安匝数, F_x 为合闸吸力, η_c 为吸合可靠性。然而,在线圈窗口面积限定的情况下,串联方式下的吸合脉冲电流受限于串联电容的容量,随着接触器电流等级的增大,行程增加,需要增大容量以延长电流衰减时间,保证接触器的可靠吸合。这样就造成电容和整个机构的体积增大,若电容容量选取不当,接触器会出现不吸合现象,可靠性降低。此

表1 永磁接触器参数变化对吸合过程的影响

Tab. 1 Impact of parameters change on closing process		I	NI	F_x	η_c
固定参数	变化参数				
电容线圈	线径变大	大	大	大	高
	线径变小	小	小	小	低
电容线圈	匝数变多	小	大	大	高
	匝数变少	大	小	小	低
线圈匝数	电容变大	大	大	大	高
	线径	小	小	小	低

外电容容量的增大,提高了分闸实际需要的磁动势和分闸力,使运动机构与外壳发生剧烈碰撞,降低了接触器的工作寿命。

基于以上分析,本文提出了如图1所示的永磁接触器智能化控制原理框图,引入微处理器、充电电池控制模块、合闸瞬间导通模块和分合闸操作模块等,实现了永磁接触器的智能化动态控制。储能电容、线圈和分闸操作模块构成分闸主回路,接触器正常工作时,开关电源对电池充电;当断电检测电路检测到外部控制电源断电时,充电电池控制模块投入工作,为微处理器和分闸操作模块提供可靠的工作电源,以保证其可靠分断。可控开关2与储能电容并联,接触器吸合时,可控开关2导通,合闸操作模块、线圈、合闸瞬间导通模块构成合闸主回路;吸合后,可控开关2关断,外部控制电源通过线圈对储能电容充电;其电压检测电路精确控制储能电容上的充电电压,缩短了充电时间并减小了分闸电容量,可提高永磁接触器的开关频率和机械寿命。该智能化控制原理增强了永磁接触器的吸合能力,减小了储能电容的容量和体积,提高了工作可靠性。

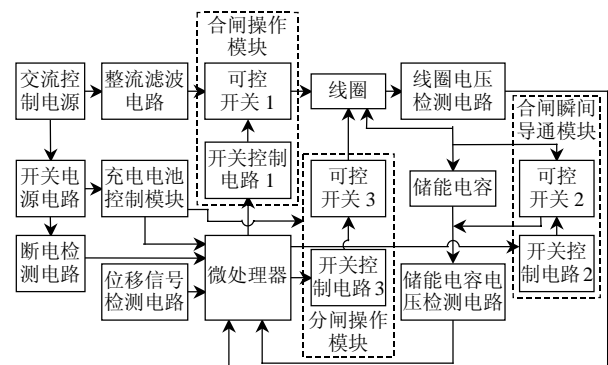


图1 永磁接触器智能化控制原理框图

Fig. 1 Intelligent control principle of PM contactor

1.2 吸合过程位移分段PWM控制策略

图2中给出了140A永磁接触器在无线圈电流的情况下,其永磁吸力与反力的关系。可以看出,在吸合运动过程中,随着位移的减小,永磁吸力显著增加,电磁吸力和永磁吸力两部分作用力使吸力裕度较大,导致动、静触头和动铁心碰撞速度过快,碰撞能量过大,从而使触头产生一、二次弹跳,会严重影响工作于AC3使用类别(笼型感应电动机的起动、运转中分断)下接触器的电气和机械寿命。

基于此,本文提出了永磁接触器吸合过程中位移分段的智能控制策略,根据位移分成5段逐段控制。在不同位移区域施加不同占空比的PWM控制

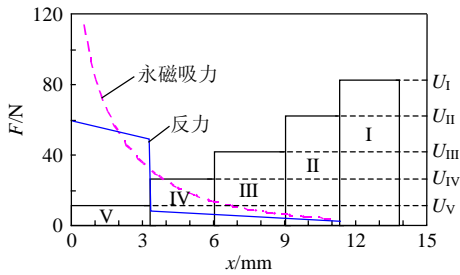


图 2 永磁接触器智能化控制策略图

Fig. 2 Intelligent control strategy of PM contactor

电压，不断调整电磁吸力，逐渐减小吸力裕度，使永磁接触器在吸合过程中的动态吸力和反力达到良好配合，降低动触头和动铁心的运动速度，减少触头一、二次弹跳。

本文采用电感式位移传感器与线圈电压检测电路实时检测动铁心的位移信号和线圈电压，在不同区段调整PWM占空比来控制线圈电压，使吸合过程中吸力裕度逐渐减小。如图 2 所示，在区段I，即触动阶段，施加最大占空比的PWM控制电压 U_I 产生大的电磁吸力，减小触动时间；在区段II，即加速阶段，施加较宽占空比的电压 U_{II} ，使动铁心获得较大的加速度，减小其吸合时间；在区段III，即过渡阶段，减小PWM的占空比，减小动铁心的加速度；在区段IV，即动静触头接触区域，进一步减小占空比，控制动静触头接触瞬间的速度，可有效减少接触器的一次弹跳；在区段V，即超行程阶段，施加最小占空比的电压 U_V ，使动铁心减速运动，依靠永磁吸力和惯性力完成吸合，可以有效降低动静铁心的碰撞能量，减少接触器的二次弹跳，提高其使用寿命。各段的占空比依据实验优化确定。

2 PWM 控制下吸合过程的动态特性研究

2.1 吸合过程中的动态特性方程

永磁接触器主电路原理图如图 3 所示，其中 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 为可控型功率开关MOSFET。当 Q_1 、 Q_2 闭合， Q_3 断开时，线圈 L 产生正向电流，接触器向吸合方向运动。 Q_2 并联在储能电容 C_1 两端，起合闸瞬间导通作用。当接触器吸合后， Q_2 关断，

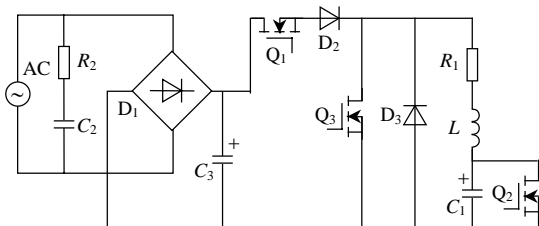


图 3 永磁接触器主电路原理图

Fig. 3 Main circuit principle of PM contactor

电源通过电阻 R_1 、线圈 L 向储能电容 C_1 充电，为分闸做好储能。当 Q_1 、 Q_2 断开， Q_3 闭合，储能电容 C_1 通过线圈 L 放电，线圈 L 中流过反向电流，接触器实现分闸。

由图 3 可知，永磁接触器的吸合过程，在电路方面遵循电压平衡方程，在机械方面满足达朗贝尔机械运动方程。由于智能控制时采用 PWM 电压驱动，因此，在吸合过程中，线圈两端为有驱动电压和无驱动电压相互交替。据此可得到永磁接触器在位移分段智能化控制下吸合过程的动态特性方程。当控制电压在 PWM 脉冲下处于高电平时的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = U - i(\psi, x)R_1 \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_m(\psi, x) - F_f(x)}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \psi|_{t=0} = \psi_0, v|_{t=0} = 0, x|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

当控制电压在 PWM 脉冲下处于低电平时，相应的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = -i(\psi, x)R_1 \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_m(\psi, x) - F_f(x)}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \psi|_{t=t_1} = \psi_{t_1}, v|_{t=t_1} = v_{t_1}, x|_{t=t_1} = x_{t_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中： U 为线圈直流控制电压； R_1 为线圈电阻； i 为线圈电流； ψ 为线圈磁链； m 为可运动部分的质量； v 为动铁心吸合速度； F_m 为电磁和永磁共同产生的吸力； F_f 为弹簧反力； x 为动铁心的位移。

对于式(1)、(2)，简单的根据初值和递推式求解是不可能的。为此，本文采用有限元分析方法，考虑铁磁材料的非线性，计算了永磁接触器在不同铁心位移 x 和不同线圈电流 i 下，磁链 $\psi(x, i)$ 、吸力 $F(x, i)$ 的二维静态数据网格^[15]；采用 4 阶龙格-库塔法迭代求解式(1)、(2)，进行动态特性计算，首先利用二次插值和递推式求解动态方程组式(1)；将式(1)求解出的磁链、速度和位移，作为PWM控制下转换到低电平时刻的初始值，求解式(2)；通过迭代计算，便可仿真出永磁接触器吸合的整个动态特性过程。

2.2 仿真结果及实验分析

针对位移分段控制策略，施加了一组(0.8,0.4,0.3,0.2,0.1)的PWM脉冲占空比组合，来调节线圈电

压,对控制电压为 220 V 的 140 A 永磁接触器的吸合过程进行了动态仿真和实验研究。在实验过程中,利用电感式位移传感器和线圈电压检测电路,实时检测动铁心吸合过程中的位移和线圈电压信号。依据动铁心位移和线圈电压值,在对应的区段调整 PWM 输出信号,有效地调整了线圈电压和电流,进而控制了动触头和动铁心的吸合末速度。

图 4 为动铁心动态位移的仿真曲线和实验波形,两者吻合较好。实验中采用激光位移动态测试装置测量接触器的动态位移,其精度为 0.000 1 mm。从图中可看出动铁心吸合运动时间为 20.3 ms。图 4 还给出了动铁心吸合速度的仿真曲线,仿真得到的动铁心吸合末速度为 1.01 m/s。为了验证计算的准确性,本文采用如下方法测量动铁心的吸合末速度。利用激光位移测试装置测量永磁接触器吸合过程的动态位移变化,0.5 s 内测量了 2500 个点,并利用曲线拟合和微分计算的方法获得接触器运动过程中动铁心及动触头的吸合速度,实验所测试动铁心吸合末速度为 0.97 m/s,与仿真结果基本一致。

图 5 为在位移分段 PWM 控制下的线圈电流仿真曲线和实验波形,仿真与实验结果基本吻合。

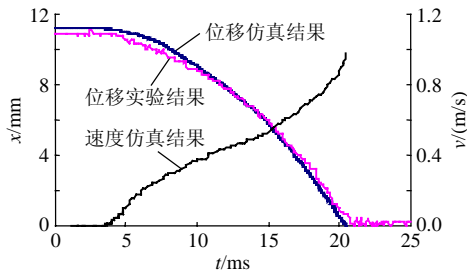


图 4 位移、速度的仿真和实验结果

Fig. 4 Simulation and experimental results of displacement and velocity

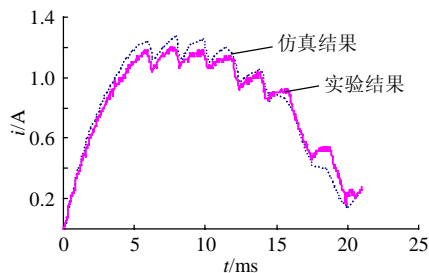


图 5 线圈电流仿真和实验结果

Fig. 5 Simulation and experimental results of coil current

2.3 位移分段控制下不同 PWM 占空比对动态特性的影响

在保证永磁接触器可靠吸合的前提下,综合测试了各种位移分段 PWM 控制方案后,给定如表 2

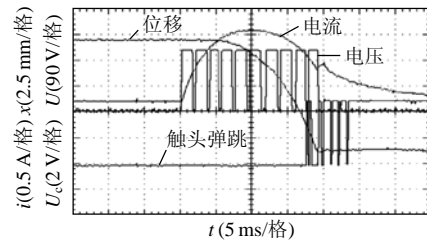
表 2 位移分段 PWM 控制方案

Tab. 2 PWM control scheme of displacement subsection

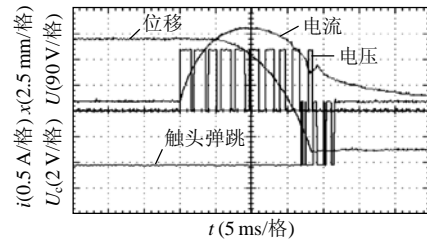
方案	T/ms	α_I	α_{II}	α_{III}	α_{IV}	α_V
1	2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
2	2	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
3	2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2
4	2	0.8	0.4	0.3	0.2	0.1

所示的 4 种典型的 PWM 占空比组合。其中, T 为 PWM 周期, $\alpha_I \sim \alpha_V$ 分别为位移分段区域的占空比。实验观察了吸合时间、触头弹跳、线圈电流、动触头和动铁心的吸合末速度变化情况。实验时触头弹跳采用以 5 V 直流电压将电阻与接触器触头串联,通过测量电阻两端电压的变化得到吸合过程中触头发生振动的情况。

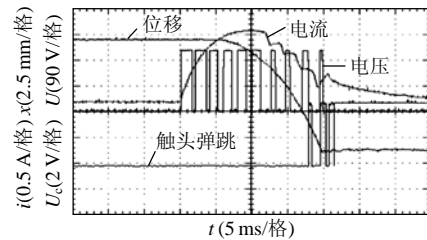
4 种不同 PWM 占空比控制方案下,在接触器的吸合过程中,动铁心位移 x 、触头弹跳 U_c 、线圈电流 i 和 PWM 控制电压 U 的实验波形如图 6 所示。



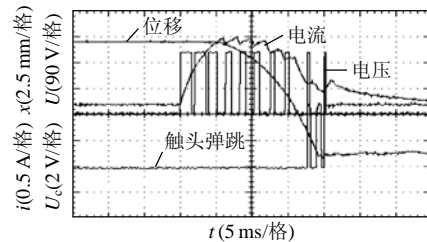
(a) 方案 1 实验波形



(b) 方案 2 实验波形



(c) 方案 3 实验波形



(d) 方案 4 实验波形

图 6 4 种 PWM 占空比组合下实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of four PWM schemes

每种控制方案经过 20 次实验得到永磁接触器吸合时间 $t_{吸}$ 、触头弹跳时间 $t_{弹}$ 、触头弹跳次数 $n_{弹}$ 、线圈激磁电流时间 $t_{i_{激磁}}$ 、线圈激磁电压时间 $t_{u_{激磁}}$ 、动触头的吸合末速度 $v_{触末}$ 和动铁心的吸合末速度 $v_{动末}$ ，各取平均值，测试结果列于表 3。

表 3 4 种位移分段 PWM 控制方案下参数测试结果
Tab. 3 Test results under four PWM control schemes of displacement subsection

方案	$t_{吸}/ms$	$t_{弹}/ms$	$n_{弹}$	$t_{i_{激磁}}/ms$	$t_{u_{激磁}}/ms$	$v_{触末}/(m/s)$	$v_{动末}/(m/s)$
1	23.2	5.9	6.3	41.5	19.2	1.25	1.65
2	21.5	4.9	5.4	40.2	19.5	1.06	1.49
3	21.3	3.8	3.2	38.6	20.1	0.82	1.26
4	20.2	2.2	1.9	36.7	20.2	0.69	0.98

由表 3 可见，方案 1 的动触头、动铁心吸合末速度最大，触头一、二次弹跳最激烈，极易产生严重的拉弧；方案 2 触头弹跳有所改善；方案 3 触头弹跳和动铁心吸合末速度有明显降低；方案 4 触头弹跳时间最短，弹跳次数最少，动铁心与动触头吸合末速度达到最小，使触头一、二次弹跳得到显著改善。从表 3 可以看出，接触器吸合过程在位移分段控制策略下，通过控制 PWM 占空比依次减小，有效地控制了线圈电流，从而降低了动铁心和动触头的吸合末速度，使触头一、二次弹跳大幅度减少。

本文将以永磁接触器可靠吸合为约束条件，以动铁心吸合末速度和动触头吸合末速度最低为目标，通过动态特性计算，寻找最佳 PWM 组合方案。在上述实验中，方案 4 为较优的占空比组合，以此为基础，在程序中逐段调整占空比组合。当占空比组合可使永磁接触器可靠吸合，且动铁心和动触头末速度最低，即为最佳占空比组合。

在额定工作电压的 70%~115% 范围内，优化了 5 种工作电压下永磁接触器的位移分段最佳 PWM 占空比组合，如表 4 所示。

根据表 4 测量了最佳占空比组合的智能控制方案和无 PWM 智能控制方案下，动触头吸合末速度、动铁心吸合末速度和触头弹跳时间，每种电压下测量 20 次，各取平均值，测量结果如表 5 所示。

由表 5 可见，在位移分段 PWM 控制下永磁接

表 4 5 种工作电压下的最佳占空比组合
Tab. 4 Optimum duty ratio combination under five operating voltage

工作电压 u/V	α_I	α_{II}	α_{III}	α_{IV}	α_V
160	0.65	0.41	0.34	0.28	0.14
180	0.61	0.36	0.30	0.24	0.12
200	0.55	0.33	0.27	0.22	0.11
220	0.50	0.30	0.25	0.20	0.10
240	0.45	0.27	0.22	0.18	0.09

表 5 有无 PWM 智能控制方案对比

Tab. 5 Comparison of intelligent control schemes with and without PWM

工作电压 u/V	$v_{触末}/(m/s)$		$v_{动末}/(m/s)$		$t_{弹}/ms$	
	智能	无智能	智能	无智能	智能	无智能
160	0.37	0.86	0.65	1.13	1.87	3.60
180	0.38	1.05	0.66	1.46	1.88	4.90
200	0.40	1.26	0.68	1.68	1.90	5.90
220	0.41	1.45	0.68	1.93	1.91	6.20
240	0.43	1.62	0.71	2.16	1.92	6.90

触器能够在额定工作电压的 70%~115% 范围内具有相同的动态特性，在 PWM 控制下动触头与动铁心吸合末速度显著降低，接触器的一、二次弹跳变化甚微；而在无 PWM 智能控制方案下，随着工作电压的增大，触头弹跳明显增加。

图 7 为控制电压为 200 V，在位移分段的 PWM 最佳占空比组合方案和不采用 PWM 智能控制下的触头弹跳实验波形。可以看出，采用位移分段 PWM 控制实现了对吸合过程触头弹跳的有效控制，减少了触头一、二次弹跳。

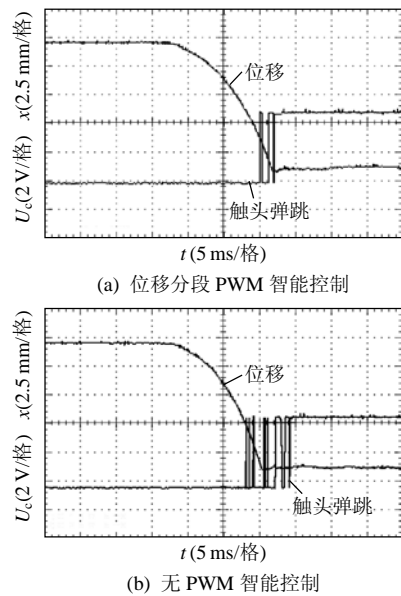


图 7 有无 PWM 智能控制触头弹跳波形

Fig. 7 Contact bounce waveforms of intelligent control with and without PWM

3 结论

本文在分析永磁接触器的智能化控制原理及吸合特性的基础上，提出了位移分段的 PWM 控制策略。建立了位移分段 PWM 控制下吸合过程的动态特性方程，采用有限元方法，利用龙格-库塔法仿真了永磁接触器的整个动态吸合过程。仿真和实验结果比较吻合，验证了该控制策略的有效性。实验分析了位移分段下，不同 PWM 占空比控制方案对吸合

过程的动态特性影响, 4种不同区段占空比控制方案下触头弹跳时间最大相差 3.7 ms, 动触头的吸合末速度最大相差 0.56 m/s, 动铁心吸合末速度相差 0.67 m/s。实验验证了在位移分段的控制策略下逐段降低PWM占空比的智能控制方法, 可控制线圈电流, 对减少触头一、二次弹跳, 进而提高永磁接触器在动态吸合过程中的电气和机械寿命是有效的。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 娄建勇, 荣命哲, 邹洪超, 等. 单线圈单稳态永磁式接触器机构动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 120-124.
Lou Jianyong, Rong Mingzhe, Zou Hongchao, et al. Simulation on mechanism dynamic characteristics of single coil and single stable position contactor with permanent magnet[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 120-124(in Chinese).
- [3] Rong Mingzhe, Lou Jianyang, Liu Yiyang, et al. Static and dynamic analysis for contactor with a new type of permanent magnet actuator[J]. IEICE Trans. on Electronics, 2006, 89(8): 1210-1216.
- [4] 房淑华, 林鹤云, 蔡彬, 等. 永磁接触器磁场有限元分析及控制单元设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 162-166.
Fang Shuhua, Lin Heyun, Cai Bin, et al. Finite element magnetic field analysis and control unit design of permanent magnet contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 162-166(in Chinese).
- [5] 房淑华, 林鹤云, 蔡彬, 等. 永磁接触器合闸过程的动态仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 45-50.
Fang Shuhua, Lin Heyun, Cai Bin, et al. Dynamic simulation and experiment for making process of permanent magnet contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 45-50(in Chinese).
- [6] Chien T C. Towards the control of a permanent magnet contactor based on charging and recharging techniques[J]. WSEAS Trans. on Electronics, 2008, 7(5): 323-333.
- [7] Chien T C. A high performance AC permanent magnet contactor[J]. WSEAS Trans. on Electronics, 2008, 7(5): 313-322.
- [8] Chien T C. Design and implementation of a new permanent magnet AC contactor with colenoid actuator[J]. WSEAS Trans. on Circuits and Systems, 2008, 11(7): 942-954.
- [9] dos Santos Dias de Moraes Paulo Mario, Perin Arnaldo Jose. An electronic control unit for reducing contact bounce in electromagnetic contactors[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2008, 55(2): 861-870.
- [10] 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).
- [11] 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]. 46th IEEE Holm Conference, Chicago, IL, USA, 2000.
- [12] Espinosa A G, Ruiz J R R, Morera X A. A sensorless method for controlling the closure of a contactor[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2007, 43(10): 3896-3903.
- [13] 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).
- [14] 王振兴, 耿英三, 戴鹏程, 等. 基于专用集成电路的智能交流接触器[J]. 低压电器, 2007(19): 18-21.
Wang Zhenxing, Geng Yingsan, Dai Pengcheng, et al. Intelligent AC contactor based on special integrated circuit[J]. Low Voltage Apparatus, 2007(19): 18-21(in Chinese).
- [15] 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.
Ling Xingwen, Chen Degui, Sun Zhiqiang, et al. Numerical analysis and experimental investigation of dynamic behavior and contact bounce of AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 229-233(in Chinese).



汪先兵

收稿日期: 2009-10-20。

作者简介:

汪先兵(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能化电器设计仿真与控制, seueclab_wxb@163.com;

林鹤云(1965—), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电机电器、电机电磁场等, hyling@seu.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)