

低压电动机热过载保护装置的研究与设计

张天鹏¹, 翟亚芳¹, 郝申军²

(1. 安阳工学院电子信息与电气工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 以低压电动机热过载保护为研究对象, 在分析热过载保护的电流反时限特性模型和热积累模型的基础上, 介绍了一种热过载保护装置的设计方法。主要对保护装置的总体结构、部分硬件电路设计和保护算法设计进行了分析, 并给出了保护装置的部分测试和检验结果。实验表明, 该保护装置具有较高的检测精度, 完全能够满足低压电动机热过载保护的需要。

关键词: 低压电动机; 热过载; 电流反时限特性; 热积累; 保护装置

Research and design for low voltage motor thermal overload protection device

ZHANG Tianpeng¹, ZHAI Yafang¹, HAO Shenjun²

(1. School of Electronic Information & Electrical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the analysis of the current inverse-time characteristic model and the heat accumulation model, a thermal overload protection device is presented considering the low voltage motor thermal overload protection. The overall structure, hardware design and protection algorithm are analyzed, and the results of testing and inspection are given. The experiments show that the protection device has higher detection accuracy, thus it is able to fully meet the low voltage motor thermal overload protection needs.

Key words: low voltage motor; thermal overload; current inverse-time characteristic; heat accumulation; protection device

中图分类号: TM32; TM774

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)13-0125-05

0 引言

随着国民经济的快速发展, 低压异步电动机作为最主要的低压动力设备之一, 被广泛地应用在生产生活中的许多领域。电动机在运行过程中, 经常遇到堵转、过负荷、缺相、短路、三相不平衡等故障, 导致电动机电流过大, 内部温度升高, 电动机的温升可能超过最大允许温升, 引起电动机的热过载。热过载发生时, 会引起电动机定子绝缘老化, 缩短电动机的使用寿命, 甚至造成电动机的烧毁, 引发生产事故, 因此, 需要对电动机的热过载进行保护, 使电动机能够安全运行。

1 电动机热过载保护模型

1.1 基于电流反时限特性的热过载保护

电动机过载时会导致电动机过热, 但其低倍过载又允许一定的时限, 所以电动机的过载特性具有

反时限特性。传统的电动机热过载保护就是利用电流反时限特性来实现的。根据国际电工委员会标准(IEC255-3)和英国标准规范(BS142)的规定, 一般采用下面几种标准反时限特性曲线^[1]。

一般反时限特性曲线为

$$t = \frac{0.14T_p}{(I/I_p)^{0.02} - 1} \quad (1)$$

非常反时限特性曲线为

$$t = \frac{13.5T_p}{(I/I_p) - 1} \quad (2)$$

极端反时限特性曲线为

$$t = \frac{80T_p}{(I/I_p)^2 - 1} \quad (3)$$

其中: t 为反时限保护动作时间; I 为采样电流值; I_p 为反时限保护基准电流整定值; T_p 为反时限保护时间常数整定值。

基于电流反时限特性的热过载保护一般采用查

表法, 运算简单, 容易实现, 在电动机电流超过基准电流整定值时进行延时保护。该保护模型可以与不同的电动机进行匹配, 满足不同应用场合的保护要求, 但该模型只考虑发热, 而未考虑散热条件的变化以及电动机的热积累。

1.2 基于热积累模型的热过载保护

在电动机热积累模型中, 假定电动机是一个均质物体, 只计算平均温升。根据热平衡原理, 电动机运行过程中产生的热量等于电动机温度升高吸收的热量和电动机向周围介质散发的热量之和, 假定在 t 时刻电动机的热功率为 $p(t)$, 电动机定子绕组的温升为 $\theta(t)$, 则电动机定子绕组热平衡微分方程为

$$p(t)dt = cGd\theta + \alpha S\theta(t)dt \quad (4)$$

式中: $p(t)dt$ 为电动机在 dt 时间内的总发热量; $cGd\theta$ 为电动机温度升高 $d\theta$ 所吸收的热量, c 为电动机的比热容, G 为电动机重量; $\alpha S\theta(t)dt$ 为电动机在 dt 时间内的散热量, α 为电动机散热系数, S 为电动机散热面积^[2]。该微分方程的解为

$$\theta(t) = \theta_w(1 - e^{-t/T}) - \theta_0 e^{-t/T} \quad (5)$$

式中: θ_w 为电动机定子绕组的稳定温升, $\theta_w = p(t)/\alpha S$; θ_0 为电动机定子绕组的初始温升; T 为电动机的热时间常数, $T = cG/\alpha S$ 。

假设 θ_m 为电动机的最大允许温升, θ_i 为电动机定子绕组在 Δt_i 时间内的温升, 且在 Δt_i 时间内电动机电流保持不变, 即具有相同的稳定温升 θ_w , 则

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_w(1 - e^{-\Delta t_1/T}) - \theta_0 e^{-\Delta t_1/T} \\ \theta_2 = \theta_w(1 - e^{-\Delta t_2/T}) - \theta_1 e^{-\Delta t_2/T} \\ \vdots \\ \theta_n = \theta_w(1 - e^{-\Delta t_n/T}) - \theta_{n-1} e^{-\Delta t_n/T} \end{cases} \quad (6)$$

当 $\theta_n \geq \theta_m$ 时, 电动机温升超过最大允许温升, 此时电动机保护装置动作, 保护延时时间为

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n \quad (7)$$

基于热积累的热过载保护在考虑电动机定子绕组发热的同时, 也考虑了电动机向周围介质的散热, 完全可以用来描述电动机运行过程中温升的真实变化过程。

2 电动机热过载保护装置的设计方案

2.1 硬件电路设计

2.1.1 硬件电路的总体设计

电动机热过载保护装置硬件电路采用富士通 Cortex-M3 家族的 32 位处理器 MB9BF618S 作为核心处理器, 完成信号采集、参数配置、数据处理、保护判断、数据通信等功能。MB9BF618S 的时钟

频率最高可达 144 MHz, 内部集成有 128 KB 的 SRAM 和 1 024 KB 的 FLASH ROM, 含有 8 个支持 UATR、I²C、SPI 等功能的通信接口, 含有 24 通道 12 位 A/D 转换器, 含有 16 个基本定时器和 3 个多功能定时器, 集成有 2 路以太网控制器^[3]。硬件电路设计采用模块化设计思想, 主要包括交流信号输入模块、开关量输入模块、继电器输出模块、数据通信模块和人机交互模块, 其总体结构框图如图 1 所示^[4-6]。

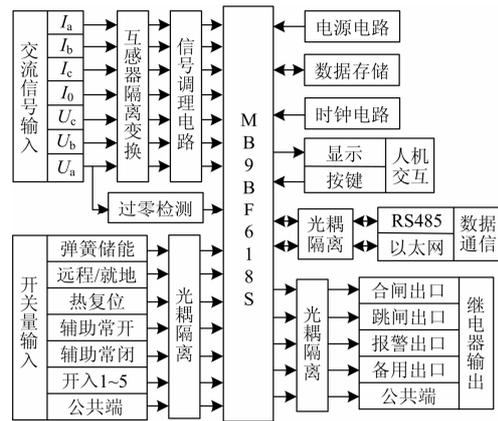


图 1 硬件电路设计的总体结构框图

Fig. 1 Structure of the hardware circuit design

2.1.2 交流信号输入电路设计

交流信号输入电路主要由互感器隔离变换电路和信号调理电路构成。在设计电路时, 三相输入电流使用变比为 100 A/7.07 V(有效值)的电流互感器, 零序电流使用变比为 20 A/7.07 V 的电流互感器, 三相输入电压使用变比为 120 V/7.07 V 的电压互感器, 利用互感器可以将输入的电流和电压信号转变成幅值为 10 V 的交流信号, 并起强电和弱电隔离作用^[7]。

信号调理电路的作用是将互感器输出的交流信号转变为 0~5 V 的单极性电压信号, 供 MB9BF618S 内置 A/D 转换器使用。所设计的信号调理电路如图 2 所示, 图中 AIN 表示互感器的输出信号, 6.32 kΩ 和 1 kΩ 构成分压电路, 将 -10~10 V 的交流信号变为 -1.4~1.4 V 的交流信号, 然后经过由精密运算放大器 TLC4502 构成电压跟随器、加法运算、反比例运算后, 变为 0.1~2.9 V 的单极性信号, 最后经过由 750 Ω 电阻和 100 nF 电容构成低通滤波电路送至 MB9BF618S 内置 A/D 转换器的输入端。

2.1.3 开关量输入电路设计

开关量输入电路设计如图 3 所示, 图中的 DIN 是开关量输入端子, DIC 是开关量输入公共端, DIO 是开关量输入的输出端。当 DIN 端有开关量信号(交

流 220 V)输入时, 输入信号经过限流、整流、滤波后送至光电耦合器 TLP185GB 的输入端, TLP185GB 导通, 输出端 DIO 变为低电平, 通知微处理器有外部开关量输入。

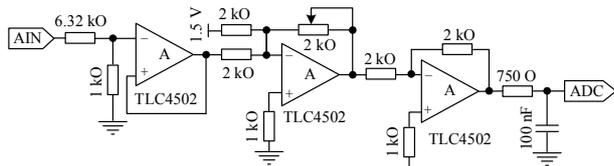


图 2 输入信号调理电路

Fig. 2 Input signal modulate circuit

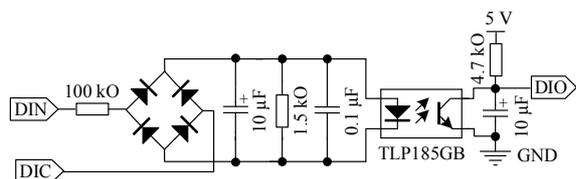


图 3 开关量输入电路

Fig. 3 Switch signal input circuit

2.1.4 继电器输出电路设计

继电器输出电路包括合闸出口、跳闸出口、报警出口和备用出口, 其中备用出口不影响正常的合闸信号、跳闸信号和告警信号, 可以对合闸、跳闸或告警进行出口扩展。继电器输出电路设计如图 4 所示, 图中的 DO 是继电器输出控制端子, 当 DO 为低电平时, TLP185GB 导通, 在直流电源的作用下, 三极管 MMBT5551 导通, 继电器线圈得电, 继电器开关动作^[8]。

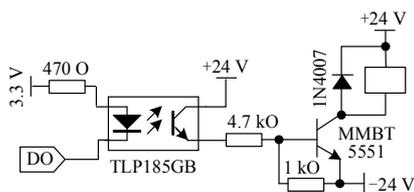


图 4 继电器输出电路

Fig. 4 Relay output circuit

2.1.5 通信接口电路设计

通信接口电路包括 2 路以太网接口和 2 路 RS485 总线接口, 用于与后台监控中心进行联网通信, 实现对输入开关量状态、保护定值参数设置、继电器输出状态等信息的远程监控和管理^[9]。由于 MB9BF618S 集成有 2 路以太网控制器, 设计电路时只需外加物理层(PHY)芯片及简单外围电路就可以组成以太网通信电路, 物理层芯片选用美国国家半导体公司生产的 DP83849ID 双端收发器实现。RS485 总线接口电路使用差分数据收发器 SN65LBC184D 实现。

2.2 保护算法设计

2.2.1 反时限保护算法

反时限保护算法按照式(1)~式(3)计算, 用户可以根据实际使用情况选择不同的反时限特性, 电流采样值 I 按照全波傅里叶变换算法(全波傅氏算法)进行计算^[10-12]。全波傅氏算法的基本原理是将周期性信号分解为正弦分量和余弦分量, 假设被采样的周期性电流信号按照傅里叶级数可以分解为

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t \quad (8)$$

式中: I_{mn} 为各次谐波分量的幅值; a_n 和 b_n 分别为各次谐波余弦分量和正弦分量的幅值。根据傅里叶级数原理, 并进行离散化处理, 得到各次谐波的实部 I_m 和虚部 I_{jn} 为

$$\begin{cases} I_m = a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cos(nk \cdot \frac{2\pi}{N}) \\ I_{jn} = b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \sin(nk \cdot \frac{2\pi}{N}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, N 为每个周期的采样点数, 在设计时 $N=64$ 。各次谐波分量的有效值为

$$I_n = \sqrt{\frac{I_m^2}{2} + \frac{I_{jn}^2}{2}} \quad (10)$$

由此可以得到电流采样值 I 为

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (11)$$

2.2.2 热积累保护算法

在热积累保护模型中, 电动机定子绕组的稳定温升 θ_w 与电动机的热功率 $p(t)$ 成正比, 而 $p(t)$ 与电流 I^2 有关。当电动机发生不对称故障时, 定子绕组电流按照对称分量法可以分为正序分量、负序分量和零序分量, 具有相同幅值的正序电流 I_+ 和负序电流 I_- 在电动机内部产生的热量并不相同。为了反映正序电流和负序电流的不同发热效应, 英国 GEC 公司提出了“等效电流”的概念, 即

$$I_{eq} = \sqrt{K_1 \cdot I_+^2 + K_2 \cdot I_-^2} \quad (12)$$

式中: I_{eq} 为等效电流; K_1 为正序电流发热系数; K_2 为负序电流发热系数。 K_1 在电动机启动过程中取值 0.5(用以避开正常的启动电流), 在电动机启动结束后取值 1.0; K_2 取值为 3~10, 一般取值为 6。

在热积累保护算法中, 当电动机发生不对称热过载时, 用等效电流 I_{eq} 来代替定子绕组电流 I , 在电动机处于冷态情况下(热积累为 0)时, 根据经验, 热过载保护的动作为

$$t_d = \frac{T}{(I_{eq}/I_e)^2 - 1.05^2} \quad (13)$$

式中： t_d 为热过载保护的動作时间； T 为电动机热时间常数； I_{eq} 为等效发热电流； I_e 为电动机二次侧额定电流^[13]。

按照式(13)进行的热过载保护具有热积累记忆功能，当电动机因过热保护动作跳闸后，不能立即再次启动，需要等到热积累量减少到允许再启动整定值时才能再次启动。如果需要紧急启动，可以通过过热复位开关量输入强行把热积累值清零。

3 热过载保护的测试数据

按照国家标准 GB/T 7261-2008 继电保护和全自动装置基本试验方法和 GB/T 10736-2007 低压电动机保护器中的相关试验方法和要求，对所设计的低压电动机热过载保护装置进行了测试。基于电流反时限特性的热过载保护测试结果如表 1 所示，基于热积累模型的热过载保护测试结果如表 2 所示，从测试结果中可以看出，测试误差不超过理论值的 5%，能够满足相关的技术要求。

表 1 电流反时限模型测试数据

Table 1 Test results of current inverse-time model

特性曲线	施加电流	理论值	测试结果	误差
$t = \frac{0.14T_p}{(I/I_p)^{0.02} - 1}$ $I_p=20\text{ A}$ $T_p=50\text{ ms}$	30 A	859.7 ms	885.0 ms	2.94%
	40 A	501.5 ms	525.0 ms	4.69%
	50 A	378.5 ms	395.5 ms	4.49%
	60 A	315.1 ms	329.8 ms	4.67%
$t = \frac{13.5T_p}{(I/I_p) - 1}$ $I_p=5\text{ A}$ $T_p=10\text{ s}$	7.5 A	270.00 s	270.44 s	0.16%
	10 A	135.00 s	135.08 s	0.06%
	20 A	45.00 s	45.02 s	0.04%
	40 A	19.29 s	19.31 s	0.10%
$t = \frac{80T_p}{(I/I_p)^2 - 1}$ $I_p=0.5\text{ A}$ $T_p=1\text{ s}$	0.75 A	64.00 s	65.08 s	1.69%
	1 A	26.67 s	26.96 s	1.09%
	2 A	5.33 s	5.37 s	0.75%
	4 A	1.27 s	1.29 s	1.57%

表 2 热积累模型测试数据

Table 2 Test results of heat accumulation model

整定值	I_{eq}/I_e	理论值	测试结果	误差
$K_1=0.5$ $K_2=3$ $I_e=5\text{ A}$ $T=1\text{ min}$	1.5	52.29 s	53.28 s	1.89%
	2	20.71 s	20.97 s	1.26%
	3	7.60 s	7.70 s	1.32%
	5	2.51 s	2.59 s	3.19%
$K_1=1.0$ $K_2=3$ $I_e=5\text{ A}$ $T=1\text{ min}$	1.5	52.24 s	53.10 s	1.65%
	2	20.71 s	20.93 s	1.06%
	3	7.60 s	7.68 s	1.05%
	5	2.51 s	2.55 s	1.59%
$K_1=1$ $K_2=6$ $I_e=5\text{ A}$ $T=2\text{ min}$	1.5	104.58 s	106.22 s	1.57%
	2	41.42 s	41.87 s	1.09%
	3	15.19 s	15.33 s	0.92%
	5	5.02 s	5.08 s	1.20%

4 结论

本文根据低压异步电动机工作时的发热特性设计了一种热过载保护装置，该保护装置提供了基于电流反时限特性和基于热积累模型的两种保护方案，用户可以根据实际需要进行选择。该保护装置除了具有热过载保护功能外，还具有启动超时保护、堵转保护、负序过流保护、低电压保护和高电压保护等功能，能够满足低压异步电动机在运行过程中对保护的要求，具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 李爱平, 余闯, 徐立云, 等. 低压电动机反时限过流保护算法及其实现的研究[J]. 中国工程机械学报, 2011, 9(3): 262-266.
- [2] 迟长春, 李奎, 岳大伟. 基于热积累过载保护算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 52-56.
- [3] 翟亚芳, 吴战伟, 秦长海. 风电场箱式升压变压器低压侧微机保护装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 136-140.
- [4] 翟亚芳, 张天鹏, 杨云鹏, 等. 并网光伏电站升压变压器低压侧测控装置[J]. 仪表技术与传感器, 2014(1): 30-33.
- [5] 刘东超, 王开宇, 胡绍刚, 等. 基于数字化变电站的集中式保护[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 117-121.
- [6] 赵泽生, 张向前, 赵磊, 等. 基于 MSP430 单片机的制动单元设计[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 65-68.

- ZHAO Zesheng, ZHANG Xiangqian, ZHAO Lei, et al. Design of brake unit based on MSP430[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 65-68.
- [7] 赵波, 胡景泰, 黄文涛. ARD3T 智能电动机保护器主体和测量模块设计原理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 136-140.
- ZHAO Bo, HU Jingtai, HUANG Wentao. The design principle of ARD3T motor protector and measurement modules[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 136-140.
- [8] 孟艳清, 赵宏伟, 邹育霖. 基于 ARM 的开关柜智能监控装置研究[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 29-35.
- MENG Yanqing, ZHAO Hongwei, ZOU Yulin. Research of the smart monitoring control device for switchboard based on ARM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 29-35.
- [9] 郭强. 智能型电动机保护器特性介绍及应用[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(5): 59-61.
- GUO Qiang. Characteristic of intelligent motor protection and its application[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(5): 59-61.
- [10] 罗蛟, 江亚群, 黄纯, 等. 基于 DRSC 窗递推 DFT 算法的电力谐波检测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 47-53.
- LUO Jiao, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Power system harmonic parameters estimation based on recursive DFT algorithm with DRSC window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 47-53.
- [11] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.
- WEN He, TENG Zhaosheng, WANG Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277.
- [12] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
- ZHANG Peng, LI Hongbin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [13] 刘洪星, 翟亚芳, 吴战伟. 低压三相电动机多功能保护装置的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 100-106.
- LIU Hongxing, ZHAI Yafang, WU Zhanwei. Design and application of multifunctional protection device for the low-voltage three-phase motor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 100-106.

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2015-04-17

作者简介:

张天鹏(1980-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为微控制器及应用、电力系统自动化。E-mail: zhangtp80@163.com

(编辑 周金梅)