

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2022) 12-078-04 中图分类号: TP29

# 工业大功率电加热器继电保护配置及温控系统改进

Improvement of Relay Protection Configuration and Temperature Control System of Industrial High Power Electric Heater

★ 张行天 (郑州大学, 河南 郑州 450001)

★ 张大鹏, 周李锐 (中安联合煤化工分公司, 安徽 淮南 232089)

**摘要:** 本文分析了工业用大功率电加热器的继电保护配置和自控方案存在的问题, 提出了电加热器继电保护配置和前馈-反馈自动控制通用解决方案, 解决了电加热器越级跳闸和自控系统抗扰动差的问题。

**关键词:** 电加热器; 继电保护; 前馈-反馈

**Abstract:** This paper analyzes the existing problems of relay protection configuration and automatic control scheme of industrial high-power electric heater, and presents a general solution for relay protection configuration and feedforward feedback automatic control of electric heater, which solves the problems of override trip of electric heater and poor anti-interference of the automatic control system of an electric heater.

**Key words:** Electric heater; Relay protection; Feedforward-Feedback

工业大功率电加热器是新型电加热产品, 广泛用于石油、化工、电力等各行业管道内各种流体介质的加热、升温 and 降粘, 取代了传统、落后的蒸汽加热、燃油加热及恒功率加热等加热方法, 具有能量传输率极高、连续使用寿命极长、无环境污染等显著特点, 是一类极为理想的现代化电加热产品。

## 1 存在问题

目前, 大功率电加热器设备本体设计日臻成熟, 但是继电保护部分和自控部分设计还不成熟, 存在问题:

### 1.1 无继电保护设置规程, 越级跳闸事故多发

现行的继电保护相关规程, 例如《GBT 50062 电力装置的继电保护和自动装置设计规范》《GBT 14285 继电保护和安全自动装置技术规程》和《DLT 684 大型发电机变压器继电保护整定计算导则》等均无电加热器类设备继电保护配置和定值整定指导性原则, 所以各企业产品没有统一的继电保护配置规则, 导致继电保护方面的问题较多。中安联合煤化工分公司电加热器就曾多发越级跳闸事故。

### 1.2 温度自动控制系统抗扰动性能差

由于电加热器温度控制与工艺介质的组分、温度、压力及流速等众多物理量相关, 目前的控制方案还未能全面考虑上述参数。因此, 在特殊工况下, 不但控制目标完成不好, 而且多发因温度超标导致的爆管和加热器接地故障。

## 2 电加热器继电保护问题分析及解决方案

下面以中安联合煤化工分公司10万吨/年烯烃催化裂解(OCC)装置进料加热器某次接地越级跳闸故障为例, 探讨加热器继电保护和自控系统存在的问题和解决办法。

### 2.1 催化裂解(OCC)装置进料电加热器参数

OCC装置进料电加热器参数如表1所示。

表1 电加热器参数表

结构	额定功率	额定电压	功率分组	电热管热负荷	电热管表面最高温度控制值
立式	1680 kW	660 V	10组 ×168 kW	1.9 W/cm <sup>2</sup>	650 °C
工况	操作压力	入口温度	出口温度	工作介质	介质流量
正常工况	0.15 MPaG	510 °C	570 °C	混合C4C5	10790×1.1Nm <sup>3</sup> /h
再生工况	0.25 MPaG	25 °C	530 °C	氮气、工厂风、再生气	10790×1.1Nm <sup>3</sup> /h

温度控制：4只双支K型热电偶将出口温度信号传送到用户DCS系统，并由DCS发出控制信号，调节调功器功率输出。

## 2.2 加热器电气系统

电加热器电气原理图如图1所示。

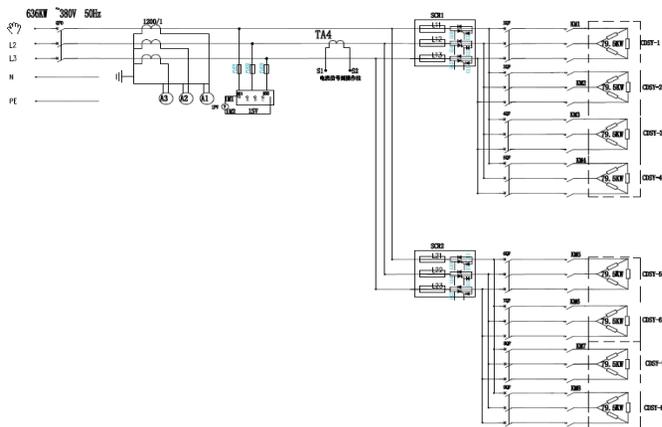


图1 电加热器电气原理图

电加热器分为10个回路，采用1台进线开关柜和3台调功控制柜进行控制。每个回路功率168kW，负载采用“△”形接法，全部采用可控硅调功控制。控制柜一次主要元件由断路器、接触器、快熔和可控硅调功器等部分组成，功能是接通或断开加热器的工作电源，调节加热器的输出功率，并执行DCS发来的命令。电加热器电气原理如图1所示。

## 2.3 继电保护配置及整定值

### 2.3.1 低压进线断路器本体保护定值

低压进线断路器本体保护定值如表2所示。

表2 断路器保护定值

保护类型	整定值	动作时限
速断保护	8000A	t=0s
短延时保护	2000A	t=0.3s
长延时保护	1800A	t=144s

### 2.3.2 分支断路器参数、定值

断路器额定电流 $I_N=250A$ ，分支回路额定电流 $I_N=147A$ ，单磁脱扣瞬时短路保护1250A。

### 2.3.3 专用变压器参数

专用变压器参数如表3所示。

表3 变压器参数表

额定电压 (V)	额定电流 (A)	二次电压 (V)	二次额定电流 (A)	额定容量 (kVA)	阻抗电压	连接组别
10000	115.5	690	1673.5	2000	5.09%	Dyn11
10000	115.5	690	1673.5	2000	5.09%	Dyn11

## 2.4 故障简介

某次加热器故障，第六组加热器本体2根加热管损坏接地，调取故障记录显示：高压侧B相最大电流0.968In，折算低压侧电流达2225A，超过了低压进线短延时保护整定值2000A和分支回路单磁脱扣瞬时短路保护1250A的定值，但是由于热磁保护固有延迟特性，所以分支回路断路器拒动，发生越级跳闸。

## 2.5 原因分析

从保护配合方面看，这是正常动作，由2.3继电保护配置及整定值分析可知，保护配合也没有问题。但是对于整套电气系统来说，这种越级跳闸问题会导致整台电加热器失电，严重影响工艺运行。这说明继电保护配置满足不了实际需要。

首先从故障电流的特点进行分析。图2是当电加热器一相发生接地时的电气回路示意图：



图2 电加热器两相接地短路示意图

图中，Z为接地点；R1、R2为AC相加热管被接地点分割后的两段电阻；A、B、C为三相电源；N为零线。

由于负载为纯电阻电路，例如AC相某点接地时，在接地点相当于将AC相负载电阻R分割为R1和R2两部分，这时故障电流分析如下：

首先计算负载电阻R：

$$AC\text{相电流 } I_{ac} = \frac{I_a}{\sqrt{3}} = 85A U_{ac} \quad (1)$$

$$R = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = \frac{660}{85} = 7.7 \Omega \quad (2)$$

$$I_z = \frac{380}{R_1} + \frac{380}{7.7 - R_1} \quad (3)$$

由式(3)可知,接地点电流 $I_z$ 是由两个反比例函数组成,那么电流的变化规律可由函数的变化规律探知:

列出函数方程,为方便起见,这里用 $x$ 代表 $R_1$ ,函数方程如下:

$$f(x) = \frac{1}{x} + \frac{1}{7.7-x} = \frac{7.7}{x(7.7-x)} \quad x \in (0, 7.7) \quad (4)$$

求导:

$$\therefore f'(x) = \frac{7.7(7.7-2x)}{x^2(7.7-x)^2} \quad (5)$$

当 $0 < x < 7.7/2$ 时,

$f'(x) < 0$ ,  $f(x)$ 单调递减,

当 $\frac{7.7}{2} < x < 7.7$ 时,

$f'(x) > 0$ ,  $f(x)$ 单调递增,

$$f(x)_{\min} = f\left(\frac{7.7}{2}\right) = 0.52 \quad (6)$$

$$\therefore f(x) \in [0.52, \infty)$$

$$380 f(x) \in [197, \infty)$$

$$\text{即 } 197A < I_{ac} < \infty$$

可见,短路电流值是一个单调递增的函数,即不是一个可以计算出的固定值。当发生两相接地短路时,由于短路点具有在相电阻全长上任意一点的随机性,短路电流值分布在 $(197, \infty)$ 区间,而非某一固定值,所以分支回路的热磁保护定值无法整定。

## 2.6 解决方案

电加热管各自独立,因此由加热器的结构特点决定。加热器绝大部分短路故障是两相接地故障,加上电加热器专用变是TN供电系统,当两相接地短路时,一定有零序电流出现。因此,分支回路配置零序保护替代无法整定的热磁保护,热磁保护按过负荷保护进行整定,可以在单相和三相短路时灵敏动作,且可作为零序保护失灵的后备保护。这套继电器保护配置可以解决所有短路故障的保护问题,并且可以避免越级跳闸问题发生。

## 3 温度控制抗扰动差原因分析及解决方案

### 3.1 现有自控方案简介

控制柜仪表主要元件由温度传感器、温度变送器、信号隔离器和PLC等几大部分组成。加热器内部设有4个温度检测点,检测不同区域发热元件的温度,对加热器内部温度实施监控保护联锁。加热器出口有1个检测介质的温度,并将该温度作为主控点。这些温度信号通过检测和变送,远传至用户中控室DCS系统,由用户组态PID闭环控制及超温联锁功能。经过PID运算

后,输出4~20mA控制信号接至电控柜各个回路进行控制调功器的输出功率。控制原理框图如图3所示。

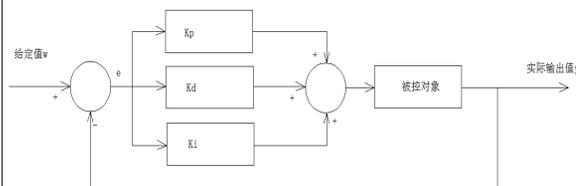


图3 PID控制原理框图

PID控制器传递函数:

$$G(s) = K_p(1 + 1/T_i s + T_d s) \quad (7)$$

### 3.2 控制方案存在问题

这套温控系统是典型的加热炉控制系统,温度控制具有升温单向性大惯性大滞后和时变等特点。其升温、保温是依靠电阻丝加热,降温则是依靠加热介质冷却。

影响出口温度变化的主要因素有两个,一是电加热管温度,二是进入加热器的介质流量。电加热管温度由电加热丝电流控制,由于结构的关系,温度响应快,时滞小。加热器的介质流量在大部分情况下是稳定的,但是某些特殊操作时段,流量波动巨大。

负责采集出口温度值的K型绝缘铠装热电偶,测温管直径 $\varnothing 12$ ,响应时间 $T_{0.5} = 10$ 秒(热电偶的输出变化至相当于温度阶跃变化50%的时间)。因此,当介质流量发生变化进而导致加热管温度变化后,在10秒内,测温元件无法做出有效反应。由于加热元件与温度控制标的时滞差异,造成在流量波动大的时候出口温度控制不好甚至导致加热管超温、爆管等事故。

### 3.3 控制系统扰动举例计算

例如:加热器在额定工况下运行,入口温度 $510^\circ\text{C}$ ,出口温度 $570^\circ\text{C}$ ,某时刻,工艺气流量突然减小30%额定值时,温度变化如下:

风道式加热器常压空气加热功率计算:

$$P = \frac{F \times \Delta T_1}{40} \quad (8)$$

$$\Delta T_1 = \frac{40 \times P}{F} \quad (9)$$

式中, $F$ 为加热介质流量( $\text{m}^3/\text{min}$ ); $P$ 为加热器输入功率; $\Delta T_1$ 为加热管和加热器出口温差。

由公式可知,当介质流量 $F$ 发生变化,而加热器功率保持不变,那么此时加热管与加热器温差。

$$\Delta T_2 = \frac{40 \times P}{0.7F} = 1.428 T_1 \quad (10)$$

可见,在介质流量突然降低30%的情况下,温度变化可达1.428倍的稳定温差,而由于温度传递的大惯性大滞后特性,此时增加的温度几乎全部聚集在加热管

内部。

在正常工况下，

$$\Delta T_2 = 1.428 \times 60 = 85^\circ\text{C}$$

加热管温度达  $\Delta T_2 + 570 = 655^\circ\text{C}$

如果在再生工况运行，入口  $25^\circ\text{C}$ ，出口  $530^\circ\text{C}$ ，此时

$$\Delta T_2 = 1.428 \times 505 = 721^\circ\text{C}$$

加热管温度达  $\Delta T_2 + 530 = 1251^\circ\text{C}$

可见，再生工况下加热管此时温度已经达到了  $1251^\circ\text{C}$ ，远远超出了加热管绝缘填充物高温氧化镁  $850^\circ\text{C}$  的最高温度范围，因此会引发爆管和接地故障。

### 3.4 原因分析

在这套温度负反馈系统中，在被控变量出现偏差后，控制器才开始动作，以补偿扰动对被控变量的影响。加热器介质流量相当于这个控制系统的可测不可控的扰动变量。如果扰动已发生，但被控变量还未变化时，控制器则不会有任何控制作用。因此，反馈控制作用总是落后于扰动作用，控制很难及时调整。即便是采用微分控制，虽可用来克服对象及环节的惯性滞后（时间常数） $T$ 和容量滞后 $\tau$ ，但不能克服纯滞后时滞。正是由于介质的流量变化没有引入到控制系统，所以会导致流量变化时相应的输入加热管功率变化迟滞，引发加热管超温，最终导致爆管故障发生。

### 3.5 解决方案

将流量信号引入控制系统中，构建前馈-反馈控制系统。在改进后的控制系统中，流量扰动一旦出现，前馈控制器就能检测到其变化情况，可以及时有效地抑制扰动对被控变量的影响，而不是像原设计中的反馈控制那样，要待被控变量产生偏差后再进行控制。利用反前馈控制有效地减少主要扰动因素对被控变量的影响，使被控变量稳定在设定值上，从而保证系统具有较高的控制质量。

将原控制系统简化后，增加前馈环节的传递函数系统方图如图4所示。

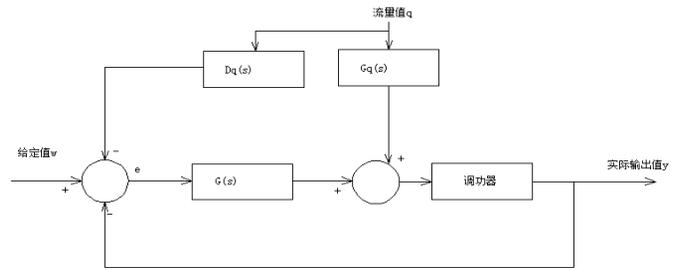


图4 前馈-反馈复合控制系统方图

图中， $G_q(s)$ 为流量扰动通道传递函数； $D_q(s)$ 为前馈控制器传递函数； $G(s)$ 为被控对象传递函数。

图4所示系统中，当测量到冷物料流量变化的信号后，通过前馈控制器，其输出信号直接控制调节器的输出，从而改变加热管的功率，克服了原系统时滞期间因流量变化导致加热管超温或加热功率不足的问题。PID即：Proportional（比例）、Integral（积分）、Differential（微分）的缩写。

改进后的前馈-反馈复合控制系统PID控制器传递函数：

$$Y(s) = [G_q(s)G(s) + D_q(s)]Q(s) \quad (11)$$

## 4 结论

通过分析电加热器的电气故障特点，重新调整电加热器继电保护方案，增设分支回路零序保护，更改分支回路热磁脱扣保护定值，消除了因继电保护配置不合理造成的越级跳闸问题；通过引入介质流量构建前馈-反馈控制系统，提高了控制系统抗扰动能力，避免了控制滞后造成的加热管超温、爆管和接地故障。AP

### 作者简介：

张行天（2002-），男，黑龙江安达人，现就读于郑州大学物理学院，研究方向为无扰动快切装置开发与应用物理。

张大鹏（1975-），男，黑龙江安达人，高级工程师，学士，现就职于中安联合煤化工分公司，研究方向为无扰动快切装置开发。

### 参考文献：

- [1] JBT 2379-2016, 金属管状电热元件[S].
- [2] 任元会. 工业与民用配电设计手册(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 孙亮, 杨鹏. 自动控制原理[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2013.
- [4] GBT 50062, 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S].
- [5] GBT 14285, 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [6] DLT 684, 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].