

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 14598.149—2016/IEC 60255-149:2013  
代替 GB/T 14598.15—1998

## 量度继电器和保护装置 第 149 部分：电热继电器功能要求

Measuring relays and protection equipment—  
Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays

(IEC 60255-149:2013, IDT)

**杭州高电**  
**专业高试铸典范**

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2016-02-24 发布

2016-09-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

## 目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 功能规范	3
4.1 概述	3
4.2 输入激励量/激励量	3
4.3 开关量输入信号	4
4.4 功能逻辑	4
4.5 开关量输出信号	8
4.6 其他影响热保护的因素	8
4.7 辅助电源故障期间热保护装置的行为	9
5 性能规范	9
5.1 与特性量有关的准确度	9
5.2 与动作时间有关的准确度	9
5.3 频率变化时的性能	10
6 功能试验方法	10
6.1 概述	10
6.2 与动作电流值有关的稳态误差测定	11
6.3 与特性量和动作时间有关的稳态误差测定	11
6.4 特殊的冷却热时间常数的性能	12
6.5 谐波性能	13
6.6 频率变化时的性能	13
6.7 不同环境温度时的性能	14
7 文档要求	14
7.1 型式试验报告	14
7.2 其他用户文档	15
附录 A(资料性附录) 电气设备的简单一阶热模型	16
附录 B(资料性附录) 采用温度作为整定参数的电热继电器	27
参考文献	30

## 前 言

GB/T 14598《量度继电器和保护装置》分为以下若干部分：

- GB/T 14598.1 电气继电器 第 23 部分：触点性能；
- GB/T 14598.2 量度继电器和保护装置 第 1 部分：通用要求；
- GB/T 14598.3 电气继电器 第 5 部分：量度继电器和保护装置的绝缘配合要求和试验；
- GB/T 14598.4 电气继电器 第十四部分：电气继电器触点的寿命试验 触点负载的优先值；
- GB/T 14598.5 电气继电器 第十五部分：电气继电器触点的寿命试验 试验设备的特性规范；
- GB/T 14598.6 电气继电器 第十八部分：有或无通用继电器的尺寸；
- GB/T 14598.7 电气继电器 第 3 部分：它定时限或自定时限的单输入激励量量度继电器；
- GB/T 14598.8 电气继电器 第 20 部分：保护系统；
- GB/T 14598.26 量度继电器和保护装置 第 26 部分：电磁兼容要求；
- GB 14598.27 量度继电器和保护装置 第 27 部分：产品安全要求；
- GB/T 14598.127 量度继电器和保护装置 第 127 部分：过/欠电压保护功能要求；
- GB/T 14598.149 量度继电器和保护装置 第 149 部分：电热继电器功能要求；
- GB/T 14598.151 量度继电器和保护装置 第 151 部分：过/欠电流保护功能要求；
- GB/T 14598.300 微机变压器保护装置通用技术要求；
- GB/T 14598.301 微机型发电机变压器故障录波装置技术要求；
- GB/T 14598.302 弧光保护装置技术要求；
- GB/T 14598.303 数字式电动机综合保护装置通用技术要求。

本部分为 GB/T 14598 的第 149 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 14598.15—1998《电气继电器 第 8 部分：电热继电器》，与 GB/T 14598.15—1998 相比，主要技术变化如下：

- 标准的名称改为“量度继电器和保护装置 第 149 部分：电热继电器功能要求”；
- 增加了功能规范要求，内容包括热保护功能框图、输入激励量、开关量输入信号、功能逻辑、开关量输出信号、其他影响热保护的因素、辅助电源故障期间热保护装置的行为等；
- 引入了“热级”的概念，并规定了热级的计算方法；
- 增加了环境温度对热保护的影响的要求；
- “准确度”改为“性能规范”；
- 详细规定了电热继电器的功能试验方法；
- 增加了文档要求；
- 附录 A 修改为“电气设备的简单一阶热模型”；
- 附录 B 修改为“采用温度作为整定参数的电热继电器”；
- 删除了附录 C。

本部分使用翻译法等同采用 IEC 60255-149:2013《量度继电器和保护装置 第 149 部分：电热继电器功能要求》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 11021—2014 电气绝缘 耐热性和表示方法(IEC 60085:2007, IDT)；

GB/T 14598.149—2016/IEC 60255-149:2013

——GB/T 14598.2—2011 量度继电器和保护装置 第1部分:通用要求(IEC 60255-1:2009, IDT)。

本部分在技术上与 IEC 60255-149:2013 一致,做了下述编辑性修改:

——在正文中提及了资料性附录 B;

——修改了式(B.9)的编辑错误。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国度量继电器和保护设备标准化技术委员会(SAC/TC 154)归口。

本部分起草单位:积成电子股份有限公司、北京紫光测控有限公司、南京南瑞继保电气有限公司、北京四方继保自动化股份有限公司、许昌开普检测技术有限公司、许继电气股份有限公司、国电南京自动化股份有限公司、许昌开普电气研究院、东方电子股份有限公司、珠海万力达电气自动化有限公司、长园深瑞继保自动化有限公司、ABB(中国)有限公司、施耐德电气(中国)有限公司、河北北恒电气科技有限公司、江苏金智科技股份有限公司。

本部分主要起草人:袁文广、葛荣尚、余群兵、戴晨翔、刘桂兰、刘永欣、李明、朱志伟、邓迎君、权宪军、王薛东、李燕、刘建凯、田建军、仲伟、易永辉、蒋冠前、杨静。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

——GB/T 14598.15—1998。



## 量度继电器和保护装置

### 第 149 部分：电热继电器功能要求

#### 1 范围

GB/T 14598 的本部分规定了热保护继电器的最低要求。本部分包括保护功能、测量特性和测试方法的规范。

本部分的目的是建立一个通用的可重复使用的基准来评价通过测量流经被保护设备的交流电流来保护该设备不受电热损伤的变时限继电器。补充的输入激励量(如周围环境、冷却液、最高油温和绕组温度)可适用于本部分规定的热保护规范。本部分包括基于具有记忆功能的热模型的保护继电器。

本部分还包括热保护功能的性能特性和准确度的试验方法。

本部分不包含 IEC 60947-4-1 和 IEC 60947-4-2 中规定的涉及低压电动机启动器的机电式和电子式保护装置的热过负荷保护跳闸类。

本部分涵盖的热保护功能如下：

保护功能	IEC 61850-7-4	IEEE C37.2
热过负荷保护	PTTR	49
转子热过负荷保护	PROL	49R
定子热过负荷保护	PSOL	49S

量度继电器和保护装置的通用要求按 IEC 60255-1 的规定。

#### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050(所有部分) 国际电工词汇(International electrotechnical vocabulary)

IEC 60085 电气绝缘 耐热性和表示表示方法(Electrical insulation—Thermal evaluation and designation)

IEC 60255-1 量度继电器和保护装置 第 1 部分:通用要求(Measuring relays and protection equipment—Part 1:Common requirements)

IEC 61850-7-4 电力自动化通信网络和系统 第 7-4 部分:基本通信结构 兼容性逻辑节点类和数据类(Communication networks and systems for power utility automation—Part 7-4: Basic communication structure—Compatible logical node classes and data classes)

#### 3 术语和定义

IEC 60050-447 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

**热态曲线 hot curve**

对具有全记忆功能的电热继电器,把过负荷发生以前规定的稳态负荷电流的热效应考虑在内,表示规定的动作时间和电流之间关系的特性曲线。

注:热态曲线是用特定的时间-电流曲线来表示一阶热系统微分方程,假设一确定的恒定过负荷电流和一确定的预负荷电流。

3.2

**冷态曲线 cold curve**

对于电热继电器,当继电器在过负荷发生之前处于无负荷电流的基准和稳态条件时,表示规定的动作时间和电流之间关系的特性曲线。

注:冷态曲线是用特定的时间-电流曲线来表示一阶热系统微分方程,假设一确定的没有预负荷的恒定过负荷电流。

3.3

**基准电流 basic current**

$I_B$

继电器不动作所要求的规定的电流极限值。

注:基准电流作为定义电热继电器动作特性的基准。电热保护功能的基本定值由保护装置的基准电流( $I_B$ )和热时间常数( $\tau$ )组成。

3.4

**等效发热电流 equivalent heating current**

$I_{eq}$

考虑附加发热源的电流,如不平衡电流和/或谐波电流。

3.5

**因子  $k$  factor  $k$**

热保护装置的最大允许连续工作电流和基准电流( $I_B$ )的比值,用于热特性功能。

注:因子  $k$  表示被保护设备的相电流(满负荷)和基准(标称)电流之间的最大允许常数。

3.6

**原负荷比 previous load ratio**

规定条件下,过负荷之前的负荷电流与基准电流之比。

3.7

**基准极限误差 reference limiting error**

基准条件下确定的极限误差。

[IEC 60050:2010,定义 447-08-07]

3.8

**温升 temperature rise**

所考虑部分的温度与基准温度的差。

注:举例说明基准温度可以是环境空气温度或冷却液温度。

[IEC 60050:2001,定义 151-16-26]

3.9

**热平衡 thermal equilibrium**

当设备某些部件的温升变化梯度不超过每小时 2 K 时的热状态。

[IEC 60050:1996,定义 411-51-08]

3.10

**热时间常数 thermal time constant**

$T_{th}$

随着电流的逐步增加,被保护设备相对于初始温度的温升达到最终渐近值的 63.2% 时所用的时间。

注:举例说明初始温度可以是环境温度。

## 3.11

## 热级 thermal level

 $H$ 

表示设备所估算的实际温升与设备工作在最大电流( $k \times I_B$ )期间内且足以使设备达到热平衡的设备温升的百分比。

## 4 功能规范

## 4.1 概述

热保护功能的一个例子如图 1 所示,包括输入激励量、开关量输入信号、动作(跳闸)、告警和其他开关量输出,功能逻辑包括测量元件、热级计算、设置、阈值。制造厂应提供热保护的具体实现的功能框图。

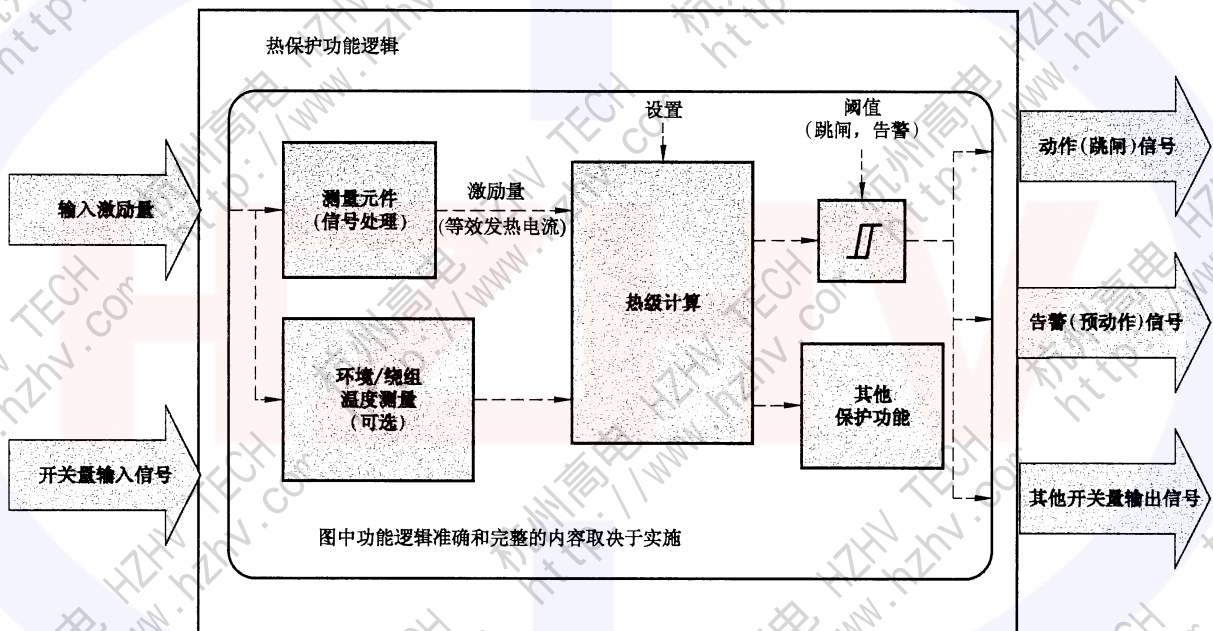


图 1 简化的热保护功能框图

## 4.2 输入激励量/激励量

输入激励量为测量信号,例如相(或者线)电流、周围环境温度或绕组温度(如果需要或者适用)。其额定参数和相关要求按 IEC 60255-1 的规定。

热保护功能逻辑的输入激励量,既可以用硬接线从电流互感器和任一附加输入量引入,比如周围环境温度、绕组温度,也可以采用某种通信规约(如 IEC 61850-9-2)的数据包从通信接口引入。

热保护功能的输入激励量不一定是直接来自电流互感器的二次电流。因此,保护继电器说明书应声明保护功能所用的激励量类型。

举例说明输入激励量有:

- 单相电流测量值;
- 三相电流测量值;



- 正序和负序电流测量值；
- 绕组或环境温度传感器值。

注：被热保护的设备的环境温度、冷却液温度、最高油温、绕组温度由温度传感器测量，比如电阻温度探测器（RTD），其值可用于修正本部分规定的热级的计算。一阶热模型算法可以用这些温度传感器的输出信号或值来考虑影响和补偿计算热级（基于等效发热电流和发热时间常数）。

### 4.3 开关量输入信号

如果采用任何（外部或内部驱动的）开关量输入信号，他们对保护功能的影响都应在功能逻辑框图上明确标示，必要时可附加文字说明。如果能进一步明确输入信号的功能和预期的应用或实现，也可提供附加文字描述。

开关量输入信号可有许多不同的来源。例如包括：

- 传统的有线物理输入；
- 通过与外部设备连接的通信端口；
- 通过与继电器内的其他功能元件的内部逻辑连接。

除非有运行要求，否则接收信号的方法是无关紧要的。

物理开关量输入信号的定义、额定参数和标准按 IEC 60255-1 的规定。

以下例子是开关量信号在热保护中的应用：

- a) 当被热保护功能保护的设备是以两种模式运行时，比如自然或强制通风的电力变压器、双速电机或星形/三角形启动电机，开关量输入可用于区分不同的运行模式，并为不同的热保护应用程序选择相应的设置；
- b) 开关量输入的另一个例子是在测试/调试程序期间实现热记忆复位功能，使用的开关量输入可以来自直接硬接线或数据通信。

## 4.4 功能逻辑

### 4.4.1 等效发热电流

等效发热电流  $I_{eq}$  需要考虑到额外的发热源，如不平衡电流和/或谐波。等效发热电流的测量类型应在保护继电器文档中予以说明。

对于均方根测量，制造厂应指明均方根电流测量的带宽，并定义等效发热电流计算中包括哪些谐波。

附录 A 给出了等效发热电流定义的一个解释，并给出电气设备的热保护应用的多种实施案例。

### 4.4.2 热保护的基准（整定）和动作电流值

针对电热继电器，基准（整定）电流值  $I_B$  是指继电器不动作所要求的规定的电流极限值。在电机或变压器应用中，基准电流通常设置为被保护设备的额定电流。

考虑到被保护设备的最大持续负荷电流，通过基准（整定）电流值和因子  $k$  来确定热保护的動作电流。

因此数值  $k \times I_B$  定义了热保护继电器的动作电流。其中：

- $k$  ——可是一个常数或者用户整定值，由热继电器制造厂规定；
- $I_B$  ——表示为被热保护的设备允许的电流的基准（整定）电流值。

通过使用因子  $k$ ，当相电流等于整定值  $I_B$  时热继电器保证不动作。如果  $k$  是用户整定的，其范围至少是从 1.0~1.5。在电机或变压器的应用中， $k$  值通常由用户整定， $k \times I_B$  小于或等于被热保护的设备的最大运行（满负荷）电流。对于没有因子  $k$  整定项的继电器（假设固定为 1.0），宜根据因子  $k$  调整  $I_B$  的整定。



在某些情况下,制造厂会给出一个合适的  $k$  值,该值等于电热继电器的电流测量的准确度。这确保热继电器在工作电流为  $I_B$  时应不动作。在这种情况下,基准电流  $I_B$  的整定值能与被保护设备的过负荷电流和额定电流的比值相适应。

#### 4.4.3 热级计算

被保护设备的热级计算基于等效发热相电流测量和一阶热模型的离散微分方程的递推计算。被保护设备的热级  $H(t)$  的计算见式(1):

$$H(t) = \left[ \frac{I_{eq}(t)}{k \cdot I_B} \right]^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$H(t)$  ——  $t$  时刻的热级;

$H(t - \Delta t)$  ——  $(t - \Delta t)$  时刻的热级;

$\Delta t$  —— 采样周期,即两个连续的输入电流采样的时间间隔;

$I_{eq}(t)$  ——  $t$  时刻的等效发热相电流(见 4.4.1 和附录 A);

$k \cdot I_B$  —— 最大持续电流值,包括因子  $k$ ;

$\tau$  —— 被热保护的设备的发热/冷却热时间常数,假设  $\tau \gg \Delta t$ 。

附录 A 中给出了一个简单一阶热系统的微分、时间-电流方程和动态特性的详细推导。

对于一特定稳态情况  $I_{eq}$  为恒定,热级  $H$  可用下列特殊的简化式(2)计算:

$$H = \left( \frac{I_{eq}}{k \cdot I_B} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

当热级达到 100% 最大热级阈值时,电热继电器动作。

根据被热保护的电气设备的结构设计,发热热时间常数和冷却热时间常数有不同的值。例如,对于电动机保护应用,由于电动机运行时的转子转动和自通风作用,发热热时间常数要小于冷却热时间常数。在这些情况下,热级是用以下的方程根据两种不同热时间常数的相电流水平计算的。

如果  $I_{eq}(t) \geq 0$  [或者  $I_{eq}(t)$  大于热继电器制造厂规定的固定的输入电流阈值],热级通过式(3)计算:

$$H(t) = \left( \frac{I_{eq}(t)}{k \cdot I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

如果  $I_{eq}(t) \approx 0$  [或者  $I_{eq}(t)$  小于热继电器制造厂规定的固定的输入电流阈值],热级通过式(4)计算:

$$H(t) = \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\tau_1$  —— 被热保护的设备的发热热时间常数;

$\tau_2$  —— 被热保护的设备的冷却热时间常数。

注 1: 通常情况下,  $\tau_1$  用于被保护设备通电时,  $\tau_2$  用于被保护设备断电时。

注 2: 当设备通电和相电流降低到一个低水平并引起设备热级降低和设备温度下降时,也要用到发热热时间常数  $\tau_1$ 。

注 3: 制造厂可执行多个发热和冷却热时间常数以应对不同的发热和冷却条件。例如,在线直接启动的电机在启动后,在转子低速转动或停转时冷却性能降低,用于热模型的时间常数可以修改(或减少),然后当转速正常时回到一个较大的时间常数。

对于大部分的热保护应用,比如自通风式电动机和发电机、双速电机、星形/三角形启动的电机,热时间常数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  是不同的。对于其他的一些应用,比如分离式、带独立强制通风或冷却系统的电机、带或不带强制通风冷却系统的电力变压器、电缆、电容,热时间常数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  可以相等。某些特定的应

用,比如双速电机或者星形/三角形启动的电机,可用额外的热时间常数。

#### 4.4.4 时间电流限制特性方程和曲线

##### 4.4.4.1 概述

继电器制造厂应以方程的形式或者图形的方法发布时间-电流特性。以下给出了一个简单热模型的热态和冷态时间-电流方程。

##### 4.4.4.2 冷态曲线

热保护继电器的冷态曲线为下列条件下一阶微分方程式(1)的特殊解:

——开始于过负荷发生前无负荷电流时的热级。因此,设备温度可被看做外界温度,设备热级可被看做等于0;

——过负荷时相电流恒定。

冷态时间-电流限制特性由时间-电流方程式(5)给出:

$$t(I_{eq}) = \tau \cdot \ln\left(\frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - (k \cdot I_B)^2}\right) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$t(I_{eq})$ ——当恒定相电流  $I_{eq}$  且过负荷发生前无负荷电流时的理论动作时间;

$I_{eq}$  ——等效发热电流;

$\tau$  ——被保护设备的发热热时间常数;

$k$  ——一个常数(固定)值或者整定值,由热继电器制造厂规定的;

$I_B$  ——被热保护的允许的设备电流的基准电流值。

过负荷发生前无负荷时,一阶热系统的冷态时间-电流特性曲线的一个典型例子如图2所示。

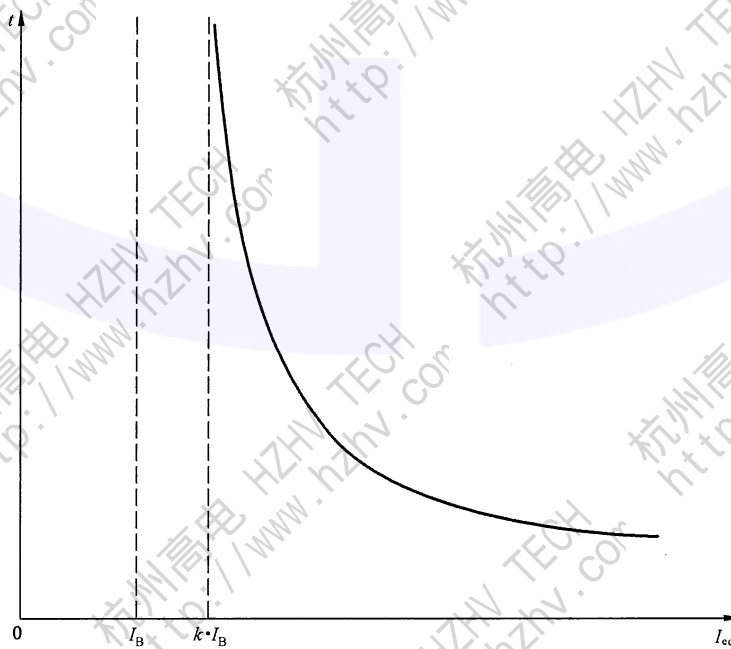


图2 过负荷发生前无负荷时一阶热系统冷态特性曲线典型示例

附录 A 中给出了一阶热系统的详细的微分方程推导、算法、动态特性和冷态时间-电流特性解。

#### 4.4.4.3 热态曲线

热保护继电器的热态曲线是一阶微分方程式(1)的特殊解,由时间-电流方程式(6)给出:

$$t(I_{eq}) = \tau \cdot \ln\left(\frac{I_{eq}^2 - I_p^2}{I_{eq}^2 - (k \cdot I_B)^2}\right) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$t(I_{eq})$ ——当恒定相电流  $I_{eq}$  且过负荷发生前的电流  $I_p$  恒定时的理论动作时间;

$I_{eq}$  ——等效发热电流;

$I_p$  ——过负荷之前的稳态负荷电流,在持续的一段时间内使得热级恒定(持续的时间大于几个发热热时间常数  $\tau$ );  $I_p = 0$  的结果是冷态曲线;

$\tau$  ——被保护设备的发热热时间常数;

$k$  ——一个常数(固定)值或整定值,由热继电器制造厂规定的;

$I_B$  ——被热保护的设备允许的电流的基准电流值。

继电器制造厂可以发布热跳闸曲线,如下面给出的以原负荷比  $P$  为参数的例子,式(7)描述了原负荷比:

$$p = \frac{I_p}{I_B} \dots\dots\dots (7)$$

一阶热系统在过负荷发生前不同的原负荷值时的热态时间-电流特性曲线的典型例子如图 3 所示。

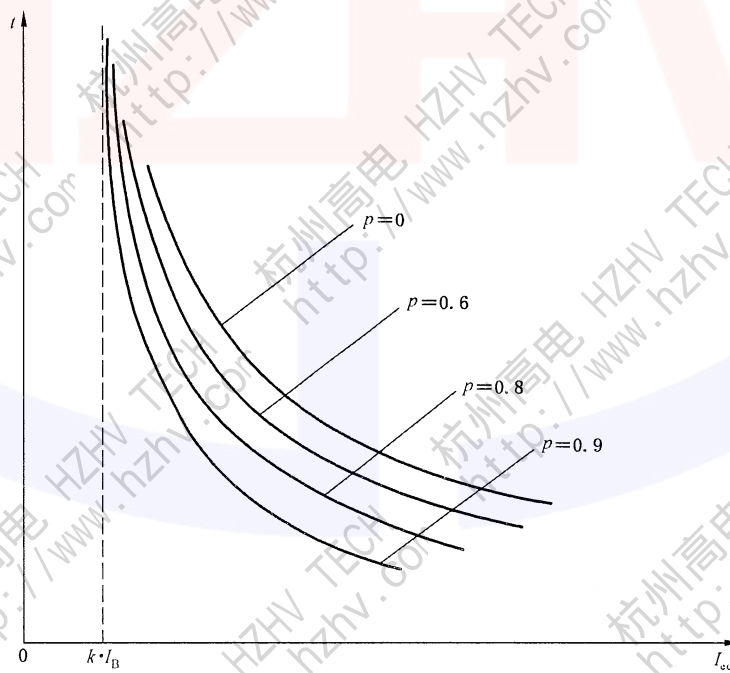


图 3 过负荷发生前不同原负荷值时一阶热系统热态特性曲线典型示例

附录 A 中给出了一阶热系统的详细的微分方程推导、算法、动态特性和热态时间-电流特性解。

#### 4.4.5 热级告警阈值

具有告警阈值的热保护继电器在热级超过预设的告警阈值时能输出告警信号。该阈值可规定为被保护设备的标称(额定)热极限的百分数。



标称(额定)热极限( $H_{\text{nominal}}=100\%$ )是指被保护设备避免其过热的可连续耐受的最大热级。超过允许极限的过热可能会损害绝缘系统材料成分的化学/物理性能,降低其预期寿命。

如果提供预定的过负荷警告阈值,则他至少应介于标称(额定)热极限的50%~100%。

注1:设备环境温度水平可以补偿热级 $H$ ,式(8)和式(9)给出详述。

注2:对于电动机热保护的应用,由热保护装置使用本部分中的方程测量的实际热级,在热态情况下电动机动作后处于停止状态(静止)时,可作为再启动闭锁信号使用,也可作为再启动闭锁保护功能(功能66)的输入基准。对于此应用,热保护装置能显示允许电动机下次启动的剩余时间,考虑到停止状态的电动机的冷却热时间常数、电动机停止时的实际热级和电动机启动所需的估计出或者计算出的热级(基于电机发热时间常数、启动电流和启动时间)。

## 4.5 开关量输出信号

### 4.5.1 概述

本功能的开关量输出信号可以有許多不同的形式,举例说明包括:

- 从物理继电器输出触点的传统有线;
- 通过通信端口向外部设备;
- 继电器内通过内部逻辑连接向其他功能元件。

除非有功能要求,否则提供信号的方法是无关紧要的。

物理开关量输出信号的定义、额定参数和标准按 IEC 60255-1 的规定。

### 4.5.2 动作(跳闸)输出信号

当计算出的在式(1)中定义的热级 $H(t)$ 超过被热保护的设备标称(额定)热级的100%时,测量和阈值元件输出动作(跳闸)信号。

注:当计算出的三相中的任一相的热级超过标称热级时跳闸信号动作。

### 4.5.3 告警信号

当计算出的在式(1)中定义的热级 $H(t)$ 超过预先指定的过负荷警告阈值时,测量和阈值元件输出告警信号。

### 4.5.4 其他开关量输出信号

如果有任何可用的其他开关量输出信号,其动作方法应在功能逻辑图上或保护设备制造厂文档中明确示出。如果能进一步阐明输出信号的功能和的预期用途,还需提供附加的文字说明。

## 4.6 其他影响热保护的因素

### 4.6.1 概述

制造厂应声明继电器使用的任何特殊算法。制造厂应在热保护设备的文档中描述这些算法。

例如,如果热保护继电器具有温度测量元件,则热保护功能可考虑周围环境温度或者冷却液温度。以下章节描述了环境温度补偿的一个可能的实现方式,当然也可以使用其他方法。

### 4.6.2 环境温度对热保护的影响

像电动机或电力变压器这样的机电设备,设计在规定的环境温度范围内运行。如果设备在超过规定的周围环境温度中运行时,即使是运行在额定负荷和等效发热电流情况下,绕组可能过热并绝缘劣化。这种情况下,通过直接测量周围环境温度来补偿或修正设备所计算出的热级有利于维持足够的热

保护。

通常被保护设备的设计限值(或者最高周围环境温度)是 40 °C 区域。当周围环境温度测量值不同于此设计限值时,热级  $H(t)$  能由系数  $F_a$  来补偿,其定义见式(8):

$$F_a = \frac{T_{\max} - T_{\text{limit}}}{T_{\max} - T_a} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$T_{\max}$  ——设备最高温度(根据 IEC 60085 规定的设备绝缘耐热等级);

$T_a$  ——设备实际周围环境(外界)温度,由热保护继电器测量得到;

$T_{\text{limit}}$  ——运行在额定负荷下不会引起热绝缘劣化的周围环境温度的设计限值,通常为 40 °C。

对于具有温度传感器和温度修正系数的热保护继电器,热级  $H(t)$  由式(9)计算:

$$H(t) = \left[ \frac{I_{\text{eq}}(t)}{k \cdot I_B} \right]^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot F_a + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t) \dots\dots\dots (9)$$

附录 A 给出了环境温度系数  $F_a$  的详细推导过程。

#### 4.6.3 热复位功能

在热元件的试验中,最好是可以强制热元件完全复位到 0 或者其他已知的值。如果这种方式可行,宜在继电器文档中以功能框图的形式明确指明操作方法、性能和其他所有相关的设置。

#### 4.7 辅助电源故障期间热保护装置的行为

热保护功能使用递推方程连续的计算和在热记忆中存储热级值。

继电器制造厂应在保护装置文档中明确的定义和规定装置激励时的热记忆状态。

某些情况下,热记忆的起始水平由可设置的一个参数确定。根据热保护装置的设置,被保护设备存储的热级宜或者复位到 0(辅助电源发生故障期间),或者存储到非易失性存储器中,这样电源故障时可以维持之前的热级。

制造厂应在保护装置文档中声明在电源故障期间用户设置和出厂(默认)设置的热级行为。

### 5 性能规范

#### 5.1 与特性量有关的准确度

制造厂应声明在动作值  $k \times I_B$  适用的定值范围内与特性量有关的准确度。

应规定电热继电器提供的  $k$  的范围(例如  $1.0 \leq k \leq 1.5$ )。在  $I_B$  下热计算时,制造厂应证明继电器不会由于电流和温度的测量误差动作。

对于带环境温度测量功能的,制造厂应声明环境温度测量对特性量准确度的影响。为避免特性量和环境温度同时发生变化的组合情况,应分别规定环境温度测量值  $T_a$  低于 40 °C 的某个值和高于 40 °C 的某个值(例如  $T_a = 0$  °C 和  $T_a = 0.5 T_{\max}$ )时的准确度。

#### 5.2 与动作时间有关的准确度

制造厂应声明时间-电流特性的有效范围( $I_{\min} \leq I_{\text{eq}} \leq I_{\max}$ )。  $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  应由制造厂规定,且  $I_{\min}$  应在  $k \times I_B$  和  $1.2 \times k \times I_B$  之间。当  $I_{\text{eq}} = I_{\min}$  时,动作时间有最大值。当  $I_{\text{eq}} = I_{\max}$  时,动作时间有最小值。在此有效范围内规定特性量的准确度。另外,制造厂还应声明在此有效范围之外的高故障电流的功能行为(例如功能被闭锁或  $I_{\text{eq}}$  被限制为  $I_{\max}$ )。

基准极限误差由制造厂声明的给定误差确定,其可以与对应不同特性量值的系数相乘。给定误差值应规定为有效范围的最大值( $I_{\max}$ )时的误差。基准极限误差也可规定为:

- 1) 在特性量的有效范围内时间理论曲线由多个定值绘制而成,由分别代表最大限值和最小限值的两条极限误差曲线所限定;或者
- 2) 在时间-电流特性有效范围的最大限值处的给定误差乘以在时间-电流特性有效范围内不同特性量值对应的系数,见表 1。

表 1 极限误差作为给定误差倍数

特性量值作为整定值( $k \times I_B$ )的倍数	1.2~1.5	1.5~2	2~ $I_{max}$
极限误差作为给定误差的倍数	2.5	1.5	1

注:特性量根据提供的热保护种类的不同而不同。例如在电机热保护中可能是含或不含负序分量的相电流。

制造厂应声明延时定值是否包含特性量的内部测量时间和输出触点的动作时间。

标称准确度应基于额定频率的正弦输入来定义,制造厂还需声明谐波对特性量的影响和满足标称准确度时的工作频率范围。另外,制造厂应声明在特性量计算中是否包含谐波。

### 5.3 频率变化时的性能

这些试验的目的是验证当激励量的频率偏离额整定值时继电器的性能。从  $f_{min}$  到  $f_{max}$  频率偏离的影响由特性量频率在  $f_{min}$  和  $f_{max}$  之间变化时的试验准确度决定。

## 6 功能试验方法

### 6.1 概述

本章所描述的试验为型式试验。这些试验应规定检验热保护继电器的硬件和固件(如果适用)的所有方面的试验方法。这表示电流应从继电器的接口输入,或直接从常规电流互感器输入端子输入,或以等效信号从适当的接口输入。

制造厂应清楚地说明该保护装置性能试验中用到的试验方法、步骤、结构以及试验配置。

只要适用,型式试验应考虑像环境温度测量输入、复位输入等其他有影响的输入量或电源故障功能。同样,动作应尽可能从合适的输出触点或以等效信号从适当接口输出。

继电器的准确度应在稳态条件下确定。输入特性量应为额定频率的正弦波,其幅值应根据试验要求而变化。

当确定谐波的影响时,输入特性量应是在额定频率基波信号上叠加的正弦信号,其大小应随试验要求而变化。

当确定异常频率影响时,输入特性量应是一个所需测试频率处的正弦信号,其大小应随试验要求而变化。

根据 IEC 60255-1,每一个与准确度相关的试验点应重复 5 次以确保结果的可重复性,并用所有试验的最大误差和平均误差来表示准确度。宜使用足够多的试验点来评估装置在整个整定值范围内的性能,至少应使用 3 个整定值。首选的整定值如下:最小整定值(或整定值范围的 0%);50%;最大整定值(或整定值范围的 100%)。

下列条款中,使用的试验整定值以可用范围的百分数表示,0%代表最小有效整定值,100%代表最大有效整定值。同样,50%宜代表可用有效范围中点的值。使用的实际整定值能用式(10)计算出:

$$S_{AV} = (S_{MAX} - S_{MIN})X + S_{MIN} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

$S_{AV}$  —— 试验中使用的实际整定值;



- $S_{MAX}$ ——最大有效整定值；  
 $S_{MIN}$ ——最小有效整定值；  
 $X$ ——在试验方法中表示试验点的百分数值。

## 6.2 与动作电流值有关的稳态误差测定

由于接近阈值动作时间太长,要直接验证动作电流值  $k \times I_B$  的准确度并不容易。然而,可通过以下试验来核对热继电器不动作的基准电流值  $I_B$  这一特定极限值。

对热继电器施加一个电流值为  $I_B$  的电流,施加时间大于 10 倍发热热时间常数整定值,监视元件的动作输出触点,不应发生跳闸。

该试验应按照以下设置进行:

- 整定值范围内发热热时间常数的最小值;
- 若因子  $k$  是一个整定值, $k$  被设置为制造厂指定的准确度等级(假如指定准确度等级为 5%,因子  $k$  就被设置为 1.05);
- 若因子  $k$  是一个固定值,通常定义为涵盖电流测试准确度的值以确保连续施加电流  $I_B$  不动作。在  $k$  是一个等于 1 的固定值的特殊情况下,电流应按照指定准确度等级减小(假如指定准确度等级为 5%,输入电流等于  $0.95 \times I_B$ );
- 基准电流  $I_B$  设置 3 个试验点:最小整定值(或整定值范围的 0%);50%;最大整定值(或整定值范围的 100%)。

该试验与先前有无热级无关。在连续施加电流(10 倍发热热时间常数)后,先前热级的影响不重要。

试验结束后,如果继电器显示了被保护设备的热级,热级应小于 100%。

## 6.3 与特性量和动作时间有关的稳态误差测定

### 6.3.1 冷态曲线准确度的测定

对指定冷态曲线的检验也要间接地检验特性量和动作时间的规定准确度。为了确定冷态曲线的响应值,热保护继电器的热模型应在施加计算试验信号前即刻重置。

根据式(5),在分布于热特性有效区间内的各种电流值上,通过足够多的试验点来评估冷态曲线在基准电流和发热热时间常数整定范围内的性能。记录的动作输出触点时间提供了一个冷态曲线动作时间准确度的衡量。表 2 中给出了几个建议的试验点。除了最小热时间常数处的每一个试验点应进行至少 5 次试验以确保结果的可重复性之外,每一个试验点应进行一次测试,并且将所有试验的最大和平均误差值来表示准确度。

如果因子  $k$  是一个整定值,动作电流值被定义为基准电流  $I_B$  和因子  $k$  在各自整定值范围内的乘积。例如,假设基准电流  $I_B$  的有效范围是 1 A~5 A,系数  $k$  的有效范围是 1.0~1.5,用到的实际动作电流值为 1 A、3.75 A、7.5 A。

如果表 2 中给定的试验点超过了被测设备的有效范围,试验只会持续执行到特性量允许的最大值。所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间准确度范围。

试验条件:输入电流应从零突变到  $I_B$  的适当倍数。在重新施加电流前,应允许继电器有足够的时间返回至初始状态。

可通过逻辑输入或修改设置强制复位每个试验点的热记忆来减少冷态曲线的试验时间。

表 2 冷态曲线试验点

动作电流值 $k \times I_B$	发热热时间常数 $\tau_1$	初始试验电流值	终了试验电流值
最小值(0%)的 $I_B$ 和 $k$	最小值(0%)	0	$1.2 \times k \times I_B$
50%的 $I_B$ 和 $k$	50%	0	$1.6 \times k \times I_B$
最大值(100%)的 $I_B$ 和 $k$	最大值(100%)	0	$2 \times k \times I_B$
—	—	0	$5 \times k \times I_B$
—	—	0	$10 \times k \times I_B$

注：试验点总数为 45(共重复试验 105 次)。终了试验电流值的 5 个试验点，乘以 3 个整定的动作电流值( $k \times I_B$ )，再乘以 3 个整定的热时间常数。

6.3.2 热态曲线准确度的测定

对指定热态曲线的检验也要间接地检验特性量和动作时间的规定准确度。试验按照至少 5 种不同的预负荷等级(10%、30%、50%、70%、90%)来进行。

通过这些试验来确定预负荷等级对动作时间(热态曲线)的影响。试验点用动作电流和发热热时间常数( $\tau_1$ )的一个整定值来完成。试验点如表 3 所示,每一个试验点都应进行一次试验。

表 3 热态曲线测试点

动作电流值 $k \times I_B$	发热热时间常数 $\tau_1$	预负荷等级 ( $I_p$ 的%)	终了试验电流值
50%的 $I_B$ 和 $k$	50%	10%	$1.2 \times k \times I_B$
—	—	30%	$1.6 \times k \times I_B$
—	—	50%	$2 \times k \times I_B$
—	—	70%	$5 \times k \times I_B$
—	—	90%	$10 \times k \times I_B$

注：共有 25 个试验点；5 个终了试验电流值乘以 5 个预负荷等级。

如果表 3 中给定的试验点超过了被测设备的有效范围,试验只会持续执行到特性量允许的最大值。所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间准确度范围。

试验条件:给保护装置施加与预负荷水平相应的等效电流一定的时间,使继电器在该点上达到热平衡,然后再给保护装置施加适当倍数的基准电流  $I_B$ 。

在进行下一步试验前,应使保护装置按制造厂规定的足够时间返回并稳定在先前负荷电流下。

6.4 特殊的冷却热时间常数的性能

如果继电器使用不同的发热和冷却热时间常数( $\tau_1$  和  $\tau_2$ ),应执行以下的测试。

给热继电器施加大于动作电流值  $k \times I_B$  的电流直到动作。当继电器动作时,切断施加电流一个  $T_{cooling}$  时间。在  $T_{cooling}$  时间后,给热继电器再次施加大于动作电流值  $k \times I_B$  的电流  $I_{fault}$ 。记录从施加电流  $I_{fault}$  到输出触点动作的时间  $T_{fault}$ ,应等于式(11)计算的值。

$$T_{fault} = \tau_1 \cdot \ln \left[ \frac{I_{fault}^2 - (k \cdot I_B)^2 \cdot e^{(-T_{cooling}/\tau_2)}}{I_{fault}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right] \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- $\tau_1$  —— 被热保护的设备的发热热时间常数；  
 $\tau_2$  —— 被热保护的设备的冷却热时间常数；  
 $I_{\text{fault}}$  —— 冷却期后施加到热继电器的电流；  
 $T_{\text{cooling}}$  —— 过负荷之前冷却持续时间；  
 $k \cdot I_B$  —— 动作电流值。

冷却热时间常数  $\tau_2$  应使用两个不同的整定值(0%和 50%)按以下条件进行试验：

- 动作电流值( $k \times I_B$ )应整定为整定值范围的 50%；
- 发热热时间常数( $\tau_1$ )整定为整定值范围的 50%；
- 电流  $I_{\text{fault}}$  应等于 2 倍的动作电流值( $k \times I_B$ )。

所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间的准确度范围。

### 6.5 谐波性能

当特性量包含 10% 的 3 次谐波时,应至少进行一个冷态曲线的曲线试验。

当特性量包含 25% 的 5 次谐波时,应至少进行一个冷态曲线的曲线试验。

当特性量包含 15% 的 7 次谐波时,应至少进行一个冷态曲线的曲线试验。

谐波百分比建立在基波和谐波分量的相角为 0 时的基波频率分量基础之上。表 4 中给出 3 个建议的试验点。

表 4 谐波冷态曲线试验点

动作电流值 $k \times I_B$	发热热时间常数 $\tau_1$	初始试验电流值	终了试验电流值
50% 的 $I_B$ 和 $k$	最小值(0%)	0	$1.2 \times k \times I_B$
—	—	0	$2 \times k \times I_B$
—	—	0	$10 \times k \times I_B$

如果表 4 中给定的试验点超过了被测设备的有效范围,试验只会持续执行到特性量允许的最大值。所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间准确度范围。

### 6.6 频率变化时的性能

当特性量基波频率设定为制造厂规定的  $f_{\text{min}}$  时,应至少进行一个冷态曲线的曲线试验。

当特性量基波频率设定为制造厂规定的  $f_{\text{max}}$  时,应至少进行一个冷态曲线的曲线试验。

表 5 中给出了 3 个建议试验点。

表 5 频率变化期间的冷态曲线试验点

动作电流值 $k \times I_B$	发热热时间常数 $\tau_1$	初始试验电流值	终了试验电流值
50% 的 $I_B$ 和 $k$	最小值(0%)	0	$1.2 \times k \times I_B$
—	—	0	$2 \times k \times I_B$
—	—	0	$10 \times k \times I_B$

如果表 5 中给定的试验点超过了被测设备的有效范围,试验只会持续执行到特性量允许的最大值。



所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间准确度范围。

### 6.7 不同环境温度时的性能

如果热保护继电器装有测量被保护设备环境温度的温度传感器时,为检验考虑式(9)中界定的因数  $F_a$  的热级计算,应进行以下试验。

6.3 中描述的试验条件如下:

- 被保护设备的热绝缘级别:  $F - T_{\max} = 155 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 周围环境温度的两个试验点:  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
——  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  试验点时, 因数  $F_a = 0.852$ ;  
——  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  试验点时, 因数  $F_a = 1.21$ ;
- 两种周围环境温度下, 冷态曲线(见表 2)的试验使用以下的整定值:  
——动作电流值( $k \times I_B$ ):  $50\%$ ;  
——发热热时间常数( $\tau_1$ ):  $50\%$ ;
- 两种周围环境温度下, 热态曲线(见表 3)的试验使用以下的整定值:  
——动作电流值( $k \times I_B$ ):  $50\%$ ;  
——发热热时间常数( $\tau_1$ ):  $50\%$ ;  
——预负荷等级:  $50\%$ 。

带有因数  $F_a$  的冷态和热态时间电流极限特性由式(12)给出:

$$t(I_{\text{eq}}) = \tau \cdot \ln \left[ \frac{F_a \cdot I_{\text{eq}}^2 - I_p^2}{F_a \cdot I_{\text{eq}}^2 - (k \cdot I_B)^2} \right] \dots\dots\dots (12)$$

式中:

- $t(I_{\text{eq}})$  ——相电流恒定时  $I_{\text{eq}}$  对应的理论动作时间;
- $I_{\text{eq}}$  ——终了试验时等效发热电流值;
- $\tau$  ——被保护设备的发热热时间常数;
- $k$  ——常量或者整定值, 由热保护继电器制造厂来规定;
- $I_B$  ——基准电流值, 即被保护设备允许的电流值;
- $I_p$  ——过负荷之前的稳态负荷电流(冷态曲线中  $I_p = 0$ )。

所有的试验点都不应超出规定的特性量和动作时间准确度范围。

## 7 文档要求

### 7.1 型式试验报告

本部分中描述的功能元件型式试验报告应符合 IEC 60255-1。

至少应记录以下方面:

- 被测保护装置: 包括被测保护装置/IED/功能的细节, 其他细节例如型号、固件版本等也应适当记录;
- 试验设备: 设备名称、型号、校准信息;
- 显示热保护元件动作原理的功能框图, 包括功能的开关量输入、输出信号的相互作用关系;
- 保护功能所使用的输入激励量和测量类型的细节;
- 对于功能中实现的动作和复归的特性曲线/动作的细节, 最好用方程式表示;
- 有效范围的细节( $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  的值)以及在超出有效范围的高故障电流条件下的功能行为(例如功能被闭锁或  $I_{\text{eq}}$  被限制为  $I_{\max}$ );

- 功能所用到的所有整定值的细节,包括  $k$ 、 $q$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$  和  $F_a$ ;
- 为改善元件对实际电力系统的适应性而使用的任何特定算法的细节和性能说明。对于不只在—一个功能中使用的一般算法,在用户文档中描述一次就可以,例如电流互感器或者 RTD 监测温度、冷却液温度、最高油温、绕组温度等算法,但应说明该算法对所有使用的功能动作的影响;
- 试验方法和整定值:包括所使用的试验程序以及被试设备中为便于试验而采用的整定值的细节。可能包括被测功能之外的一些整定值。保证可采用相同的试验条件进行可信的重复试验;
- 试验结果:对于试验方法和整定值中列出的每一种试验方案,应记录整套的试验结果,以便作为特定试验方案的参考。从这些试验结果中确定准确度;
- 试验结论:基于所记录的试验结果,应对第 5 章列出的所有要求进行明确说明。这些说明应和本部分所包含的性能指标进行适当的比较,以给出单项合格/不合格的结论,同时也给出整体功能全面的合格/不合格的结论。

## 7.2 其他用户文档

并非所有用户都要求查看完整的型式试验文档,而是要求其中部分信息。为此,即使不要求包含在同一文档中,在通用的用户文档中应记录至少以下方面。

显示热保护元件动作原理的功能框图,包括功能的开关量输入、输出信号的相互作用关系:

- 热保护功能用到的输入激励量和测试类型;
- 对于功能中实现的动作和有效的特性曲线/动作的细节,最好用方程式表示;
- 有效范围的细节( $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  的值)以及在超出有效范围的高故障电流条件下的功能行为(例如功能被闭锁或  $I_{\text{eq}}$  被限制为  $I_{\max}$ );
- 功能运转需要的所有整定值,包括  $k$ 、 $q$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $F_a$ ;
- 如果电源供应失败,在默认出厂设置或者用户设置情况下当前存储的热级的安全行为;
- 为改善元件对实际电力系统的适应性而使用的任何特定算法的细节和性能说明。对于不只在—一个功能中使用的一般算法,在用户文档中描述一次就可以,例如电流互感器或者 RTD 监测温度、冷却液温度、最高油温、绕组温度等算法,但应说明该算法对所有使用的功能动作的影响;
- 应对第 5 章列出的所有要求进行明确说明。

附录 A  
(资料性附录)  
电气设备的简单一阶热模型

A.1 概述

附录 A 中介绍了热保护建模中的微分、时间-电流方程、动态特性的基本知识。用一个简单的一阶热过程来表示被热保护的电气设备。

附录 A 中还介绍了实时连续计算和跟踪适用于数字式微机保护装置的简单一阶热过程的实际热级的递推算法。

A.2 电气设备的简单一阶热过程表示

A.2.1 概述

考虑表示被热保护的一般电气设备的简单一阶热系统,等效为一个流过等效发热电流( $I_{eq}$ )的欧姆绕组电阻( $r$ ),如图 A.1 所示。

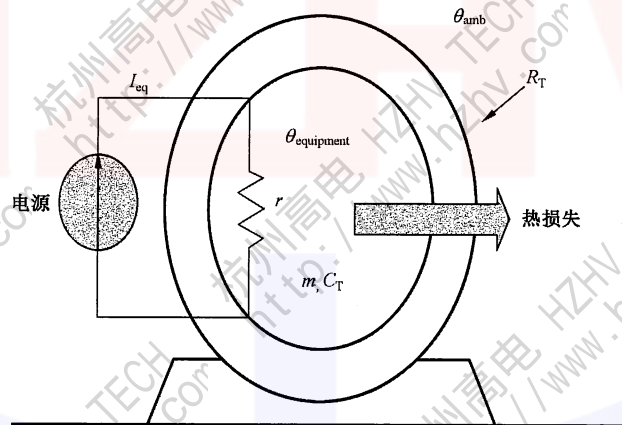


图 A.1 表示被热保护的电气设备的简单一阶热系统

A.2.2 等效发热电流的计算( $I_{eq}$ )

发热源用等效发热电流  $I_{eq}$  表示。

一般情况下,等效发热电流  $I_{eq}$  等于相电流的均方根。然而,电动机保护应用需考虑其他的发热源,这里给出描述。

在电动机保护应用中,热模型应有所偏重的反映出电动机运行时负序电流所引起的额外的发热。这种偏重可以通过创建电动机等效发热电流而不是简单的使用三相均方根电流的平均值实现。

电动机不平衡相电流将会引起在电动机的热损伤曲线中没显示出来的转子发热。当电动机运转时,转子沿正序电流方向以接近同步速度转动。负序电流的相序与正序电流相反,其方向与转子的旋转方向相反,产生转子电压,并在转子中产生大电流。此电流的频率大约是线路频率的两倍:在 50 Hz 系统中为 100 Hz,在 60 Hz 系统中为 120 Hz。



此频率下转子条的集肤效应将会导致转子电阻显著增大,从而使得转子发热显著增加。电动机制造厂提供的热极限曲线中并未考虑这种额外的发热,这些曲线假定电源电压和电动机设计完全平衡,电动机中只有正序电流。

考虑到不平衡条件的影响,等效发热电流可用式(A.1)计算:

$$I_{eq} = \sqrt{I_{rms}^2 + q \cdot I_2^2} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$I_{eq}$ ——等效发热电流;

$I_{rms}$ ——相电流的均方根;

$I_2$ ——负序相电流;

$q$ ——不平衡系数,由用户设定的常量,与电动机(被热保护的设备)的热容量成比例。

系数  $q$  是一个与负序相电流( $I_2$ )相对于正序相电流( $I_{rms}$ )所产生的额外热量相关的因子。在电动机热保护应用中, $q$  用于说明等效热电流( $I_{eq}$ )中的负序相电流的影响。此系数等于电动机额定转速下转子负序电阻与转子正序电阻的比值。

转子的正负序电阻值应从制造厂的数据表或者电动机说明书中获得。

注1:当制造厂没有提供确切的转子的正负序电阻阻值或不能通过计算得出时,可取数值3~5作为 $q$ 的典型值。

这是一个典型的设置,适用于大部分的热保护应用。

注2:对于某些电气设备的热保护应用,如电力变压器、线缆、母线、电容器等,系数 $q$ 应设为0。

### A.2.3 电气设备的一阶热模型

环境温度为 $\theta_{amb}$ ,设备温度为 $\theta_{equipment}$ 。根据电气绝缘系统(EIS)耐热性分级,设备温度不能超过热极限温度,与IEC 60085和IEC 60034-11保持一致。此温度定义为最大值或者是热点温度 $\theta_{max}$ ,保护装置应断开高于此点的等效发热电流的输入。温度的整定参见附录B。

一个简单的一阶热系统可由单一周围环境集中热阻率( $R_T$ ,用 $^{\circ}C/W$ 表示)、质量( $m$ ,用kg表示),热系统比热[ $c_T$ ,用 $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 表示]来模拟。

热阻率( $R_T$ )是一个常数,取决于热系统的绝缘水平和机械性能。 $R_T$ 值越大,传到周围环境的热越少。 $R_T$ 值越小,传到周围环境的热越多。

按照式(A.2),定义 $\theta$ 为热系统(装置)高于周围环境温度的温度:

$$\theta = \theta_{equipment} - \theta_{amb} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

设备(热系统)热增加的速度由表示热平衡的微分方程式(A.3)提供:

$$\text{电源} - \text{热损失} = mc_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$m$ ——考虑集中模型的热系统(设备)的质量,单位为千克(kg);

$c_T$ ——考虑集中模型的热系统(设备)的比热,单位为焦每千克摄氏度[ $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ ]。

按照式(A.4),热系统的热容( $C_T$ )是质量( $m$ )和比热( $c_T$ )的乘积:

$$C_T = m \times c_T \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

装置(热系统)传递到周围环境的热损失或者热量可用式(A.5)表示:

$$\text{热损失} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{R_T} = \frac{\theta(t)}{R_T} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

根据式(A.4)和式(A.5),式(A.3)可表示为式(A.6):

$$rI_{eq}^2 - \frac{\theta(t)}{R_T} = C_T \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

或者也可用式(A.7)表示:

$$R_{\tau} r I_{eq}^2 = R_{\tau} C_{\tau} \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

热阻率( $R_{\tau}$ )和热容( $C_{\tau}$ )的乘积表示一阶热系统的热时间常数( $\tau$ ),以秒为单位,见式(A.8);

$$\tau = R_{\tau} \cdot C_{\tau} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式(A.7)可以表示为式(A.9):

$$R_{\tau} r I_{eq}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

在式(A.9)中,通过设定  $d\theta(t)/dt=0$ ,可得电流为( $I_{eq}$ )时的运行装置高于周围环境温度的稳态温升。这种条件下,等效的额定运行电流( $I_{eq,nom}$ )所产生的额定温升( $\theta_{nom}$ )如式(A.10)所示:

$$R_{\tau} r I_{eq,nom}^2 = \theta_{nom} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

考虑到电动机应用中正负序电流产生的热效应,保护继电器所测当前运行设备的电流为电流标么值和额定电流的乘积,如式(A.11)所示:

$$I_{eq} = I_{eq,pu} \cdot I_{eq,nom} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

使用电流标么值,式(A.9)可以写为式(A.12)的方式:

$$R_{\tau} r I_{eq,pu}^2 I_{eq,nom}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

用式(A.10)中的变量代替式(A.12)中的变量得到式(A.13):

$$I_{eq,pu}^2 \theta_{nom} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

或者式(A.14)

$$I_{eq,pu}^2 = \tau \frac{d[\theta(t)/\theta_{nom}] + \theta(t)/\theta_{nom}}{dt} \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

基于测量电流的热保护继电器不能直接测量温度。当装置流过额定电流时,变量 $[\theta(t)/\theta_{nom}]$ 表示高于环境温度的装置温升的标么值。这个变量被认为是当前设备的热级,用 $[H(t)]$ 表示,见式(A.15):

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

此时式(A.14)可以写为式(A.16)的形式:

$$I_{eq,pu}^2 = \tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

应该注意到当前设备热级 $[H(t)]$ 和电流标么值的平方( $I_{eq}^2$ )是成比例的。

### A.3 热模拟和电气电路模型

式(A.7)是一个一阶微分方程,在电气上等效为一个电流源供电的 RC 电路。热过程中( $I_{eq}^2$ )给设备提供的能源等效于 RC 并联电路的电流源。热过程中的温度 $[\theta(t)]$ 等效于 RC 电路中电容两端的电压 $[V(t)]$ 。两个系统的等价性如表 A.1 和图 A.2 所示。当输入阶跃电流时,热模型的温度响应时间和电气模型的电压响应时间具有相同的形式。

表 A.1 热和电气模型

热模型	电气模型
一阶热系统的热路模拟	RC 并联电路模拟
$I^2 r = C_{\tau} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\theta(t)}{R_{\tau}}$	$I = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R}$
一阶热系统微分方程	一阶电气系统微分方程
对阶跃发热电流输入的热系统响应	对阶跃电流输入的电气系统响应

图 A.3、图 A.4、图 A.5 中给出了热过程中的热路模拟。在这些图中,热容( $C_T$ )两端的电压值与高于环境温度的温升是成比例的。当所施加的电流为 0 时,这个电压也变为 0。

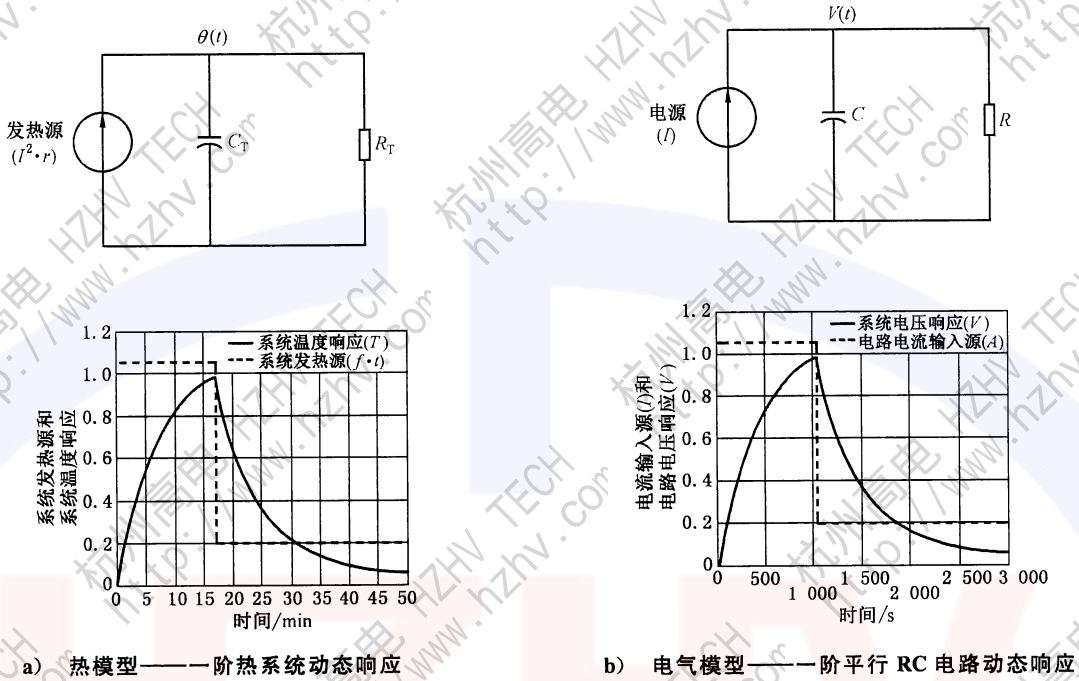


图 A.2 一阶热系统和电气 RC 并联电路的等效图

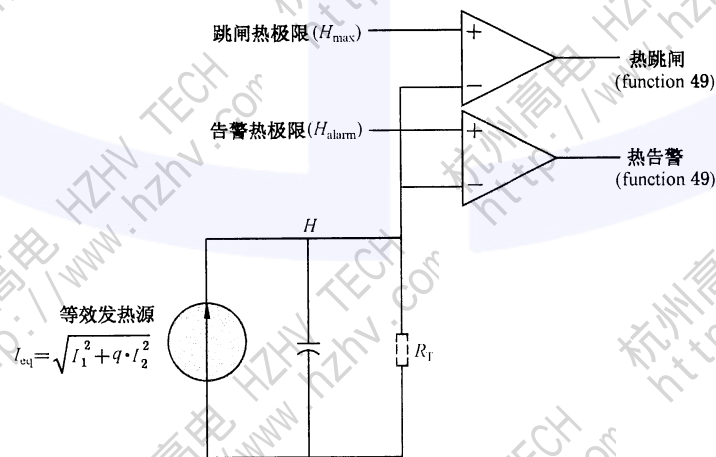


图 A.3 简单一阶热系统的热路模拟



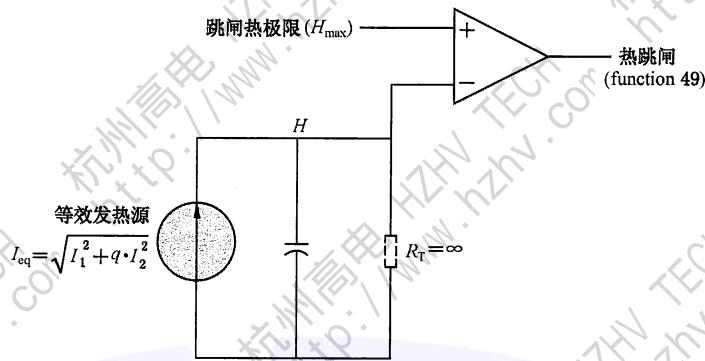
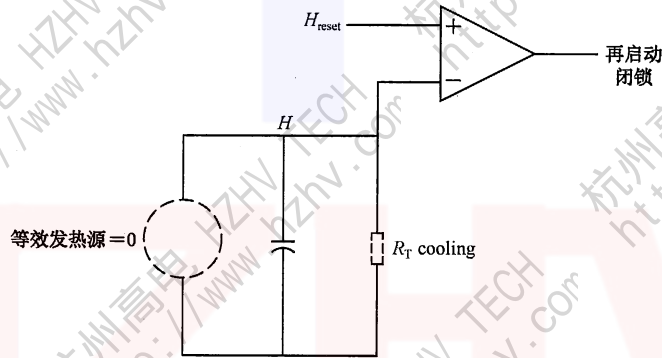


图 A.4 简单一阶热系统的热路模拟-电动机启动条件



当  $H > H_{reset}$  时, 再启动闭锁状态逻辑值为1(禁止再启动);  
 当  $H < H_{reset}$  时, 再启动闭锁状态逻辑值为0(允许再启动)。

图 A.5 简单一阶热系统的热路模拟-电动机停转条件

A.4 基于简单一阶热过程的热保护系统的动态特性

一阶热系统微分方程可写成适用于微机型保护装置的递推离散时间算法。

式(A.16)的离散时间形式如式(A.17)：

$$I_{eq\ pu}^2 = \tau \cdot \frac{H_n - H_{n-1}}{\Delta t} + H_n \dots\dots\dots (A.17)$$

式中：

$H_n$  和  $H_{n-1}$  当前设备热级的两个连续值, 与两个连续的采样电流相关, 在所测等效电流递推离散化过程中相差一个时间间隔 ( $I_{eq}$  在第  $n$  点和  $n-1$  点时的采样值);

$\Delta t$  两个连续的输入电流之间的时间间隔。

通过如下递推的时间离散化的微分方程, 可解出式(A.17)中的在每个采样周期里计算热模型响应的当前值 ( $H_n$ ), 如式(A.18)所示。

$$H_n = I_{eq\ pu}^2 \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} H_{n-1} \dots\dots\dots (A.18)$$

算法中使用的热时间常数 ( $\tau$ ) 应与被保护设备的当前状态保持一致。对自通风的电动机应用, 例如, 运转中的电动机热时间常数 ( $\tau_1$ ) 通常小于停转状态时的热时间常数 ( $\tau_2$ )。

对于运行中的设备, [ $I_{eq}(t) \geq 0$ ] 或者是大于热保护装置制造厂规定的输入电流固定阈值, 适合使

用热时间常数( $\tau_1$ )，设备热级可用式(A.19)计算：

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_1 + \Delta t} + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta t} H_{n-1} \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

对于不带电设备,  $I_{\text{eq}}(t) \approx 0$  或者是小于热保护装置制造厂规定的输入电流固定阈值, 适合使用热时间常数( $\tau_2$ )，设备热级可用式(A.20)计算：

$$H_n = I_{\text{eq pu}}^2 \frac{\Delta t}{\tau_2 + \Delta t} + \frac{\tau_2}{\tau_2 + \Delta t} H_{n-1} \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

式(A.18)可被认为是一个离散时间算法的基础, 该算法使得微机型电热保护继电器在不同的运行条件下连续计算一阶热系统的当前热级, 例如启动、额定负荷、过负荷等条件下。

通过应用此算法可以监视和跟踪热级, 当超过预先设定的阈值时可发出跳闸或告警信号。

图 A.6 给出了一个简单一阶热模型算法在低于某个电流值时的动态响应( $0.9 \text{ pu}, k = 1.05$ )的例子。根据输入的发热源和热时间常数, 热级以指数形式增长, 直到达到稳态热平衡等级  $0.9^2$ 。

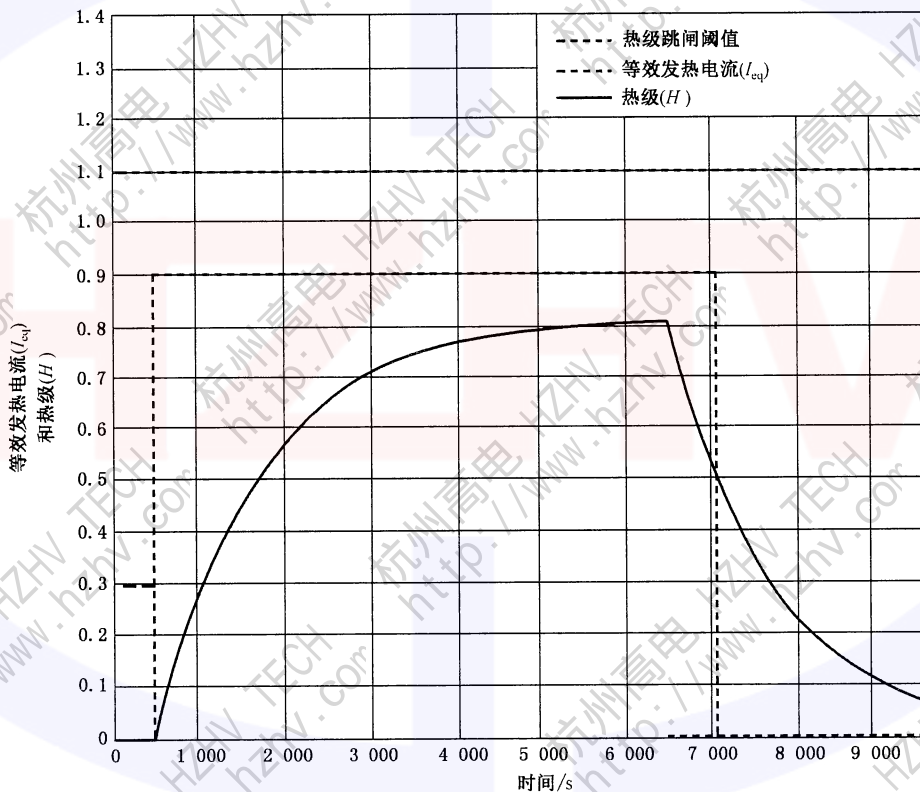


图 A.6 简单一阶热系统算法在小于指定电流时动态阶跃响应

图 A.7 和图 A.8 给出的是施加过负荷等效电流( $1.15 \text{ pu}, k = 1.05$ )接着持续负荷电流降低( $0.5 \text{ pu}$ )条件下的动态响应例子。

图 A.7 给出的动态响应例子中, 设备开始时处于冷态( $H_0 = 0$ )。图 A.8 给出的动态响应例子中, 设备开始时处于热态( $H_0 = 0.6$ )。两种情况下, 一阶热模型响应均根据热系统的热时间常数以指数形式增长到峰值, 之后以指数形式衰减到终值, 对应于负荷等效电流( $0.5^2 = 0.25$ )。

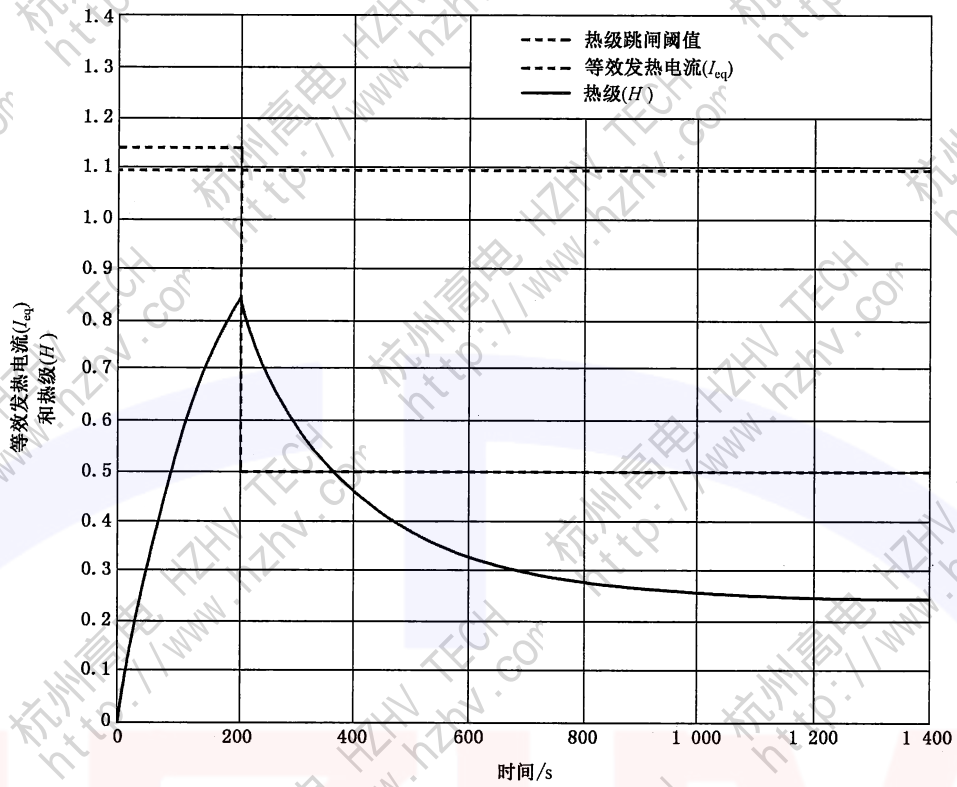


图 A.7 一阶热系统的动态阶跃响应(初始状态为冷态)

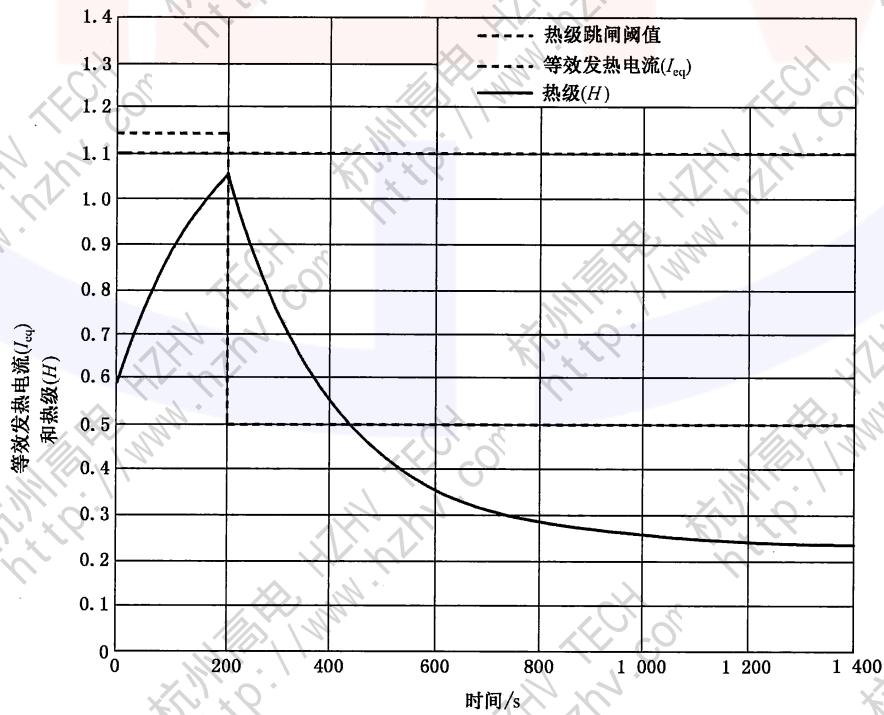


图 A.8 一阶热系统的动态阶跃响应(初始状态为热态)



图 A.9 给出的动态响应的例子中,先施加负荷等效电流(0.9 pu,在例子中),接着施加过负荷等效电流(1.2 pu,  $k=1.05$ ,在例子中)。初始状态:冷态(之前的热级=0)。引起热保护装置动作的热极限阈值是  $k^2=1.10$ 。

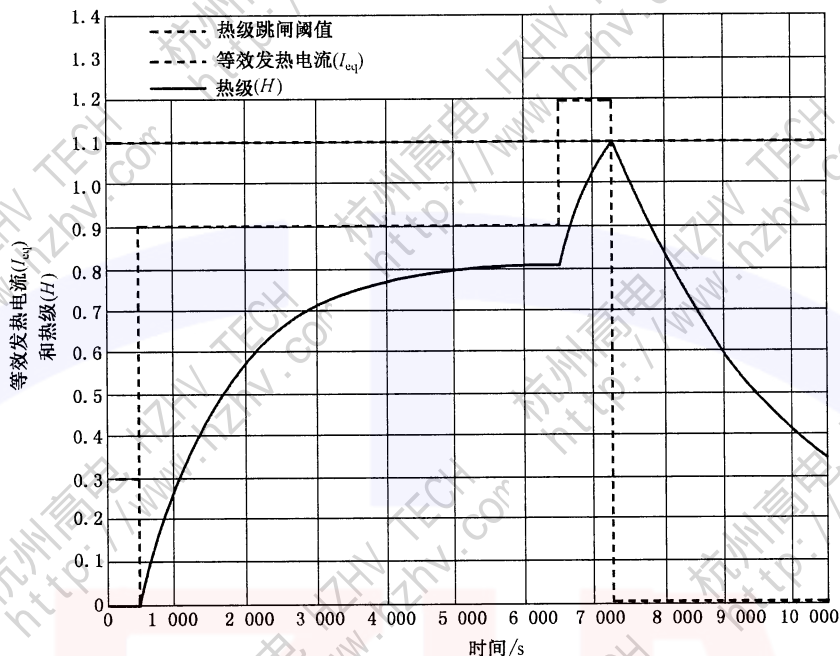


图 A.9 一阶热系统中先负荷电流后过负荷电流的动态阶跃响应(初始状态:冷态)

图 A.10 给出的动态响应的例子中,先施加负荷等效电流(0.9 pu),接着施加过负荷等效电流(1.2 pu,  $k=1.05$ )。初始状态:热态(之前的热级=0.6)。引起热保护装置动作的热极限阈值( $k^2=1.10$ )。

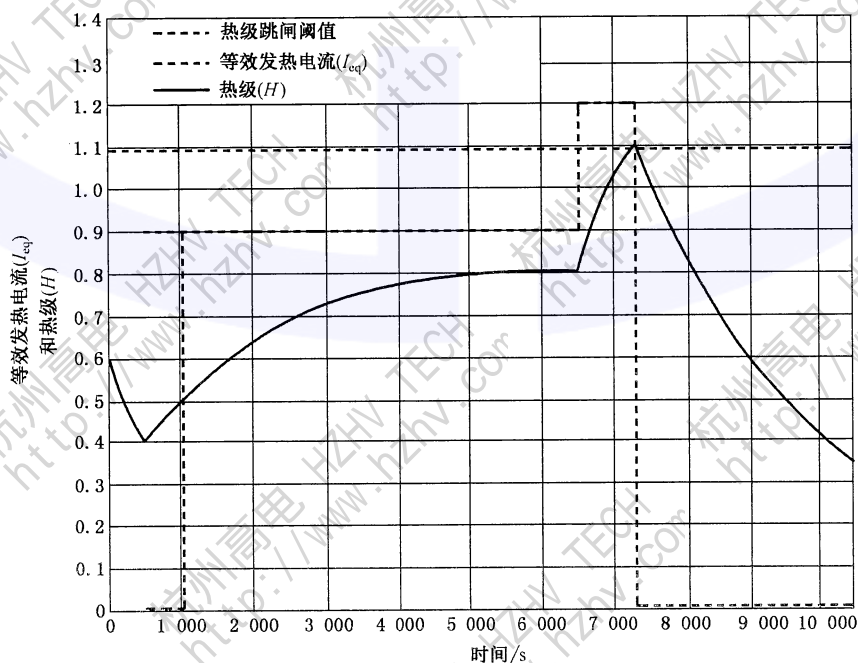


图 A.10 一阶热系统中先负荷电流后过负荷电流的动态阶跃响应(初始状态:热态)

A.5 电流与时间限制的热模型微分方程在时域上的解

式(A.9)在时域上的解是温度从初始温度(由原负荷电流决定)上升到决定保护继电器动作(跳闸)预置的热极限所需要的时间。

作为时间和等效负荷电流[假定( $I_{eq}$ )是常数]的函数的热模型在时域上的解( $\theta_0 = 0$ )为式(A.21):

$$\theta(t) = R_{\tau} r I_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots (A.21)$$

$\theta$  是高于周围环境的温度,可通过热系统(设备)温度方程得到,见式(A.22):

$$\theta_{equipment}(t) = R_{\tau} r I_{eq}^2 (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_{amb} \dots\dots\dots (A.22)$$

无论提供多大的等效负荷电流,热系统温度总是会升高。恒定等效负荷电流时,设备(热系统)最终的稳态温度依照式(A.23):

$$\theta_{equipment}(t \rightarrow \infty) = R_{\tau} r I_{eq}^2 + \theta_{amb} \dots\dots\dots (A.23)$$

假定热系统存在一个预设的额定工作等效电流( $I_{eq\ op}$ ),在某些应用场合又被称为负荷电流,设备(热系统)稳态工作温度由式(A.24)给出:

$$\theta_{op} = R_{\tau} r I_{eq\ op}^2 + \theta_{amb} \dots\dots\dots (A.24)$$

热系统(设备)温度不应高于由的电气绝缘热系统所决定的最高温度( $\theta_{max}$ ),因此以时间为变量的方程为式(A.25):

$$\theta_{max} = R_{\tau} r I_{eq}^2 (1 - e^{-t_{trip}/\tau}) + \theta_{amb} \dots\dots\dots (A.25)$$

由式(A.25)求解变量( $t_{trip}$ ),得到如下时间-电流方程式(A.26):

$$t_{trip} = \tau \cdot \ln \frac{R_{\tau} r I_{eq}^2}{R_{\tau} r I_{eq}^2 - (\theta_{max} - \theta_{amb})} \dots\dots\dots (A.26)$$

定义电流( $I_{eq\ max}$ )为发热源提供给热阻的最大电流,该电流下热系统随时间趋向无穷大时不会达到最高温度;最大电流值应满足式(A.24),即:

$$\theta_{max} = R_{\tau} r I_{eq\ max}^2 + \theta_{amb} \dots\dots\dots (A.27)$$

或式(A.28):

$$\theta_{max} - \theta_{amb} = R_{\tau} r I_{eq\ max}^2 \dots\dots\dots (A.28)$$

用式(A.28)中的表达式( $\theta_{max} - \theta_{amb}$ )代入式(A.26)可得到式(A.29):

$$t_{trip\ cold} = \tau \cdot \ln \frac{R_{\tau} r I_{eq}^2}{R_{\tau} r I_{eq}^2 - R_{\tau} r I_{eq\ max}^2} \dots\dots\dots (A.29)$$

或式(A.30):

$$t_{trip\ cold} = \tau \cdot \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} \dots\dots\dots (A.30)$$

式(A.30)最终给出了达到作为等效最大电流函数的最高(热点)温度的时间。式(A.30)的重要性在于移除了所有温度变量的引用,并代之以最大电流( $I_{eq\ max}$ )。

应指出的是,式(A.30)只有满足式(A.31)的条件时才有解:

$$I_{eq} > I_{eq\ max} \dots\dots\dots (A.31)$$

任何小于( $I_{eq\ max}$ )的电流都将会导致热系统温度指数增长到式(A.21)中给出的稳态温度。

式(A.30)隐含地表示是从参考环境温度或初始负荷电流为0时达到最高温度的时间。

当稳态电流为工作电流( $I_{eq\ op}$ )时,需要扩展达到最高(热点)热级的时间的方程。

在方程(A.22)中,达到最高温度的时间从环境温度(或者是负荷电流为0)开始。在新的方程中,达到最高温度的时间从工作温度或电流在等效负荷电流时开始。

从开始施加等效工作电流( $I_{eq\ op}$ )至达到最高温度的时间等于施加同样电流的条件下从环境温度达到最高温度的时间减去从环境温度达到工作温度的时间。

根据式(A.32), 稳态工作温度  $\theta_{op}$  可由式(A.23)计算得出:

$$\theta_{op} = R_{\tau} r I_{eq\ op}^2 + \theta_{amb} \quad \dots\dots\dots (A.32)$$

或者式(A.33):

$$\theta_{op} - \theta_{amb} = R_{\tau} r I_{eq\ op}^2 \quad \dots\dots\dots (A.33)$$

根据式(A.22), 可以得到计算等效电流 ( $I_{eq}$ ) 下从环境温度达到工作温度的时间 ( $t_{op}$ ) 的方程(A.34):

$$\theta_{op} = I_{eq}^2 r R_{\tau} (1 - e^{-t_{op}/\tau}) + \theta_{amb} \quad \dots\dots\dots (A.34)$$

根据式(A.34), 工作时间  $t_{op}$  的解见式(A.35):

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_{\tau} r I_{eq}^2}{R_{\tau} r I_{eq\ op}^2 - (\theta_{op} - \theta_{amb})} \quad \dots\dots\dots (A.35)$$

将式(A.33)中  $(\theta_{op} - \theta_{amb})$  的值代入式(A.35)中可得式(A.36):

$$t_{op} = \tau \ln \frac{R_{\tau} r I_{eq}^2}{R_{\tau} r I_{eq}^2 - R_{\tau} r I_{eq\ op}^2} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad \dots\dots\dots (A.36)$$

最后, 动作电流或温度的跳闸时间由式(A.37)给出:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} - \tau \ln \frac{I_{eq}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2} \quad \dots\dots\dots (A.37)$$

或者式(A.38)

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - I_{eq\ max}^2} \quad \dots\dots\dots (A.38)$$

式(A.38)给出了开始于原等效工作电流 ( $I_{eq\ op}$ ) 或者工作温度, 等效电流 ( $I_{eq}$ ) 下达到最高(热点)温度的时间。

通过因子  $k$  (见 3.4) 定义最大等效电流见式(A.39):

$$I_{eq\ max} = k I_B \quad \dots\dots\dots (A.39)$$

将式(A.39)代入式(A.38)中得到 ( $I_{eq\ max}$ ), 如下式(A.40)所示:

$$t_{trip\ hot} = \tau \ln \frac{I_{eq}^2 - I_{eq\ op}^2}{I_{eq}^2 - (k I_B)^2} \quad \dots\dots\dots (A.40)$$

式(A.40)是基于热态特性曲线的跳闸时间方程, 如式(6)所示。因此在式(A.18)所示的算法, 是实现一阶热系统的时间-离散微分方程的一个递推过程, 式(A.30)和式(A.40)给出的冷热态时间电流方程包含于此过程中。

当热保护使用式(A.18)给出的算法实现时, 由式(5) (冷态) 和式(6) (热态) 给出的冷态和热态时间电流极限特性方程都将包含于其中, 而与初始热级或初始设备负荷电流无关。

式(A.18)给出的算法连续实时计算热模型当前状态, 适用于数字式微机保护装置。在过负荷发生时, 可使用热级历史记录和预警设置来避免不必要的跳闸和工艺连锁。

### A.6 环境温度因子 $F_a$ 的推导

在定义设备热级  $H(t)$  的式(A.15)中, 用式(A.10)定义的表达式来替换变量  $\theta_{nom}$  可得式(A.41):

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{\theta_{nom}} = \frac{\theta_{equipment} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad \dots\dots\dots (A.41)$$

当设备温度  $\theta_{equipment}$  达到绝缘等级所允许的最高温度  $\theta_{max}$  时, 设备热级  $H(t)$  由式(A.42)定义:

$$H_{max} = \frac{\theta_{max} - \theta_{amb}}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \quad \dots\dots\dots (A.42)$$

式中:

$H_{max}$  ——引起热保护功能动作所可达到的最大热级。



热保护装置将外界(或周围环境)的温度  $\theta_{amb}$  也考虑在内来计算热级  $H(t)$ 。在一般应用中,环境温度临界值一般被规定为 40 °C。在这种情况下,热级阈值的整定值等于最大热级,见式(A.43):

$$H_{setting} = \frac{\theta_{max} - 40}{r \cdot I_{nom}^2 \cdot R} \dots\dots\dots (A.43)$$

式中:

$H_{setting}$ ——环境温度不为 40 °C 时被热保护设备所能达到的引起热保护功能动作的最大热级。

当外界(或环境)温度波动且不等于 40 °C 时,用于热级计算的阈值不等于与绝缘耐热等级规定的最大热级。

两个阈值之间的关系被定义为修正系数  $F_a$ ,如式(A.44)所示:

$$\frac{H_{setting}}{H_{max}} = \frac{\theta_{max} - 40}{\theta_{max} - \theta_{amb}} = F_a \dots\dots\dots (A.44)$$

在适用情况下,当热保护装置具有环境温度的测量输入时,考虑到实际外界设备温度  $T_a$ ,热级计算的  $H(t)$  会随着系数  $F_a$  增加。动作输出信号的条件按照下列不等式(A.45)定义:

$$H(t) \geq H_{max} \Leftrightarrow H(t) \cdot \frac{H_{setting}}{H_{max}} \geq H_{setting} \Leftrightarrow H(t) \cdot F_a \geq H_{setting} \dots\dots\dots (A.45)$$

根据绝缘耐热等级,IEC 60085 定义了最高温度  $T_{max}$ ,见表 A.2。

表 A.2 IEC 60085 中规定的绝缘耐热等级和最高温度

等级	Y	A	E	B	F	H	N	R	250
$T_{max}$	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C

根据 IEC 60085 定义的绝缘等级为 F(155 °C)的典型工业设备,如工业电机,在各种设备外界环境温度下,在式(A.44)中热级阈值修正系数  $F_a$  的值如表 A.3 所示。

表 A.3 环境温度( $T_a$ )下热绝缘 F 等级的设备修正系数值( $F_a$ )的例子

设备环境温度 $T_a$	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
F 级设备修正系数 $F_a$	1.0	1.045	1.095	1.15	1.21

附录 B  
(资料性附录)

采用温度作为整定参数的电热继电器

B.1 概述

附录 B 介绍了采用温度作为整定参数的电热继电器的整定和测试的信息。

B.2 与温度相关的热微分方程的解

若把式(A.11)中的  $I_{eq,pu}$  代入式(A.13)中,可推导出以下的一阶热微分方程式(B.1):

$$I_{eq}^2 \frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2} = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$\theta(t)$  —— 随时间变化、高于环境温度的温度;

$I_{eq,nom}$  —— 等效发热电流额定值;

$\theta_{nom}$  —— 通过持续电流  $I_{eq,nom}$  时高于环境温度的稳态温度。

在式(B.1)中,因子  $\frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2}$  是温度  $\theta$  和电流的平方  $I^2$  的比例系数。若给定基准电流  $I_{eq,ref}$  及代入相应的稳态温度  $\theta_{ref}$ ,比例系数的值相等,即:

$$\frac{\theta_{nom}}{I_{eq,nom}^2} = \frac{\theta_{ref}}{I_{eq,ref}^2} = \dots = \frac{\theta_0}{I_0^2} = \frac{\theta_{max}}{I_{max}^2} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$I_{eq,ref}$  —— 等效发热电流基准值;

$\theta_{ref}$  —— 通过持续电流  $I_{eq,ref}$  时高于环境温度的稳态基准温度。

下标“0”或“max”表示某电流和对应的温度。

基准电流可以是任何值(比如,被保护对象的额定电流,CT 的额定电流),但基准温度应是流过基准电流时所达到的高于环境温度的稳态温度。

制造厂应明确的给出如何计算等效发热电流(不对称,谐波)。

B.3 与温度相关的热微分方程的离散时间解

使用一阶热微分方程式(B.1)的离散时间解的微机型保护装置给出式(B.3)如下:

$$\theta(t) = I_{eq,ref}^2 \frac{\theta_{ref}}{I_{eq,ref}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

结果是高于环境温度的温度。为获得被保护设备的温度,应增加环境温度  $\theta_{amb}$  [参见式(A.2)]:

$$\theta_{equipment}(t) = I_{eq}^2 \frac{\theta_{ref}}{I_{eq,ref}^2} \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \theta(t - \Delta t) + \theta_{amb} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

该方程的应用假设在计算时间间隔  $\Delta t$  内,等效电流  $I_{eq}$  是常量,随时间变化的温度曲线可用直线代替。如果时间间隔  $\Delta t$  远远小于热过程时间常数  $\tau$ ,两个条件都会满足。这是继电器制造厂的责任。

式(B.3)或式(B.4)清楚的示出了电热继电器的记忆功能。在计算后面的温度值时,前面时间间隔

内的温度应是已知的。如果在前面步骤里温度已经达到发热或冷却过程,或者如果是一个稳态温度值,这并不重要。

用户提供的高于环境温度的温度计算的主要参数:

- $I_{eq,ref}$ ——等效发热电流基准值;
- $\theta_{ref}$ ——高于环境温度的稳态基准温度,如果持续通过电流  $I_{ref}$ ;
- $\tau$ ——热过程时间常数。

当用户确定  $\theta_{ref}$  时应明确该值给定为高于假定环境温度的温度或者给定为测量时刻设备温度的测量值和环境温度的差值。

热过程时间常数依赖于被保护设备的状态。例如,电机运转和停止时该时间常数是不同的;变压器自然冷却和强制冷却时也是不同的。制造厂应说明如何使用时间常数。

**继电器动作参数确定:**

对象根据 IEC 60085 中规定的绝缘耐热等级受到保护,防止温度过高。绝缘等级温度在表 A.2 中以符号  $T_{max}$  表示。这些温度是最高温度  $\theta_{equipment}$ 。

确定动作温度最简单的方法如表 A.2 所述:

- $\theta_{TRIP}$ ——最高温度,类似于表 A.2 中的  $T_{max}$ ;
- $\theta_{ALARM}$ ——告警温度(达到此温度时继电器产生告警信号);
- $\theta_{RESTART}$ ——重启温度(只有当温度低于此水平时设备才能重启)。

制造厂应明确这些值如何解读(例如:设备温度用 °C,与基准值相关的高于环境温度的温度用 %, 等)。

**关于环境温度:**

根据式(B.4)计算设备温度。计算时需要周围环境温度值  $\theta_{amb}$ 。从式(B.4)可以明显看出,设备在低环境温度条件下比炎热环境温度时可承受更大的过负荷。为追踪这个,需要测量环境温度。根据制造厂的声明:

- 环境温度可测量;
- 能够作为参数整定;或者
- 仅计算温升,且确定整定值时按最高环境温度考虑。

制造厂应明确采用哪种解决方案。

**B.4 与温度相关的电热继电器动作试验**

由于电热继电器计算的温度不好测量,通常不可能检查计算值和真实温度值的一致,需要对试验进行转换。对于测量基准电流的电热继电器,很明显需要把温度转换为电流,并实施类似于过电流继电器试验过程的试验。

进行试验需要对称的基波电流,因此  $I_{eq} = I$  (下标“eq”可以忽略)。

式(B.3)或式(B.4)适用于进行连续变化的电流的计算,但是试验使用稳态连续电流更易进行。施加恒定电流的热微分方程式(B.1)的一个众所周知的解见式(B.5)和式(B.6):

$$\theta_{equipment}(t) = \frac{I^2 \theta_{ref}}{I_{ref}^2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{amb} \dots\dots\dots (B.5)$$

或者

$$\theta(t) = \theta_{equipment}(t) - \theta_{amb} = \frac{I^2 \theta_{ref}}{I_{ref}^2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \dots\dots\dots (B.6)$$

式(B.5)和式(B.6)中:

$\theta_0$ —— $t=0$  时刻被保护对象高于环境温度的温度。

当在式(B.6)中用  $\theta_{max} = \theta_{TRIP} - \theta_{amb}$  代入  $\theta(t)$  并用式(B.6)的温度解时,根据式(B.2)可得下列式(B.7):



$$k_0 = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} = \frac{I^2}{I_{\text{ref}}^2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \frac{I_0^2}{I_{\text{ref}}^2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

- $\theta_{\max}$  —— 高于环境温度所允许的最高温度  $\theta_{\max} = \theta_{\text{TRIP}} - \theta_{\text{amb}}$ ；
- $\theta_{\text{ref}}$  —— 高于环境温度的稳态基准温度，若持续通过电流  $I_{\text{ref}}$  (整定值)；
- $I_{\max}$  —— 需要达到高于环境温度的稳态温度  $\theta_{\max}$  的稳态电流；
- $I_0$  —— 需要达到稳态温度  $\theta_0$  ( $t=0$  时高于环境温度的温度) 的稳态电流；
- $I_{\text{ref}}$  —— 等效发热电流基准值 (整定值)；
- $\tau$  —— 热过程时间常数 (整定值)。

从式(B.7)能够推导出跳闸预期时间“ $t$ ”，见式(B.8)：

$$t = \tau \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_{\max}^2} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

式中：

- $I$  —— 需要达到高于环境温度的稳态温度  $\theta$  (此温度高于  $\theta_{\max}$  温度) 的稳态输入电流；
- $I_{\max}$  —— 需要达到稳态温度  $\theta_{\max}$  的稳态电流。可根据式(B.2)得到式(B.9)：

$$I_{\max}^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}^2}{\theta_{\text{ref}}} \theta_{\max} \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

$I_0$  —— 需要达到稳态温度  $\theta_0$  的假定稳态电流。在  $t=0$  时，高于环境温度的温度可根据式(B.2)计算得到式(B.10)：

$$I_0^2 = \frac{I_{\text{eq.ref}}^2}{\theta_{\text{ref}}} \theta_0 \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

$\tau$  —— 热过程时间常数 (整定值)。

注 1：式(B.8)等价于式(A.38) (热态曲线的规定)。

注 2：当  $I_0=0$  时，可以推导出冷态曲线的定义，即当被保护对象处于环境温度时，发热过程开始。

### B.5 关于起始温度

由于被保护对象的长热时间常数，试验中需要较长的时间来达到起始温度值  $\theta_0$ 。制造厂应提供指导来加快试验进程：例如复位累积的热级，然后在规定时间内输入大电流；或者为起始温度设置参数，并由专用的开关量输入信号激活等。

### B.6 因子 $k$ 和 $k_0$

因子  $k_0$  在式(B.7)中被定义，见式(B.11)：

$$k_0 = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\text{ref}}} = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

可以看出，见式(B.12)

$$k_0 = \frac{I_{\max}^2}{I_{\text{ref}}^2} = k^2 \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

制造厂应明确所设因子的含义 (如果适用)。

参 考 文 献

- [1] IEC 60034-11 Rotating electrical machines—Part 11: Thermal protection
- [2] IEC 60947-4-1 Low-voltage switchgear and control gear—Part 4-1: Contactors and motor-starters—Electromechanical contactors and motor-starters
- [3] IEC 60947-4-2 Low-voltage switchgear and control gear—Part 4-2: Contactors and motor-starters—AC semiconductor motor controllers and starters
- [4] IEC 61850-9-2 Communication networks and systems for power utility automation—Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM)—Sampled values over ISO/IEC 8802-3
- [5] ABOU-EL-ELA, M.S., MEGAHED, A.I., MALIK, O.P, Thermal model based digital relaying algorithm for induction motor protection, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, 1996
- [6] ANSI/IEEE Std.37.96, Guide for AC motor protection
- [7] ANSI/IEEE Std.620, Guide for the presentation of thermal limit curves for squirrel cage induction machines
- [8] ELTOM, A.H., MOHARI, N.S., Motor temperature estimation incorporating dynamic rotor impedance, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.6, No.1, 1991
- [9] LEBENHAFT, E., ZELLER, M., Advanced thermal motor protection using digital relays, SEL Technical Paper 6338, 2008
- [10] MIT, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Advanced System Dynamics and Control, Review of first and second-order system response, 2004
- [11] ZOCHOLL, S.E., AC Motor Protection, WA, USA, 2003
- [12] ZOCHOLL, S.E., BENMOUYAL, G., On the protection of thermal processes, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005
- [13] ZOCHOLL, S.E., GUZMAN, A., Thermal models in power system protection, SEL, WA, USA 1999

中华人民共和国  
国家标准

量度继电器和保护装置

第 149 部分:电热继电器功能要求

GB/T 14598.149—2016/IEC 60255-149:2013

\*

中国标准出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 61 千字

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月第一次印刷

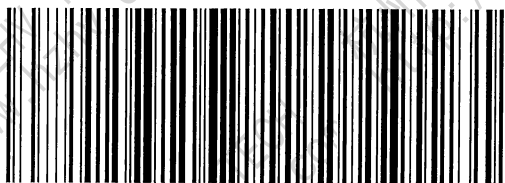
\*

书号: 155066·1-54711 定价 33.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107



GB/T 14598.149-2016