

电动机热过载保护研究

陆征军¹, 王红青², 赵华军³, 赵希才¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102; 2. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437;

3. 安徽开发矿业有限公司, 安徽六安 237400)

摘要:正在制定的 IEC 60255-149 电热继电器的功能要求和修订的 DL/T 744 微机电动机综合保护装置通用技术条件, 均涉及到电动机热过载保护。阐述了电动机热过载的物理过程和热过载保护的构成、整定、试验和运行, 并将基于电动机热模型的热过载保护与普通过流反时限保护进行定量对比分析, 以便保护电动机免受热过载危害的同时, 合理地利用电动机的过载能力。

关键词:电动机保护; 热过载保护; 热模型; 反时限特性

中图分类号: TM588.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2012)03-0020-04

国际电工委员会正在制定 IEC 60255-149 电热继电器的功能要求以取代原来的 IEC 60255-8—1990^[1] (转化后的国家标准为 GB/T 14598.15—1998 电气继电器 第 8 部分: 电热继电器^[2]), 其中重点考虑的正是电动机热过载保护。与此同时, 电力行业标准 DL/T 744—2001 微机电动机综合保护装置通用技术条件^[3] 也正在修订当中。因此有必要对电动机热过载机理和热过载保护的构成、整定和试验进行总结, 以便更好地保护电动机免受热过载的危害。

1 可能导致电动机热过载的运行工况

在电机上电起动阶段, 可能由于电动机所带动的负荷过大或其他原因致使电动机不能转动, 即发生堵转。在加速阶段, 如果在某些转速下加速转矩低于临界转速, 电动机可能长时间运行在低速上而不能达到额定速度。此时电流仍大于稳态额定电流, 持续时间过长可能导致热过载。在稳定运行阶段, 额定转速附近电动机拖动的负荷增大可能导致出现持续过载, 甚至发生堵转。本文重点讨论稳定运行时的持续过载。

2 电动机热过载模型

热过载发生时, 对电动机产生危害的决定因素是绝对温度, 温度过高会使绝缘老化, 缩短电动机寿命, 甚至导致绝缘破坏。可以通过测量电动机的电流间接地监视绕组和转子的发热情况。

电动机的温度 $\theta_{\text{Equipment}}(t)$ 取决于环境温度 θ_{Ambient} 和温升 $\Delta\theta(t)$:

$$\theta_{\text{Equipment}}(t) = \theta_{\text{Ambient}} + \Delta\theta(t) \quad (1)$$

电动机的温升 $\Delta\theta(t)$ 由发热功率 P_{Heat} 和散热功

率 P_{Diss} 共同决定:

$$P_{\text{Heat}} - P_{\text{Diss}} = m \cdot c_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = C_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: m 为电动机质量; c_{th} 为比热; $C_{\text{th}} = m \cdot c_{\text{th}}$, 为电动机热容量。

P_{Heat} 即由流过定子绕组的电流在绕组电阻上产生的热量:

$$P_{\text{Heat}} = r \cdot I_{\text{eq}}^2 \quad (3)$$

式中: r 为定子绕组电阻; I_{eq} 为考虑负序电流的影响而计算出的等值电流。其中 I_{eq} 为:

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{I_1^2 + q \cdot I_2^2} \quad (4)$$

或者为:

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + q \cdot I_2^2} \quad (5)$$

式中: I_1 为正序电流; I_{rms} 为电流有效值; I_2 为负序电流; q 为负序电流热效应系数, 可取 3^[4]。

P_{Diss} 与温升 $\Delta\theta(t)$ 、热阻 R_{th} 有关:

$$P_{\text{Diss}} = \frac{\Delta\theta(t)}{R_{\text{th}}} \quad (6)$$

将式(3)、式(6)代入式(2), 可得:

$$r \cdot I_{\text{eq}}^2 - \frac{\Delta\theta(t)}{R_{\text{th}}} = C_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} \quad (7)$$

整理后, 得到:

$$R_{\text{th}} \cdot r \cdot I_{\text{eq}}^2 = R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}} \cdot \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) = \tau_{\text{th}} \cdot \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) \quad (8)$$

式中: $\tau_{\text{th}} = R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}}$, 为热时间常数。

设电动机最大允许温升为 $\Delta\theta_{\text{max}}$, 对应最大允许连续运行电流为 $I_{\text{eq-max}}$, 则达到热平衡状态时:

$$R_{\text{th}} \cdot r \cdot I_{\text{eq-max}}^2 = \Delta\theta_{\text{max}} \quad (9)$$

用式(9)对式(8)进行归一化处理,并令 $H(t) = \frac{\Delta\theta(t)}{\Delta\theta_{\max}}$,则有:

$$\dot{I}_{\text{eq-pu}} = \tau_{\text{th}} \cdot \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \quad (10)$$

$$H(t) = H_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}} + I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}}) \quad (11)$$

式(11)中: H_0 为初始值。当 $t \geq 5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 时:

$$H(t) \approx I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}}) \quad (12)$$

若 $I_{\text{eq-pu}} \leq 1$,则当达到热平衡状态时,取 $t \rightarrow \infty$,由式(11)可得:

$$H(t \rightarrow \infty) = I_{\text{eq-pu}}^2 \quad (13)$$

若 $I_{\text{eq-pu}} > 1$,则当 $H(t) = 1$ 时,温升达到 $\Delta\theta_{\max}$,保护跳闸,所需时间可通过求解式(11)得到:

$$t = \tau_{\text{th}} \cdot \ln\left(\frac{I_{\text{eq-pu}}^2 - H_0}{I_{\text{eq-pu}}^2 - 1}\right) \quad (14)$$

当电动机停止工作后,将逐步冷却:

$$H(t) = H_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}} \quad (15)$$

注意到式(15)中的时间常数是不同的。因为电动机堵转、静止时,热量通过传导和辐射耗散;加速时,热量通过传导和对流耗散;稳定运行时,主要靠对流耗散。显然,静止时的散热时间常数要长于稳定运行时。令 $\tau_{\text{th2}} = k \cdot \tau_{\text{th}}$ [4], k 可取 1.5~4.5,视环境温度定。

3 电动机热过载保护的实现

为应对电动机的堵转、加速时间过长,电动机保护需要配置堵转保护、启动时间过长保护。这些保护一般由定时限过电流保护构成,当实际电流超过设定电流并达到整定延时,动作于出口跳闸[5]。而稳定运行阶段的热过载,则需要在考虑电动机热模型的基础上设计保护方案[6]。

3.1 算法的实现

热过载保护可以采用递归算法。设微机继电保护装置每隔 T 时间处理一次数据且 $T \ll \tau_{\text{th}}$, $T \ll \tau_{\text{th2}}$,分别对式(11)、式(15)离散化处理后,得到:

$$\begin{cases} H(0) = H_0 \\ H(t) = H(t-T) \cdot \left(1 - \frac{T}{\tau_{\text{th}}}\right) + I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot \frac{T}{\tau_{\text{th}}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} H(0) = H_0 \\ H(t) = H(t-T) \cdot \left(1 - \frac{T}{\tau_{\text{th2}}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

当 $H(0) = 1$ 时,热过载保护动作。

3.2 冷态特性和热态特性

当热过载发生之前电动机处于无负荷电流的状态时, $H_0 = 0$; 当热过载发生之前电动机有稳态负荷电流且达到平衡态,则根据式(13), $H_0 = I_{\text{eq-pu}}^2$ 。

一个特殊情况是,当电动机正常运行时,继电保护装置自身因故退出运行一段时间后又投入运行。若装置短时间退出(例如装置复位),应记忆保护装置退出运行前 $5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 数据窗的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为重新投入运行时的 H_0 ; 若装置长时间退出,则将重新投入运行时刻的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为 H_0 。继电保护装置宜支持这一功能。

3.3 环境温度采集

热过载发生时,对电动机产生危害的决定因素是绝对温度。上文中的公式推导中,计算的结果是温升,环境温度缺省为 40°C 。如果能够采集环境温度,则可以更精确地计算电动机的发热情况。这可以通过对 I_{eq} 进行修正来实现,例如[5]:

$$I_{\text{eq-pu}} = \frac{I_{\text{eq}}}{k \cdot I_{\text{max}}}$$

$$k = \begin{cases} 1, \theta_{\text{Ambient}} \leq 40^\circ\text{C} \\ 1.4 - (0.01 \cdot \theta_{\text{Ambient}}), 40^\circ\text{C} \leq \theta_{\text{Ambient}} \leq 65^\circ\text{C} \\ 0.75, \theta_{\text{Ambient}} \geq 65^\circ\text{C} \end{cases} \quad (18)$$

3.4 实例

以南瑞继保 RCS-964X 系列电动机保护测控装置为例,其热过载保护的动作用方程为:

$$\begin{cases} I_{\text{eq}}^2 = k_1 \cdot I_1^2 + k_2 \cdot I_2^2 \\ \left[\left(\frac{I_{\text{eq}}}{I_e} \right)^2 - (1.05)^2 \right] \cdot t \geq \tau \end{cases} \quad (19)$$

式中: I_{eq} 为等值发热电流; k_1, k_2 为系数; I_1, I_2 分别为正序和负序电流; I_e 为电动机额定电流; t 为持续时间; τ 为电动机热积累定值(即发热时间常数)。 k_1 取 1,但在电动机启动阶段(根据电动机启动时间定值判断)自动取 0.5,以防止电动机正常启动过程中热过载保护误启动; k_2 用于模拟负序电流的增强发热效应,可取 3~10。

装置设有告警段,当电动机热积累定值达到一定水平时,可以先发出告警信号,提醒运行人员尽快采取措施。告警水平可在 30%~100% 范围内整定,建议取 80%。

热过载保护动作跳闸后,要等到电动机散热到允许启动的温度时,才能再启动。散热时间常数可整定为 1~5 倍的发热时间常数。装置设有热复归开入,在需要紧急启动的情况下,可通过热复归开入强

制将热模型恢复到“冷态”。

4 整定计算

4.1 整定计算

热过载保护的特性由 2 个参数决定：最大允许连续运行电流 I_{\max} 和时间常数 $\tau_{\text{th}}, \tau_{\text{th}2}$ 。

$$I_{\max} = k \cdot I_B \quad (20)$$

其中, I_B 可取电动机额定电流; 系数 k 可取 1.1~1.2。

如果电动机生产厂家依照 IEEE 620^[7] 提供了热临界曲线, 则可以参考文献[4]通过曲线拟合确定合适的时间常数。这样可以最大限度地发挥电动机的过载能力, 避免不必要的跳闸。

如果无法取得热临界曲线, 时间常数 τ_{th} 可以根据电动机 1 s 允许电流 I_{1s} 或者 6 倍额定电流跳闸时间 t_{6I_n} ^[4] 计算:

$$\tau_{\text{th}} = \left(\frac{I_{1s}}{I_{\max}} \right)^2 \quad (21)$$

$$\tau_{\text{th}} = 32 \cdot t_{6I_n} \quad (22)$$

4.2 与普通反时限电流保护比较

国内电动机保护, 长期以来大多采用以反时限过流为主的组合保护, 以极端反时限为例, 其特性方程为:

$$t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_p} \right)^2} \cdot \tau_p \quad (23)$$

根据式(5)和式(20), 电动机正常运行时 $H_0 =$

$I_{\text{eq-pu}}^2 = \left(\frac{I_B}{k \cdot I_B} \right)^2$ 。系数 k 取 1.15, 代入热过载保护的特性方程(14)并做幂级数展开, 可以得到:

$$t \approx \frac{0.244}{\left(\frac{I_{\text{eq}}}{I_{\max}} \right)^2 - 1} \cdot \tau_{\text{th}} \quad (24)$$

式(23)与(24)形式一致, 反时限电流整定值 I_p 与等值电流 I_{eq} 对应, 反时限时间整定值 τ_p 与热时间常数 τ_{th} 对应。

分析式(23)与式(24), 热过载保护根据电动机的物理模型进行设计, 考虑到负序的发热效应, 能够在电流不平衡时快速动作。另外, 由于反时限保护长时间运行积累了成熟的经验整定值, 时间常数 τ_{th} 也可根据以往反时限保护的整定经验, 定量推导得出。

热过载保护利用热模型进行发热散热计算, 更加真实有效地反映了电动机的发热情况, 在保护电动机免受热过载危害的同时能够充分、合理地利用电动机的过载能力。对于负荷波动大的电动机, 热模

型能够忠实地跟踪记录每次负荷波动时的发热情况并且进行累计, 一旦热累积超过允许值热过载保护就发出跳闸命令; 而常规反时限保护在负荷波动较大的情况下, 可能会频繁地启动和返回, 不能有效地保护电动机免受热过载的危害。

5 现场试验

5.1 现场试验

依据式(14), 并令 $H_0 = 0$, 可以画出电动机冷态特性曲线, 即电流-动作时间曲线。

每次试验前, 强制继电保护装置的 $H_0 = 0$ 以模拟电动机冷态状态; 如果继电保护装置不具有强置 H_0 的功能, 则应将 $\tau_{\text{th}2}$ 设置成最短, 并在每次试验前将继电保护装置静置一段时间 (大于 $5 \cdot \tau_{\text{th}2}$), 以模拟电动机的冷却过程。

分别向继电保护装置输入 $1.2I_B, 1.6I_B, 2.0I_B, 5.0I_B, 10.0I_B$ 的电流, 记录继电保护的動作时间, 并与冷态特性曲线进行比较, 得到動作时间误差。该误差宜超过理论计算值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 100 \text{ ms}$ (取两者中的大值)。

以安装于某矿业公司的 RCS-964X 系列电动机保护测控装置为例。其定值为: $I_e = 0.4I_n$ (I_n 为互感器二次额定电流); 电动机启动时间为 0; $\tau = 15 \text{ min}$; $k_2 = 6$ 。每次试验过后, 通过热复归开入强制将热模型恢复到“冷态”。其试验结果如表 1 所示, 误差在允许范围内。

表 1 试验结果

| 输入电流 | 理论动作时间/s | 实际动作时间/s | 相对误差/% | 绝对误差/s |
|------------|-----------|-----------|--------|--------|
| 1.2 I_e | 2 666.667 | 2 763.531 | 3.63 | 96.864 |
| 1.6 I_e | 617.496 | 639.782 | 3.61 | 22.286 |
| 2.0 I_e | 310.613 | 320.235 | 3.10 | 9.622 |
| 5.0 I_e | 37.661 | 38.849 | 3.15 | 1.188 |
| 10.0 I_e | 9.100 | 9.364 | 2.90 | 0.264 |

4.3 运行

正如前文所述, 假如在电动机正常运行时, 继电保护装置自身因故退出运行一段时间后再次投入运行时, 若装置短时间退出 (例如装置复位), 应记忆保护装置退出运行前 $5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 数据窗的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为重新投入运行时的 H_0 ; 若装置长时间退出, 则将重新投入运行时刻的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为 H_0 , 以防止继电保护装置误动作或者拒动。

6 结束语

微机电动机保护装置已经配置了比较完备的热过载保护。为了更好地利用电动机的过载能力同时保护电动机免受热过载的危害,应按照电动机的实际特性进行继电保护整定,通过现场试验考察其精度,在运行过程中也要注意继电保护装置对热积累的记忆功能。

参考文献:

- [1] IEC 60255-8—1990, Electrical relays - Part 8: Thermal electrical relays[S].
- [2] GB/T 14598.15—1998, 电气继电器 第 8 部分: 电热继电器[S].
- [3] DL/T 744—2001, 微机电动机综合保护装置通用技术条件[S].
- [4] 卢庆港, 解中秀. 异步电动机热模型保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 107-113.
- [5] AREVA MiCOM P241, P242 & P243 Rotating Machine Protection Relay Technical Manual[G]. 2008.
- [6] 陆海峰, 王石刚, 曹家勇. 变频器中电动机过载保护的算法及其实现[J]. 工矿自动化, 2008(4): 33-35.
- [7] IEEE Std 620—1996, IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines[S].

作者简介:

- 陆征军(1973)男, 江苏张家港人, 工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的装置研发工作;
- 王红青(1969), 男, 上海青浦人, 高级工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的技术监督和管理工作;
- 赵华军(1967), 男, 安徽六安人, 工程师, 从事电力传动研究工作;
- 赵希才(1969), 男, 山东平阴人, 研究员级高级工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的技术管理工作。

Research on the Motor Thermal Overload Protection

LU Zheng-jun¹, WANG Hong-qing², ZHAO Hua-jun³, ZHAO Xi-cai¹

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co.Ltd., Nanjing 211102, China; 2. East China Electric Power Test & Institute Co.Ltd., Shanghai 200437, China; 3. Anhui Mining Development Co.Ltd., Liuan 237400, China)

Abstract: The IEC 60255-149 measuring relays and protection equipment - part 149: functional requirements for thermal protection and DL/T 744 general specification for microprocessor-based motor protection equipment, both relate to motor thermal overload protection. The physical process of motor thermal overload and the structure, setting, test and operation of thermal overload protection are expounded in the paper. Besides, the thermal overload protection based on motor thermal model and the common inverse-time over-current protection are compared and analyzed quantitatively. Thus, the motor thermal overload protection can use the motor overload ability rationally.

Key words: motor protection; thermal overload protection; thermal model; inverse time characteristics

(上接第 19 页)

Voltage Control Strategy of 500 kV Power Grid in Voltage Centralized Control Mode

JIANG Yu¹, ZHANG Yong¹, HU He-xuan²

(1. Jiangsu Electric Power Dispatching and Communication Center, Nanjing 210024, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The management and control of power system are changing to the “big run” mode, which is promoted nationwide in power reform. From the engineering practice view, new problems appeared in such highly centralized reactive voltage control mode. In order to solve these problems, voltage optimization control strategy based on reactive voltage sensitivity is put forward. Simulation results show the validity of the proposed control strategy.

Key words: voltage control; reactive voltage; sensitivity

何为电离辐射?

辐射是不依人的意志为转移的客观事物。在人们赖以生存的环境中, 辐射无处不在。太阳发出的由核反应的光和热, 是人类生存所必需的, 天然的放射性物质广泛分布于整个环境中。就连我们的身体内, 也存在着 ^{14}C , ^{40}K 以及 ^{210}Po 之类的放射性核素。地球上的所有生命, 都是在存在着此类辐射都背景下不断进化而来的。

按照辐射作用于物质时所产生效应的不同, 人们将辐射分为电离辐射与非电离辐射两类。电离辐射包括宇宙射线、X 射线和来自放射性物质的辐射。非电离辐射包括紫外线、热辐射、无线电波和微波。