

大中型异步电动机综合保护理论及实现

孙嘉宁

(合肥工业大学能源研究所, 安徽 合肥 230022)

摘要: 探讨了电动机综合保护的理论, 提出了实用、可靠的微机综合保护方案, 按此方案已成功批量生产。

关键词: 异步电动机; 综合保护; 理论; 方案; 微机控制

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2000)12-0020-04

1 引言

作为电气主设备, 异步电动机是数量最多的一种, 一个现代化的工厂拥有几百台至几万台电动机。可以说, 电动机及其保护的运行正常与否, 直接关系到企业的运转与人民生活。

以往由于每台电动机容量不大, 电动机保护不受重视, 长期以来传统的电动机保护装置存在原理性缺陷, 运行状况很不理想, 常有保护拒动造成电动机烧毁, 或误动中断生产过程, 影响产品产量和质量。

如今电压为 3kV 以上的高压大容量电动机已广泛使用, 并且现代电动机的设计制造正走向“极限设计”, 与 30 年代相比, 容量相同的电动机, 重量减少一半以上, 体积减少约三分之一, 这就使现代电动机的热容量和耐热限度急剧下降, 对电动机保护提出了更高的要求。因此有必要从理论上深入探讨电动机烧损的机理, 采用先进的科技手段, 研制出先进的电动机保护装置。

本文着重分析电动机综合保护的基本原理和方案, 并且介绍新型有效的微型电动机综合保护装置。

2 异步电动机的综合保护理论

2.1 表征电动机运行特征的各序电流分量

电动机是故障率较高的一种电气主设备, 它的安全威胁主要来自负荷电流过大而导致过热烧毁。传统的电动机继电保护均以相电流作为保护判据, 实践证明它是不可靠的。电动机的最起码的特征表现为: 三相系统的旋转磁场和旋转的转子。三相对称状态下的过流与不对称状态下的过流(其中必有反向旋转的负序磁场)烧伤电机有着完全不同的机理和不同的危害边界。也就是说以三相电流量为判据有着原理性的缺陷, 必然导致保护不可靠。

基于旋转电机的电流相量分析, 电动机异常运行及产生故障时, 其三相电流将发生相应的变化, 而各种变化都以其正序分量 I_1 (正向旋转磁场), 负序分量 I_2 (反向旋转磁场) 和零序分量 I_0 (接地故障特征) 表现出不同的故障特征: 电动机三相负荷过大, 启动时间过长, 堵转等对称状态下的非正常运行其表现为正序电流 I_1 过大; 定子绕组一相断线, 局部短路, 不对称负荷, 三相电源电压不平衡等不对称故障有明显的负序电流 I_2 过大的征象; 定子绕组单相接地或绝缘破坏时将产生零序电流 I_0 。

由以上分析可知, 应该而且可以把分析电动机电流的正序、负序和零序分量的大小构成电动机保护的主要判据, 以此为基础采取相应保护措施才是行之有效的。

2.2 负序电流的热效应

幅值相同的定子正序电流 I_1 和负序电流 I_2 在电动机内产生的热量并不相同, 分析如下:

a) 定子绕组的 I_1 和 I_2 产生的正、负序旋转磁场, 对定子自身而言, 为正、反同步速。设定子绕组正序电阻为 R_1 , 其负序电阻为 R_2 , 且有 $R_1 = R_2$, 则在 I_1 和 I_2 的共同作用下, 定子铜损为:

$$P_s = 3(I_1^2 + I_2^2) R_1 \quad (1)$$

但是定子绕组的 I_1 和 I_2 产生的正、负序旋转磁场, 对正常运行的转子(假定滑差 $s = 0$), 前者差不多相对静止, 对应的转子正序电阻(折合到定子方)近似为直流电阻 R_1 , 后者近似为二倍同步速, 对应的转子负序电阻(折合到定子方)为交流电阻 R_2 。对于异步电动机有:

$$R_2 / R_1 = (1.25 \sim 6) = K_R \quad (2)$$

因此在 I_1 和 I_2 的共同作用下, 转子的铜损为:

$$P_R = 3(I_1^2 + K_R I_2^2) R_1 \quad (3)$$

即与正序电流大小相同的负序电流产生的损耗为正序电流损耗的 K_R 倍, 所以当有负序电流出现

时,转子损耗将显著增加。特别是在转子中产生倍频电流流过转子表层,导致转子局部过热而烧伤,甚至导致护环松脱,造成严重破坏。

b) 当三相电压不平衡时将引起较大的负序电流。若忽略激磁电流,则从定子侧看(见图1),定子电流正、负序分量为:

$$I_1 - I_1 = U_1 / [(R_1 + jX_1) + \frac{R_2'}{s} + jX_2'] \quad (4)$$

$$I_2 - I_2 = U_2 / [(R_1 + jX_1) + \frac{R_2'}{2-s} + jX_2'] \quad (5)$$

式中: U_1 —— 定子正序电压;

U_2 —— 定子负序电压;

R_1 —— 定子正序电流电阻;

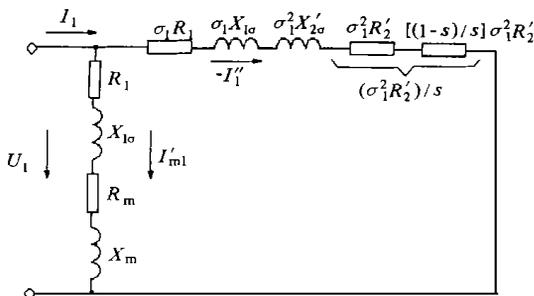
R_2 —— 转子正序电流电阻;

X_1 —— 定子正序电流漏抗;

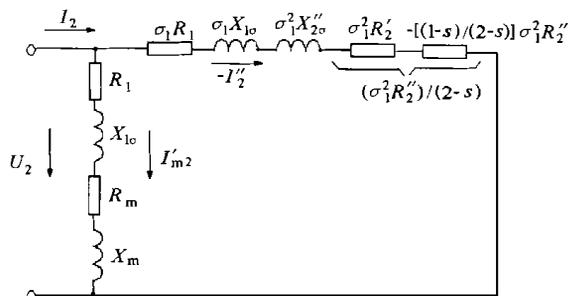
X_2 —— 转子正序电流漏抗;

R_2 —— 转子负序电流电阻;

X_2 —— 转子负序电流漏抗。



(a) 正序等效电路



(b) 负序等效电路

图1 异步电动机在不对称电压下的等效电路(从定子侧看)

实际运行时 s 很小,所以 $2-s \approx 2$, 则:

$$I_2 - I_2 = U_2 / [(R_1 + jX_1) + \frac{R_2'}{2} + jX_2']^{1/2} = U_2 / (R_R^2 + X_R^2)^{1/2} = U_2 / Z_R \quad (6)$$

即负序电流与电压不对称度有如下关系:

$$I_2 = K_{st} (U_2 / U_n) I_n \quad (7)$$

式中: U_n 、 I_n —— 定子每相的额定电压和额定电流;

K_{st} —— 对称三相额定电压下起动时的起动电流倍数, $K_{st} = (U_n / Z_R) / I_n$;

Z_R —— 电动机短路阻抗, $Z_R = (R_R^2 + X_R^2)^{1/2}$ 。

一般 $K_{st} = (5 \sim 7)$, 常取为 6。可知在三相电压不平衡时将产生其 6 倍的负序电流。显然,当电压的不对称度为 5% 时,负序电流将达 30%。这时如果定子某相中的正、负序电流接近相同,则当满载时这一相的合成电流将超过额定电流 30%,引起定子绕组的局部过热。

2.3 基于电动机“等效电流” I_{eq} 的过热保护

为了反映 I_1 和 I_2 的不同发热效应,英国 GEC 公司提出一个反映上述发热效应的“等效电流” I_{eq} , 即

$$I_{eq}^2 = K_1 I_1^2 + K_2 I_2^2 \quad (8)$$

式中: K_1 —— 正序电流系数; K_2 —— 负序电流系数

用等效电流 I_{eq} 表示电动机发热,包括以定子、转子铜耗为主的各种损耗引起的发热,相关的电阻是定子绕组和转子绕组的正序电阻 R_1 和 R_2 , 因此 I_{eq} 引起的热源可以等效地表示为:

$$P = P - P_0 = 3 I_{eq}^2 (R_1 + R_2) = 3 (K_1 I_1^2 + K_2 I_2^2) (R_1 + R_2) \quad (9)$$

设绕组中正常电流为 I_n , 绕组的铜损为 P_0 。当电流从 I_n 增大到 I , 相应绕组的铜损由 P_0 增加到 P , 若铜损产生的热量毫无损失地储存在绕组中,则绕组温度按指数规律由 T_0 上升到 T , 则在 t 的时间内绕组温升为:

$$T = T - T_0 = (P - P_0) \times t / C = P_0 / C (P / P_0 - 1) \times t \quad (10)$$

式中: C —— 绕组热容量 (WS/)

注意到绕组的铜损与电流的平方成正比,则上式可改写为:

$$T = P_0 / C [(I / I_n)^2 - 1] \times t \quad (11)$$

对于给定的温升 T , 可得到相应的允许时间 t , 设 $t = t$, 可推出时间 - 电流关系式如下:

$$t = A / [(I / I_n)^2 - 1] \quad (12)$$

式中: $A = P_0 / (T \cdot C)$

令 $A = A$, $I = I_{eq}$, 再考虑到散热等因数加以修正,即构成电动机热过载保护方程:

$$t = A / [(I_{eq} / I_n)^2 - 1.05^2] \quad (13)$$

此方程计及了正序电流和负序电流与流进电动机的实际电流相对应的总的热效应,从而可确保对

电动机提供准确、可靠而有效的过热保护。

3 电动机综合保护方案

依据上述电动机保护理论,制定综合保护方案如下:热过载保护采用反时限动作特性, I_1 、 I_2 、 I_0 三序电流保护采用定时限特性,其理由是:1)电机制造厂和用户提不出 $I_2(t)$ 和 $I_0(t)$ 的特性, $I_1(t)$ 已在热过载保护中有反映。2) I_1 、 I_2 、 I_0 三种电流保护主要反映各相间短路、接地短路等故障。只要能判定发生上述短路故障,保护应尽快动作,不应拖延。3)三序电流定时限保护整定简单,与上级保护易于配合,但须注意在起动或堵转过程中,正序电流速断保护不应误动。

3.1 正序电流速断保护($I_1 \gg$)

正序电流速断保护反应相间短路,包括三相对称短路。由于短路故障将导致很大的正序电流,所以只要正序电流超过速断动作门限值,保护立即动作。保护动作判据为:

$$I_1 > I_{1dmax} \quad (14)$$

3.2 正序电流定时限保护(I_1 , t_1)

正序电流定时限保护,对电动机起动时间过长、堵转等故障构成保护。按照电动机的固有特性,在一定的 I_1 下允许持续相应的时间,超过此界限则执行跳闸。起动时间过长由正序速断和起动计时联合构成。保护动作判据分别为:

$$\text{起动中: } I_1 > I_{1STA} \quad t_1 > t_{1STA} \quad (15)$$

$$\text{运行中: } I_1 > I_{1d} \quad t_1 > t_{1d} \quad (16)$$

式中 t_{1STA} 为起动允许时间

3.3 负序电流定时限保护(I_2 , t_2)

电源电压不平衡、断相、反相、一相匝间短路等均引起负序电流 I_2 ,过热保护已能提供保护。但对严重的不对称故障, I_2 很大,则设置单独的负序电流快速保护。保护动作判据为:

$$I_2 > I_{2d} \quad t_2 > t_{2d} \quad (17)$$

3.4 零序电流定时限保护(I_0 , t_0)

该保护作为电动机绕组接地和绝缘破坏的主保护。对于大接地电流系统,可由三相电流计算零序电流: $3I_0 = I_a + I_b + I_c$

对于小接地电流系统,则采用零序CT采集零序电流。

动作判据为:

$$I_0 > I_{0d} \quad t_0 > t_{0d} \quad (18)$$

3.5 热过载反时限保护(I_{eq} ,)

根据热过载保护方程(见式12)实施该项保护。

动作判据为:

$$\int_0^t [(I_{eq}/I_n)^2 - 1.05^2] dt > \quad (19)$$

其中等效电流 $I_{eq}^2 = K_1 I_1^2 + K_2 I_2^2$ 系数 K_1 和 K_2 取值:

K_1 ——正序电流系数(0.5, 1),在电动机起动时间内 t_{STA} 内, $K_1 = 0.5$,相当于保护动作电流提高1倍,以使保护动作避开正常的起动电流;在电动机起动时间 t_{STA} 后, $K_1 = 1$ 。

K_2 ——负序电流系数(3~10),一般取作6。

为电动机发热时间常数,一般由用户提供。例如,

1) 已知电动机在 K 倍电流下允许运行 t_s ,则

$$t = t_s / [K^2 - 1.05^2],$$

$$\text{即: } t = t_s [K^2 - 1.05^2] \quad (20)$$

2) 知道电动机定子绕组的额定温升 T_N ,极限温升 T_M 和定子绕组电流密度 J_N ,

$$t = 150 \times T_N \times (T_M/T_N - 1) / 1.05 J_N^2 \quad (21)$$

式中:150为调整级差(s)。

3) 提供起动电流标么值 I_{STA} 和起动电流时间 t_{STA} ,按允许连续起动两次考虑,则

$$2 t_{STA} [I_{STA}^2 - 1.05^2] \quad (22)$$

4 电动机微机综合保护装置

实现上述电动机保护理论和方案的微机保护装置,其硬件设计由Intel 80C196KC高性能16位微电脑控制芯片为核心,同时采用其它新型的先进器件,如:可编程12位A/D转换器MAX197,串行可编程LED显示驱动器MAX7221, E²PROM+复位控制器+看门狗X25043等等,构成电路简洁,功能齐全,性能可靠的硬件系统。

此外,采取了一系列行之有效的抗干扰措施:在电源回路采用具有高共模抑制比和差模抑制比的高频开关稳压电源;在交流模拟量输入回路采用隔离CT,设置RC低通滤波器;在开关量输入及输出回路采用单独电源供电,信息传递则采用光电耦合;各弱电系统相互独立,其零电位全部悬浮,机壳,电源的共模地及交流回路的静电屏蔽层与大地相连;在印制电路板的布局与制作上下工夫,采用多层板结构,使之具有良好的高频去耦特性;CPU内外双WATCHDOG配制等等,使整机的可靠性大为提高。

软件设计中合理配置系统资源,充分发挥80C196的强大功能,充分发挥各新型器件的功能,采用成熟可靠的算法,实现了该保护系统的各项功

能：

a) 完成对交流连续信号的离散化采集控制和傅氏级数计算,滤去信号中的各次谐波和直流成分得到其基波量。

b) 完成对电流的各序电流和等效电流计算,根据各保护方程,判别故障类型及保护动作与否。

c) 控制各保护出口动作、延时及恢复;并对跳闸保护结果进行检查,若跳闸失灵立即报警。

d) 实现人机对话:响应外部键盘操作;给出各种显示。

e) 自检保护装置工作状态,若有异常,发出告警。

f) 控制 X25043,保存各项保护整定参数和故障记录;并构成片内、片外双 WATCHDOG,对于程序性的死机,能够自动复位。实现对 RS232 和 RS485 标准接口的远程通信。

5 结语

利用微机实现的大中型电动机保护综合装置,

顺利通过清华大学国家重点实验室的动模试验和许继国家继电保护产品检测中心的按国际 EMC 标准的快速瞬变干扰试验。保护功能全面,装置的各项电气性能指标符合有关国际和国内的标准要求。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理. 北京:清华大学出版社,1991.
- [2] 陈树德. 计算机继电保护原理与技术. 北京:水利电力出版社,1992.
- [3] 许实章. 电机学(修订本). 北京:机械工业出版社,1988.

收稿日期: 2000-08-14

作者简介: 孙嘉宁(1954-),女,在职研究生,从事微机继电保护产品开发工作。

Theory and practices of multiple protection for large and middle capacity asynchronous motors

SUN Jia-ning

(Hefei University of Technology, Hefei 230022, China)

Abstract: This paper deals with theory and design for multiple protection of asynchronous motors. Based on the theory and design, a kind of microcomputer control device has been successfully developed and commercialized.

Key words: asynchronous motor; multiple protection; theory; design; microcomputer device

(上接第 15 页)

Short-term load forecasting using artificial neural network and adaptive fuzzy system

ZHANG Xiao, JING Dong

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes a hybrid model for short-term load forecast using ANN and AFS, according to the uncertainty and nonlinearity of the load. The forecasted load is obtained through two steps. In the first procedure, this paper introduces the smoothing factor and the forgetting factor. In the second procedure, the uneven membership function is used. The result shows the efficiency and accuracy of this hybrid model.

Key words: artificial neural network; adaptive fuzzy system; short-term load forecast