

# 电动机故障分析和综合保护配置

李璇华, 黄益庄, 唐晓泉, 张楠

(清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 通过对异步电动机各类故障特征的详细分析, 提出了以序分量为基本保护判据、结合热积累和热发散模型, 构成微机型电动机综合保护的方案。并以电动机热过负荷保护为重点, 深入探讨了保护方案的具体实现。以此方案设计成的保护装置已经通过动模实验, 证明了其正确性。

**关键词:** 电动机故障; 保护; 序分量; 过负荷

**中图分类号:** TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)12-0030-04

## 1 引言

异步电动机作为一种应用非常广泛的电气设备, 在主要由电动机、电源设备和控制装置构成的电气传动系统中, 占有重要的地位。由于电动机多处于高温、高湿、多灰尘的工作环境, 容易出现堵转、短路、断相、长期过负荷使绝缘受损等故障。因此, 如何针对各种易发故障建立整套保护, 确保电动机的安全、可靠运行, 一直是人们关注、研讨和开发的课题。

基于单片机的微机智能保护由于其快速的数据处理能力和逻辑判断能力, 能够实时反映电动机的运行特性, 并结合有效的故障判据, 实现新型的电动机综合保护。使用微机保护还能明显简化装置的硬件结构, 做到小型化和高集成度, 而且便于维护, 当要满足用户的不同需要或增加保护功能时, 只需对装置的软件进行修改即可。使用微机装置, 还可以实现与上位机和调节系统通信, 实现遥测、遥控以及自动调节负载, 有利于提高综合自动化水平。

## 2 电动机故障情况分析<sup>[1]</sup>

要设计一个保护装置, 首先要分析保护对象会遇到的各类故障, 分析其故障特征, 才能提出切实可行的保护方案。对于异步电动机来说, 其故障形式主要分为绕组损坏和轴承损坏两方面。造成绕组损坏的主要原因有:

(1) 由于电源电压太低使得电动机不能顺利启动, 或者短时间内重复启动, 使得电动机因长时间的大启动电流而过热。

(2) 长期受电、热、机械或化学作用, 使绕组绝缘老化和损坏, 形成相间或对地短路。

(3) 因机械故障造成电动机转子堵转。

(4) 三相电源电压不平衡或波动太大, 或者电动

机断相运行。

(5) 冷却系统故障或环境温度过高。

造成电动机轴承损坏的原因主要是机械负荷太大、润滑剂不合适, 或者恶劣的工作环境, 如多尘、腐蚀性气体等给轴承带来的损坏。

由于电动机的微机保护主要通过测量电量(电流、电压以及开关状态等)来监测电动机的运行状况, 因此面对的主要是绕组故障。

引起电动机绕组损坏的常见故障可分为对称故障和不对称故障两大类。对称故障主要有三相短路、堵转和对称过载等; 不对称故障主要有断相、三相不平衡和单相接地或相间短路。发生对称故障和严重的相间短路故障时, 例如因为各种原因, 如机械故障、负荷过大、电压过低等, 使电动机的转子处于堵转状态时, 由于散热条件差, 电流大, 特别容易烧坏电机。其它不出现显著过流的不对称故障, 例如断相、不平衡运行等, 过流保护常常不能及时动作。对于电动机的各类内部绕组故障, 如匝间短路、接地短路等, 往往是由于运行环境差、长期运行不当引起的, 故障最初并不引起显著的电流增大, 若不及时处理会导致事故扩大, 进而引起电动机机端过热、转子及起动力矩降低等一系列问题, 并严重损坏电动机。各种短路故障还会造成供电网络电压的显著降低, 破坏其它用电设备的正常工作。因此, 要可靠地保护电动机, 单一的过流保护是不够的, 必须配置全面的保护方案。

## 3 电动机综合保护分析

### 3.1 以序分量为基础的电流保护<sup>[2]</sup>

根据对称分量法, 发生不对称故障时, 电动机电流可分解为正序、负序和零序分量。当电动机三相对称时, 负序和零序电流为零, 而发生不对称故障时则会显著增加。因此可以在检测电动机过流程度的

同时,以序分量为基础,检测负序、零序电流的大小。这样,不但能更好地反应电动机的运行状况,还可以大大提高保护的灵敏度和可靠性。异步电动机常见故障的过流、负序和零序电流的分布情况如表 1 所示,表中单相故障设 A 相为故障相,二相故障设 B、C 相为故障相, $I_p$  表示故障前相电流幅值。

表 1 异步电动机常见故障信息分布表

故障类型		过电流	负序电流	零序电流	其它故障特征	设置保护类型		
对称故障	三相短路	$(8 \sim 10) I_p$	无	无	$I_a, I_b, I_c$	电流速断		
	堵转	$(5 \sim 7) I_p$	无	无	$I_a, I_b, I_c$	过流定时限		
	过载	$(1.2 \sim 5) I_p$	无	无	$I_a, I_b, I_c$	过流反时限		
不对称性故障	非接地	断相	$\sqrt{3}/2 I_p$	$1/2 I_p$	$I_a = 0$ $I_b = -I_c$	负序定时限		
		逆相	无	$I_p$	无		$I_a, I_b, I_c$	
		不平衡	无	有	无		$I_a, I_b, I_c$	
	相间短路	有	$1/\sqrt{3} I_b$	无	$I_b, I_c > I_a$			
	接地	单相接地	有	$1/3 I_a$	$1/3 I_a$		$I_a > I_b, I_c$	零序定时限
		二相接地	有	有(值的大小取决于位置)			$I_b, I_c > I_a$ $I_p$	

从表 1 中常见故障信息可知,若以过流信息反映短路和堵转故障,以负序和零序电流反映各类不对称短路和接地短路等不对称故障,可以实施全面的电流保护。具体方案如下:

(1) 设置电流速断保护作为电动机的主保护,用于电动机内部定子绕组以及进线所发生的相间短路故障。设置速断保护电流定值时,要保证电动机在满载启动过程中短路保护可靠地不动作,即躲过电动机最大启动电流。

(2) 设置堵转保护作为电动机运行过程中短路保护的后备保护。当保护装置在电机运行过程中检测到电流超过堵转电流整定值,并达到整定时限时,堵转保护动作,出口跳闸。堵转保护在电动机启动过程中闭锁,启动结束后自动投入。

(3) 设置过负荷保护来防止电动机长时间过负荷运行,定子部分过热而引起的损坏。过负荷保护的原理将在 2.2 节内详细说明。过负荷保护和速断保护、堵转保护互相配合,更符合电动机的实际过电流特性。三者之间的配合关系如图 1 所示。

(4) 针对电动机的各类非接地性不对称故障(如断相、逆相、三相不平衡和相间短路等),设置负序电流保护。在整定负序电流定值时,需要注意 1% 的电压不平衡会引起 6% 的电流不平衡。而实际供电电源总存在一定的不对称,即使在正常运行时,电动

机也会有一定的负序电流,所以整定时必须躲过这一不平衡因素。

(5) 针对各种接地性短路故障,设置零序电流保护。

另外,为防止由于各种原因使得电动机不能成功启动时,大启动电流对绕组的损坏以及启动转矩对轴承的损坏,可以设置电动机启动过长保护。

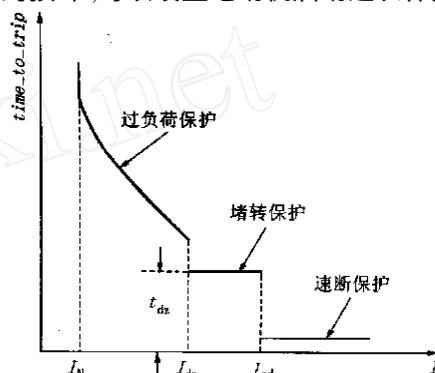


图 1 电动机速断保护、堵转保护、过负荷保护的配合关系

### 3.2 过负荷保护<sup>[4]</sup>

影响电动机使用寿命的主要问题之一就是发热。电动机长时间过负荷,或短时间连续启动而造成电动机过热,绝缘老化,是损坏电动机的常见原因,在电动机故障总数中占相当大的比例。由于电动机过负荷会导致过热,而低倍过负荷又允许一定时限,所以电动机的过负荷特性是反时限特性。在电动机出厂时,生产厂家会提供电动机的热容限曲线或一组过负荷能力的数字,这些是进行热过负荷保护的重要依据。

#### 3.2.1 电动机热积累模型

电动机的三种不同工况,即堵转或停止、加速、运行,对应不同的热容限特性。但大多数电动机的热容限特性都可以用一条平滑的反时限曲线表示。热容限曲线上的点表示电动机在该工况下运行相应的电流,转子将在对应的时间后达到热容限。实施保护时,使用的保护曲线应接近但处于厂家给定的热容限曲线的下方,以便最大限度地利用电动机的过负荷容量。

在进行热过负荷保护时,要考虑到电动机运行(即工作于额定转速)时,负序电流会引起转子损耗显著增加这一现象。当负序电流流过定子绕组时,将产生逆转子旋转方向的旋转磁场,在电动机额定转速下,其速度近似为转子转速的 2 倍,即转子感生电流的频率近似为 100Hz,这时转子电阻表现为交

流电阻  $R_{ac}$ , 而正序电流的旋转磁场相对于转子转速近似为 0, 其感应电流频率很低, 转子电阻表现为直流电阻  $R_{dc}$ 。对于鼠笼式异步电动机, 转子对负序电流和正序电流表现的电阻之比  $K_c = R_{ac}/R_{dc} = 1.25 \sim 6$ 。由于转子发热损耗与其电阻成正比, 所以数值相同的负序电流产生的损耗近于正序电流损耗的  $K_c$  倍。因此, 计算时采用计及正序、负序电流的等效电流  $I_{eq}$  进行过负荷判定。 $I_{eq}$  的表达式如(1)式所示:

$$I_{eq} = \sqrt{\left(\frac{I_1}{I_s}\right)^2 + k\left(\frac{I_2}{I_s}\right)^2} \quad (1)$$

式中  $I_1$  为电动机正序电流分量,  $I_2$  为负序电流分量;  $k$  为负序电流系数, 模拟负序电流的增强热效应, 一般取 6。

电动机启动后, 使用一寄存器实时记录电动机的热容量 ( $TC$ ),  $TC$  的容限为 100%。每过一热积累计算的时间间隔  $t$  就计算当时的等效电流  $I_{eq}$ , 如果大于额定负载电流, 则判定电动机处于热积累过程, 否则为热发散。进行热积累时, 从热容限保护曲线上查出相应的保护出口时间 (time-to-trip), 也即电动机会在 time-to-trip 的时间内达到热容限, 由于  $I_{eq}$  产生的热效应将持续  $t$ , 因此相应的热容量就将增加  $t$  与 time-to-trip 的比值所表示的百分比。计算式如(2)式所示:

$$TC_{used} = TC_{used-t} + \frac{t}{time-to-trip} \times 100\% \quad (2)$$

如果  $I_{eq}$  的值比额定负载电流还小, 则电动机处于散热状态,  $TC$  值按设定的散热时间常数减少。

当热容量  $TC$  值累加至 100% 时, 电动机达到热容限, 保护出口。

### 3.2.2 电动机热发散模型

当电动机的过负载消除, 即  $I_{eq}$  小于额定负载电流时, 电动机进入冷却状态, 所积累的热量按指数规律衰减, 如(3)式所示:

$$TC_{used} = TC_{used-start} \cdot e^{-t/\tau} \quad (3)$$

式中  $TC_{used-start}$  为电动机过负载消除时的热容量积累值,  $\tau$  为热衰减时间常数,  $TC_{used}$  为经  $t$  时间衰减后的热容量值。

将上式写成离散形式:

$$TC_{used} = TC_{used-t} \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

上式中  $t$  为相邻两次热发散计算的时间间隔,  $TC_{used-t}$  和  $TC_{used-start}$  分别为过负载消除后, 每次热发散计算前后的电动机热容量值。  $t$  可以预先

设定, 则由用户选择。例如  $t$  取 1min, 取 15min, 则  $TC_{used} = TC_{used-t} \cdot e^{-t/\tau} = TC_{used-t} \cdot 0.936$ , 即 1min 内电动机热容量将减少 6.4%。

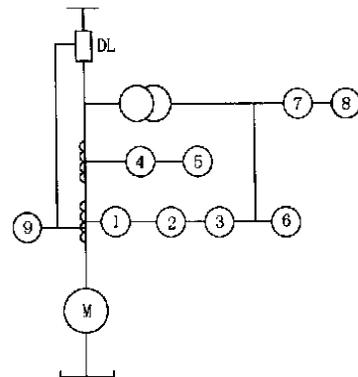
### 3.3 其它保护功能<sup>[1,5]</sup>

系统电源电压是很难保证恒定、不出现波动或其它异常情况的。如果电动机在系统电压低于额定电压一定程度时启动, 则难以提升到额定转速。当电源电压降低或短时中断时, 一些不允许或不需自起动的电动机, 须从电力网中断开。在另一方面, 如果电动机带负载运行时电源电压升高, 则电动机电流降低, 但铁损和铜损变大, 引起电动机温度上升。因此, 针对电源电压的变化, 可以分别配置低电压和过电压保护。

当三相相间电压均小于低电压保护定值时, 低电压保护动作。低电压保护在电动机三相均无电流的情况下应能自动退出, 其定值的设置要躲过电动机启动时的最低电压。当三相相间电压均高于过电压保护定值时, 过电压保护动作。过电压保护定值要按电网电压允许波动的最大范围进行整定。

另外, 当电动机近处系统发生短路故障时, 会引起母线电压瞬间大幅度下降, 此时电动机转子的转速一时降不下来, 电动机将转为发电制动状态, 向短路点送出逆功率, 从而对系统造成危害。可采用逆功率保护, 当检测到送往电动机的功率方向与正常情况相反时, 保护起作用。

由以上分析, 电流保护、电压保护和逆功率保护一起, 构成了微机综合保护方案。



- 1:速断电流保护 2:堵转电流保护 3:过负荷反时限保护
- 4:负序电流保护 5:零序电流保护 6:逆功率保护
- 7:低电压保护 8:过电压保护 9:电动机启动时间过长保护

图2 电动机综合保护配置图

## 4 结论

按图2保护配置设计成的 TH21-4M 电动机综

合保护装置,已经顺利通过了动态模拟实验,实验结果表明:以序分量为判据基础、结合热积累模型,并辅以其它保护功能的微机型综合保护装置,可以很好地反应异步电动机各类常见故障,具有较高的保护准确性和灵敏度,可靠性高,多次模拟各种故障时,均不发生误动或拒动。该装置采用多 CPU 结构和大屏幕液晶显示,能对异步电动机的运行进行测量、监视和开关操作,并具有 CANbus 通信功能,可作为全分散式的变电站自动化系统的一个智能模块,也可独立安装于相应的开关柜中,具有良好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京:中国

电力出版社,1996,12.

- [2] 王禹民,蔡泽祥. 高压异步电动机的故障诊断及综合保护. 电网技术,1996,20(3).
- [3] 黄益庄. 变电站综合自动化技术. 中国电力出版社,2000.
- [4] 郎兵,李继红. 电动机综合保护中过负载保护模型的研究. 电力情报,1998,(4).
- [5] Murty VVS Yalla. A digital multifunction protective relay, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992,7(1).

收稿日期: 2001-07-03

作者简介: 李璇华(1977-),女,硕士研究生,研究方向为微机保护; 黄益庄(1938-),女,教授,研究方向为电力系统自动化、微机保护; 唐晓泉(1965-),男,博士,研究方向为电力系统自动化。

### Motor fault analysis and integrated protection scheme

LI Xuan-hua, HUANG Yi-zhuang, TANG Xiao-quan, ZHANG Nan

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the detailed analysis of various fault characteristics of asynchronous motor, this paper brings forward an integrated micro computer protection scheme which has sequence components as the basic protection criteria, and integrates heat accumulation and diffusion model. In this paper, concrete implementation of the protection scheme is also expounded, especially for the heat overload protection. A protection device based on this scheme has already passed dynamic simulation experiments to prove its validity.

**Keywords:** motor fault; protection; sequence component; overload

(上接第 29 页)

根据本文方法编制的大庆热电厂智能倒闸操作票系统,经实际测试表明本文提出的方法是正确的、可行的。

#### 参考文献:

- [1] 孙雅明,张沛. 电力系统的知识获取和知识库的维护管理. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十一届学术年会论文集,1995:1100~1105.
- [2] 陈允平,周理. 计算机生成操作票的理论与实践. 电网

技术,1996,(2):39~42.

- [3] 范锡普. 发电厂电气部分. 北京:水利电力出版社,1982.

收稿日期: 2001-05-07

作者简介: 梁磊(1976-),男,硕士,主要从事电力系统继电保护的研究; 陈超英(1957-),男,教授,博士生导师,现从事电力系统继电保护、交直流系统的数字仿真以及电力系统故障测距等方面的研究。

### Research on maximum set of operational devices in intelligent tickets system

LIANG Lei, CHEN Chao-ying

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** On the basis of summary of integrated operational commands, this paper offered a method which can intelligently analyze and create dispatching tickets by concept of maximum set of operational devices. Also in this paper, functional modules used for intelligently analyzing system are offered and procedures of solving and filtering maximum set of operational devices are described in detail.

**Keywords:** maximum set of operational devices; intelligent tickets system; integrated operational command