

基于电动机热模型的微机反时限保护方法研究

张清枝¹, 李新雷²

(1. 新乡学院机电工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 安阳供电公司, 河南 安阳 455000)

摘要: 用微分方程建立导体发热的连续模型, 全面反映了导体温升随电流变化的过程。根据该模型得到的过流保护反时限动作特性曲线, 为了解决反时限特性曲线中的对数运算转换为微处理器能够处理的运算的问题, 对其进行了探讨, 并提出了解决方法, 通过仿真表明完全可以在实际的微机保护装置中应用, 具有较高的实际应用价值。

关键词: 电机保护; 热模型; 反时限; 分区查表

Study on inverse-time protection method based on thermal model of induction motor

ZHANG Qing-zhi¹, LI Xin-lei²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Xinxiang 453003, China;
2. Anyang Electric Power Supply Company, Anyang 455000, China)

Abstract: In this paper, the establishment of differential equations of the continuous thermal model, conductor temperature changes with the current process has been fully reflected. The model is adopted to produce the inverse time overcurrent characteristic curves. In order to solve the problem of the inverse-time characteristic curve of exponential calculation into a microprocessor capable, this paper discusses it and puts forward solutions. The simulation shows it can be used in the actual application of microprocessor-based protection devices. It has a higher value of the practical application.

Key words: motor protection; thermal model; inverse-time; zoning lookup

中图分类号: TM32; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0086-04

0 引言

目前, 电动机的过载保护大都用过电流作为判据, 认为电动机在工作过程中处于绝热状态, 采用极端反时限特性曲线来模拟电动机的过热情况。而电动机正常运行时, 在发热的同时, 也在不断散热, 这样以来, 发电机的温度与电流的关系就不是极端反时限特性曲线, 而是一条对数曲线。在微机保护中, 对数运算比较难实现, 本文就对数曲线在单片机上的实现方法进行了探讨, 并提出了解决方法。

1 导体发热模型的建立

根据热平衡原理, 在一定时间内, 导体产生的部分热量将储藏在物体中并使该物体温度升高, 另一部分将散失在冷却介质中, 因此电气设备中的发热导体(以下称导体)产生的热量等于导体温度吸收的热量与向周围介质的散发热量之和, 故电动机定子绕组的温升特性可以采用式(1)微分方程予以描述^[2-4]:

$$p(t)dt = cgd\theta + as\theta(t)dt \quad (1)$$

方程(1)的右侧第一项为物体温升 $d\theta$ 所吸收的热量, 第二项为 dt 时间内对冷却介质的散热。式中 $p(t)$ 为 t 时刻的导体热功率; $\theta(t)$ 为 t 时刻的导体温升; cg 为导体的升温系数, c 为比热, g 为质量; as 为导体的散热系数, a 为散热率, s 为散热面积。

设导体在 $t=0$ 的温升为 θ_0 , 求解式(1)得:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{as}{cg}t} + \frac{1}{cg} e^{-\frac{as}{cg}t} \int_0^t p(t) e^{\frac{as}{cg}t} dt \quad (2)$$

由于过载电流可能随时间不断变化, 并且难以对其进行准确的数学描述^[5-7], 因此 $p(t)$ 不能确定, 不能直接利用式(2)对过载过程进行准确描述。

2 热过载反时限特性

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, 由于其电流时间响应特性曲线较平, 使得电动机容量裕度大, 导致电动机效率大幅度下降。根据国际电工委员会(IEC255)和英国标准规范(BS142)的规定, 一般采用下面几种标准的

反时限特性方程,如:

$$\text{一般反时限: } t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_{th}}\right)^{0.02} - 1} \tau \quad (3)$$

$$\text{非常反时限: } t = \frac{13.5}{\left(\frac{I}{I_{th}}\right) - 1} \tau \quad (4)$$

$$\text{极度反时限: } t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_{th}}\right)^2 - 1} \tau \quad (5)$$

$$\text{热过载反时限: } t = 35.5\tau \ln \frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - (kI_{th})^2} \quad (6)$$

式中: I 为故障电流; I_p 为故障前负荷电流; K 为启动系数, $K=1.07$; I_{th} 为电动机的额定电流; τ 为时间整定常数; t 为动作时间。

根据对称分量法分析,故障电流可分解为正序、负序和零序分量,各序电流的不同组合及幅值大小与故障类型之间有很好的对应关系,因为负序电流的发热效应和正序电流发热效应有很大的差别,负序电流产生的旋转磁场和正序电流产生的旋转磁场方向相反,因此,它将以2倍转子旋转速度和转子相切。在转子上产生很大的感应电流,引起转子发热。因此故障电流应按以公式(7)进行计算。

$$I = \sqrt{I_1^2 + (kI_2)^2} \quad (7)$$

式中: I_1 为正序电流; I_2 为负序电流; $k=2$ 。

对电动机温升特征方程进行分析,假设电流 I_x 恒定不变, $p(t) = I_x^2(t)r = p_x$ 为常数, r 为导体等效电阻,则

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{as}{cs}t} + \frac{p_x}{as} (1 - e^{-\frac{as}{cs}t}) \quad (8)$$

显然, $t \rightarrow \infty$ 时, $\theta(t) = p_x / (as)$, 即电流为稳定 I_x 时的稳定温升为 $\theta_x = I_x^2(t)r / (as)$ 。假设在过载启动时刻,导体温升已经稳定为 θ_p , 则对应的电流为 I_p , 且满足 $\theta_p = I_p^2 r / (as)$; 导体的最高允许温升为 θ_m , 对应的电流为 I_m , 且满足 $\theta_m = I_m^2 r / (as)$, 一般 $I_m = 1.07I_{th}$ 。

根据式(7)求解反时限动作得:

$$t = \frac{cg}{as} \ln \left(\frac{I_x^2 - I_p^2}{I_x^2 - I_m^2} \right) \quad (9)$$

比较式(6)、(9)得:

$$\frac{cg}{as} = 35.5\tau \quad (10)$$

故在实际应用时无需知道导体的升温系数和散热系数,可以参考 IEC255 推荐的热过载反时限动作曲线,选取适当的 τ 值。

比较以上四种反时限特性,很容易发现只有热过载反时限具有记忆故障前电流功能,其电流时间响应特性曲线较陡,比较接近电动机实际发热曲线,有助于电动机工作效率。但在国内产品中反时限特性选择热过载反时限特性的保护却很少。这可能是由于热过载反时限数学模型较为复杂,单片机又没有对数指令无法直接计算式(6),因此必须采用查表法来实现式(6)。且对数表的给出也有一定的难度。这在一定程度上限制了热过载反时限的应用。

3 反时限特性曲线的查表方法实现研究

为了节省表格存储单元,为对传统表格的做法改进作准备,将式(6)写成如下形式:

$$t = \tau' \lg \left(\frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - (kI_{th})^2} \right) \quad (11)$$

其中: $\tau' = 35.5\tau / \lg e$ 。

从公式(11)可以看出:该反时限特性不能用一般的故障电流倍数通过查表实现,为了查表,假定:

$$A = \frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - (kI_{th})^2}, \text{ 则公式(11)变为 } t = \tau' \lg A,$$

A 的取值范围见表 1。

表 1

$I_p=0$			$I_p=I_{th}$		
I/I_{th}	A	$\lg A$	I/I_{th}	A	$\lg A$
1.1	18.59	1.269	1.1	3.23	0.509
1.2	4.88	0.688	1.2	1.49	0.173
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7.0	1.023 9	0.010 3	7.0	1.003 0	0.001 30
8.0	1.018 2	0.007 83	8.0	1.002 3	0.000 998
10.0	1.011 58	0.005 00	10.0	1.001 5	0.000 651

从表 1 可以看出: A 的取值最小为 1.001 5, 最大为 18.59, 设想用查表的办法, 步长至少应为 0.001, 如果编一个大表, 则须用 $18.59 \div 0.001 = 18\ 590$ 个存储单元, 每个存储单元用 2 个字节, 需要 37 180 个字节, 即 36.31 K, 这个表显然太大了。不可能实现。

因此, 应设想编 2 个小表,

(1) A 的取值在 1.001~1.1 之间时, 编为表 2, 步长为 0.001, 须 100 个存储单元, 即 200 个字节。

(2) A 的取值在 1.10~10 之间时, 编为表 3, 步长为 0.1, 须 100 个存储单元即 200 个字节。

(3) 如果 A 的取值大于 10, 则利用公式

$$\lg(X 10^n) = n + \lg X \quad (12)$$

转换为 1.1~10 之间的数字进行查表。

表 2

A	lgA×10 ⁶	A	lgA×10 ⁶
1.001	434(01B2H)	1.076	31 812(7C44)
1.002	868(0364H)	1.077	32 216(7DD8)
1.003	1 301(0515H)	1.078	32 619(7F6B)
⋮	⋮	⋮	⋮
1.072	59 984(EA50)	1.097	40 207(9D0F)
1.073	30 600(7788)	1.098	40 602(9E9A)
1.074	31 004(791C)	1.099	40 998(A026)
1.075	31 408(7AB0)	1.100	41 393(A1B1)

注: 括号内为 16 进制数。

表 3

A	lgA×10 ⁴	A	lgA×10 ⁴
1.1	414(019E)	7.1	8 513(2141)
1.2	792(0318)	7.2	8 573(217D)
1.3	1 139(0473)	7.3	8 633(21B9)
⋮	⋮	⋮	⋮
6.8	8 325(2085)	9.7	9 868(268C)
6.9	8 388(20C4)	9.8	9 912(26B8)
7.0	8 451(2103)	9.9	9 956(26E4)

注: 括号内为 16 进制数。

如果 A 的取值大于 10, 则利用公式(12)转换为 1.1~10 之间的数字, 再进行查表。

例如 A=18.6, 我们可以先变换为 A=1.86×10, 则 $\lg 18.6 = \lg(1.86 \times 10) = 1 + \lg 1.86$ 。

从表 3 中可以查出, $\lg 1.8 = 2553 \times 10^{-4}$,

$$\lg 1.9 = 2788 \times 10^{-4}$$

根据插值定理:

$$f(x_1 + \Delta x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \Delta x \quad (13)$$

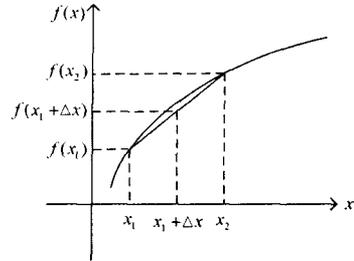


图 1 线性插值算法图示

Fig.1 Illustration of linear interpolation algorithm

可知: $\lg 1.86 = \lg 1.8 + \frac{\lg 1.9 - \lg 1.8}{1.9 - 1.8} \times 0.06 =$

$$2553 \times 10^{-4} + \frac{2788 \times 10^{-4} - 2553 \times 10^{-4}}{0.1} \times 0.06 =$$

$$2694 \times 10^{-4}$$

$\lg 18.6 = 1 + \lg 1.86 = 1 + 2694 \times 10^{-4} = 1.2694 \approx 1.27$ 。其他数均可以按照类似方法进行处理。

4 离散模型精度分析及仿真

为了便于与连续模型作比较, 在以下的仿真计算中均假设过载电流恒定, 且采用标么值。

$$\text{当 } as/(cg) = 35.5\tau, \tau = 2 \text{ s}, t' = 35.5\tau/\lg e, k = 1.07$$

时, 令 $I_p = 0 \text{ p.u.}, I_{th} = 1 \text{ p.u.}, I = 1.001 \sim 1.1 \text{ p.u.}$,

对表 (2) 进行仿真计算得图 2。

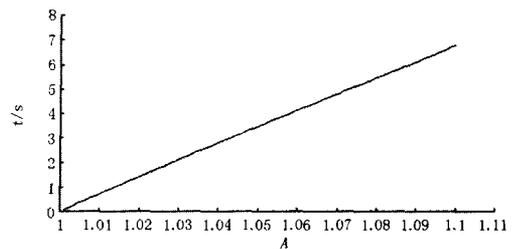


图 2 表 2 所对应的反时限特征曲线

Fig.2 Inverse-time characteristic curves of Tab.2

当 $as/(cg) = 35.5\tau, \tau = 2 \text{ s}, t' = 35.5\tau/\lg e, k = 1.07$

时, 令 $I_p = I_{th} = 1 \text{ p.u.}, I = 1.1 \sim 10 \text{ p.u.}$, 对表 (3) 进行仿真计算得图 3。

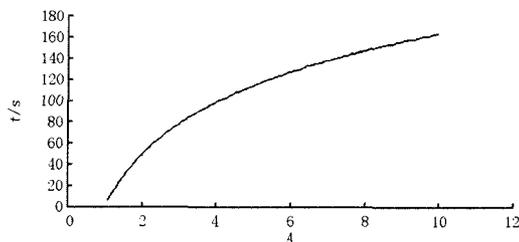
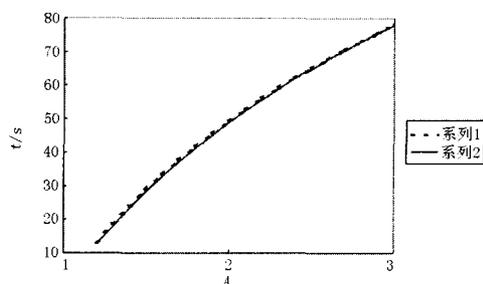


图3 表3所对应的反时限特征曲线

Fig.3 Inverse-time characteristic curves of Tab.3

我们选取1.15, 1.25, 1.35, ..., 2.95作为试验点通过查表和线性插值算法(考虑计算精度)求得各个点对应的动作时间与通过连续模型反时限计算公式(11)所得值进行对比得图4。



注: 系列1为查表值反时限特征曲线, 系列2为真实值反时限特征曲线

图4 试验点所对应的查表值和真实值反时限特征曲线比较

Fig.4 Inverse-time characteristic curves of look-up table values and the true value from test-points

由图4可见, 即使在考虑计算截断误差的情况下, 所提出的查表法仍具有相当高的精度, 完全可以在实际的微机保护装置中应用, 具有较高的实际应用价值。

5 结论

本文主要针对电动机的发热特性提出一种比较接近电动机实际发热曲线的热过载反时限方程及实现方法, 通过分析, 我们可以用不大的硬件资源来实现复杂的保护功能, 可以降低产品的硬件成本, 从而提高产品的竞争力。

参考文献

- [1] 牟龙华, 邢锦磊. 反时限过载保护精确算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 36-39.
MU Long-hua, XING Jin-lei. Precise Algorithm for Inverse-time Overload Protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 36-39.
- [2] 李晓华, 柳焕章. 反时限电流保护应用研究[A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第22届学术年会[C].

南京: 2006.

- [3] 宋斌. 具有不同特性的微机反时限过流继电器的实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 57-59.
SONG Bin. Design of Microprocessor-based Inverse-time over current Relays with Different Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 57-59.
- [4] 祖伟, 姚晴林, 王宝君. 微型反时限过电流继电器的研究[J]. 合肥工业大学学报, 1996, 19(3): 85-90.
ZU Wei, YAO Qing-lin, WANG Bao-jun. Research on Microprocessor-based Relay of Curve Time-overcurrent[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1996, 19(3): 85-90.
- [5] Venkataraman B, Godsey B, Premeriani W, et al. Fundamentals of a Motor Thermal Model and Its Applications in Motor Protection[A]. in: Proceedings of 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers[C]. Kansas: 2005. 127-144.
- [6] Benmouyal G, Meisinger M, Burnworth J, et al. IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for Overcurrent Relays[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 868-872.
- [7] 徐厚东, 黄益庄, 付铭. 微机反时限过流保护算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(1): 1-4.
XU Hou-dong, HUANG Yi-zhuang, FU Ming. Microprocessor-based Inverse Time Over-current Protection Algorithm[J]. Journal of Tsinghua University, Natural Science, 2006, 46(1): 1-4.
- [8] IEEE. IEEE Guide for AC Motor Protection[Z]. IEEE Std C37.96-2000, 2000.
- [9] 黄彦全, 肖建, 蔡勇, 等. 新型微机反时限电流保护时间-电流特性的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 71-73, 85.
HUANG Yan-quan, XIAO Jian, CAI Yong, et al. Application of A New Time-current Characteristics Microcomputer-based Inversetime Overcurrent Relay Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 71-73, 85.
- [10] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays[J]. IEEE Trans on PD, 1999, 14(3).

收稿日期: 2009-06-26

作者简介:

张清枝(1970-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事电力电子技术的研究;

李新雷(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划、调度工作。