

安全级低压配电柜耐温极限研究

肖孟男¹, 黄凯², 陈怀宇¹

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

摘要: 为应对安全级低压配电柜存在较高环境温度运行的情况, 采用保护元件降容和高温环境试验的方法对低压配电柜的耐温极限进行分析研究。通过优化计算方法, 得出不同工况低压配电柜的散热量, 分析配电柜内部的温升, 对保护元件进行了降容计算和定值修正, 设计逐步逼近的试验方案, 完成了高温环境试验。研究表明, 安全级低压配电柜能在50℃环境温度正常运行72 h。研究提出的降容计算和环境试验方法可为高温环境中安全级电气设备的设计提供参考。

关键词: 安全级; 配电柜; 高温; 低压

Research on temperature tolerance of safety class low voltage switchgear

XIAO Mengnan¹, HUANG Kai², CHEN Huaiyu¹

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to manage the situation of safety class low voltage distribution switchgear operating in high temperature environment, The method of reducing the capacity of protection elements and high temperature environment test are adopted to research the temperature resistance limit of low voltage distribution switchgear. Through the optimization calculation method, the heat dissipation capacity of low-voltage distribution cabinet under different working conditions is obtained. At the same time, the temperature rise inside the distribution cabinet is analyzed. The capacity reduction calculation and constant value correction of the protection elements are carried out. The gradually approaching test scheme is designed and the high temperature environment test is completed. The results show that the safety class low voltage distribution switchgear can operate normally for 72 hours at 50℃ environment. The method of capacity reduction calculation and environmental test proposed in this study can provide reference for the design of safety electrical equipment in high temperature environment.

Key words: safety class; switchgear; high temperature; low voltage

0 引言

安全级低压配电柜作为核岛配电系统的主要组成部分, 用于在正常和事故工况下为安全相关设备提供电源。配电间通过通风系统使温度维持在35℃以下, 如通风丧失, 则温度升高, 配电柜会误动作, 导致工艺系统无法执行安全功能。

为了保证配电柜在事故工况下正常工作, 华龙一号配电间的通风系统设计为安全级。尽

管如此, 某些工况部分配电间的温度还是可能接近50℃。因此研究配电柜的高温运行机理, 及其耐高温极限, 对于核电站应对事故工况具有非常重要的意义。

本文采用计算和试验的方法对安全级低压配电柜的耐热极限进行了研究。基于散热量的原理, 优化了散热量的计算方法, 通过计算配电柜的温升, 确定了保护元件工作的柜内环境温度。

针对保护元件特性参数随温度变化的特点, 本文提出降容设计方法, 并进行了逐步逼近的高温环境试验。本研究使用的计算和试验方法可为其他高温环境电气设备的设计提供参考。

1 散热量计算方法优化

本文通过分析散热量的来源, 提出按照实际负载电流优化散热量的计算方法, 精确计算华龙一号各工况下配电间的散热量。

1.1 散热量的来源

正常运行过程中, 配电间的变压器、配电柜、电缆和照明灯具都会产生热量, 其中变压器的热量来自铜损(负载损耗)和铁损(空载损耗), 配电柜的热量主要来自一次和二次元件的功耗, 照明的热量来自于灯具损耗和热辐射, 电缆的热量来自于电阻的损耗。

1.2 散热量计算方法

(1) 变压器

变压器的散热量由铜损和铁损两部分组成, 其中铜损随负载大小而变化, 铁损与负载大小无关。根据各工况设备运行清单, 统计变压器的负载系数, 就可以计算出变压器的散热量, 计算公式为

$$\Delta P_T = P_0 + \beta P_K \quad (1)$$

式中, ΔP_T 为变压器的散热量; P_0 为变压器的空载损耗; β 为变压器的负载系数; P_K 为变压器的负载损耗。

(2) 低压配电柜

配电柜的散热量与实际运行负载的数量和电流有关。通过厂家的工程设计手册查出各负载的一次回路电阻和二次回路的散热量, 按式(2)计算其散热量, 即

$$P_d = I_n^2 R_1 + P_2 \quad (2)$$

式中, P_d 为配电回路的散热量; R_1 为一次回路电阻; I_n 为负荷实际电流; P_2 为二次回路散热量。

母排的散热量计算式为

$$P_b = P_v L \left(\frac{I_b}{I} \right)^2 \quad (3)$$

式中, P_v 为相母排额定电流时的散热量; P_b 为母排的散热量; L 为母排长度; I_b 为母排实际电流; I 为母排额定电流。

华龙一号配电柜相母排功耗如表1所示。

表1 华龙一号配电柜相母排功耗

Tab. 1 Power consumption of phase busbar of distribution switchgear in HPR1000

母排位置	母排规格/mm×mm	额定电流/A	实际电流/A	实际功耗/(W/m)
垂直	50×10	554	156	3.9
水平	2×60×10	1 118	850	12

$$P_s = \sum_1^n P_d + 3 \sum_1^m P_b \quad (4)$$

式中, P_s 为配电柜散热量; P_d 为配电回路的散热量; n 为配电回路数量; P_b 为相母排的散热量; m 为相母排数量。

按式(4)可得到配电柜各类工况下的散热量。核岛低压系统的谐波畸变率在5%以下, 且为三相三线制, 因此本文不考虑谐波引起的散热量。

华龙一号低压配电柜散热量如表2所示。

表2 华龙一号低压配电柜散热量

Tab. 2 Heat output of low voltage distribution switchgear in HPR1000

系统编码	散热量/W	
	系统	单柜
EEA	834	209
EEB	1 051	210
EEC	1 002	200
EED	1 104	221
EEE	793	159
EEI	961	120
EEJ	1 051	150
EEK	1 045	261
EEO	1 087	272
EEN	1 134	227
EEL	492	164

(3) 照明灯具

照明散热量采用功率密度法^[4], 配电间按照8 W/m²计算。

$$\Delta P_l = 8S \quad (5)$$

式中, S 为配电间的面积。

(4) 电缆

电缆的散热量按照设备实际电流进行计算,

单根 n 芯电缆散热量计算式为

$$P=nI_n^2R_{90}L \quad (6)$$

式中, P 为单根电缆的散热量; I_n 为负载的实际电流; R_{90} 为90℃时导体的交流电阻; L 为电缆长度。

2 散热量计算结果

根据事故分析的结果, 电厂功率运行、一回路失水(LOCA)事故和丧失交流电源三种工况可包络配电间高温环境条件, 因此选择这几种工况进行散热量计算。散热量的计算结果用于计算配电间的温度。

2.1 电厂功率运行

连续运行负荷按实际电流进行计算, 不考虑瞬时负荷对散热量的贡献, 华龙一号各配电间散热量如表3所示。

表3 华龙一号功率运行时各配电间的散热量

Tab. 3 Heat output of distribution room during power operation in HPR1000

配电间	设备/kW	电缆/kW	照明/kW	总计/kW
N351	7.07	1.3	0.43	8.80
S513	16.69	1.51	0.86	19.06
S514	10.39	1.22	1.02	12.63
S720	10.43	0.11	0.96	11.50
S724	13.17	0.35	0.99	14.51
S725	9.24	0.26	0.46	9.96
S721	0.4	0.23	0.45	1.08

2.2 一回路失水(LOCA)事故工况

连续运行负荷按额定电流进行计算, 不考虑瞬时负荷对散热量的贡献, 华龙一号LOCA事故工况各配电间散热量如表4所示。

表4 LOCA叠加通风失效时配电间的散热量

Tab. 4 Heat output of distribution room in case of LOCA superimposed ventilation failure

配电间	设备/kW	电缆/kW	照明/kW	总计/kW
N351	7.17	1.30	0.43	8.90
S513	17.95	1.86	0.86	20.67
S514	9.98	1.90	1.02	12.90
S720	9.43	0.09	0.96	10.48
S724	15.27	0.36	0.99	16.62
S725	7.48	0.26	0.46	8.20
S721	0.40	0.34	0.45	1.19

2.3 丧失交流电源

华龙一号直流及交流不间断电源系统因配置有蓄电池, 加上SBO电源的低压设备, 0~2 h散热量如表5所示。

表5 丧失交流电源0~2 h内配电间散热量

Tab. 5 Heat output of distribution room when loss AC power within 2 hours

配电间	设备/kW	电缆/kW	总计/kW
S513	0.90	0.30	1.20
S514	1.20	0.40	1.60
S724	1.20	0.54	1.74

380 V UPS系统的蓄电池有72 h的放电时间, 2~72 h除SBO柴油发电机和380 V UPS系统的配电设备, 其他房间全部失电, 无散热量。计算出的散热量如表6所示。

表6 丧失交流电源2~72 h配电间散热量

Tab. 6 Heat output of distribution room when loss AC power in 2~72 hours

配电间	设备/kW	电缆/kW	总计/kW
S513	0.90	0.30	1.20
S514	1.20	0.40	1.60
S724	1.20	0.54	1.74

3 配电柜内部温升计算

由配电柜的散热量和结构尺寸可以计算出柜内的温升^[3], 加上配电间的温度就能算出柜内的温度。首先按照式(7)由外壳表面积和表面系数算出有效散热面积, 即

$$A_e = \Sigma(A_0 \times b) \quad (7)$$

式中, A_e 为外壳有效散热面积; A_0 为外壳表面积; b 为表面系数。

计算结果如表7所示。

表7 有效散热面积计算结果

Tab. 7 Calculation table of effective heat dissipation area

位置	尺寸/m×m	A_0/m^2	b	$A_0 \times b/m^2$
顶部	1.0×0.6	0.6	1.4	0.84
前部	1.0×2.2	2.2	0.9	1.98
后部	1.0×2.2	2.2	0.9	1.98
左侧	0.6×2.2	1.32	0.9	1.188
右侧	0.6×2.2	1.32	0.9	1.188
A_e				7.176

由 A_c 可查得外壳常量为 $k=0.125$ ；配电柜隔板数量按3考虑， $d=1.3$ ；有效功率损耗取表3中最大值272 W；配电柜的有效散热面积大于 1.25 m^2 ，指数 $x=0.804$ ，按照式(8)可得到外壳高度中性点处的空气温升为 14.7°C 。关于配电柜温升计算方法的详细介绍见文献[3]。

$$\Delta t_{0.5}=kdP^x=14.7 \quad (8)$$

外壳顶部的温度按照式(9)计算，其中温度分布系数 c 可在温度分布系数曲线^[3]由高/底比系数 f 查询，其计算公式式。

$$\Delta t_{1.0}=c\Delta t_{0.5} \quad (9)$$

式中， $\Delta t_{1.0}$ 为外壳顶部温升； c 为温度分布系数。

$$f=\frac{h^{1.35}}{A_b}=\frac{2.2^{1.35}}{1.0\times 0.6}=4.8 \quad (10)$$

式中， f 为高/底比系数； h 为外壳高度； A_b 为外壳底部面积。

由此可查得分布系数 c 为1.37，由式(9)计算可知柜内顶部温升为 20°C ，配电间温度 50°C 时，柜内最高温度为 70°C 。

4 保护元件选择和降容设计

热继电器、断路器和熔断器受温度影响较大，需降容运行，下面分别进行说明。

4.1 塑壳断路器

断路器热脱扣器的动作特性参数是在 40°C 环境温度时得出的， 70°C 需按照表8进行校正，如温度高于 70°C 时，脱扣器的特性未知。

表8 热脱扣器温度校正

Tab. 8 Temperature correction table of thermal release

I_n/A	40°C		70°C	
	MIN	MAN	MIN	MAN
6.3	4.4	6.3	3.6	5.1
16	11	16	9	13
32	22	32	18	26
63	44	63	36	51
80	56	80	45	65
100	70	100	56	81

4.2 熔断器

熔断器的载流能力试验是在 20°C 环境温度下进行的，其环境温度—额定电流曲线如图1所示。

柜内温度达到 70°C 时，需按照温度—额定电流曲线进行校正。

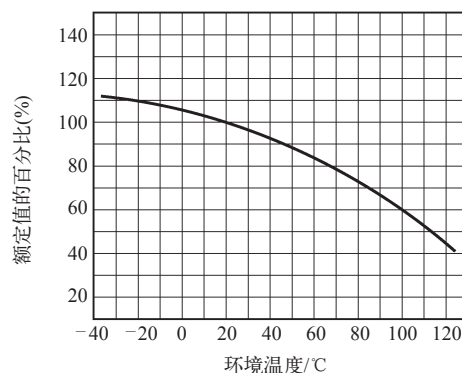


图1 熔断器温度—额定电流曲线

Fig. 1 Temperature - rated current curve of fuse

从图1中可以看出，随着温度升高，熔断器的额定电流逐渐减小， 70°C 时，额定电流为 20°C 时的78%，为确保熔断器不发生误动作，需按式(11)重新选择熔断器的额定电流，即

$$I_n^{70}=\frac{I_n}{0.78} \quad (11)$$

式中， I_n^{70} 为 70°C 时熔断器的额定电流； I_n 为环境温度为 20°C 时的额定电流。

4.3 热继电器

双金属片型热继电器跳闸极限曲线如图2所示。由图2可知：在 55°C 时，约定不脱扣电流倍数由1.05倍下降到0.9倍；高于 55°C 时，跳闸特性未知。因此在柜内 70°C 高温环境下，不能使用双金属片式的热继电器，而需选择电子式热继电器，防止温度对脱扣性能的影响。

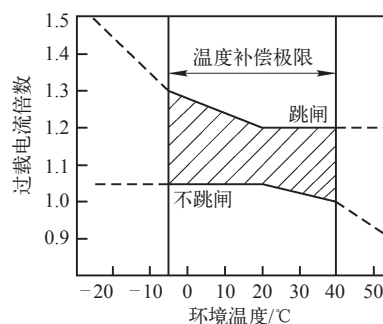


图2 温度高于 20°C 时的跳闸极限值

Fig. 2 Trip limit when temperatures above 20°C

5 低压开关柜的高温环境试验

根据不同工况的散热量计算配电间的环境温度，其温度包络曲线如图3所示。

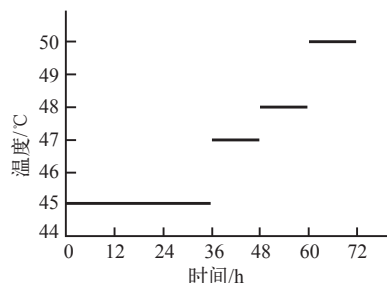


图3 配电间温度包络曲线

Fig. 3 Envelope temperature curve of distribution room

利用抗震试验后的样机，按照单台配电柜最高散热量272 W选择回路，试验温升曲线满足配电间的温度包络曲线，高温环境性能试验按照如下原则进行：①配电柜在高温环境下不会异常脱扣。②高温环境下开关柜内的温度应不高于70℃。③高温环境试验后，性能基准试验结果满足标准要求。

本文设计了三个阶段试验，采用逐步逼近的方法，考验配电柜的耐温极限，试验过程如下：

1) 第一阶段（0~24 h），其中环境温度为45℃，如本阶段试验通过，则证明开关柜能在45℃环境温度下持续工作24 h，如图4所示。

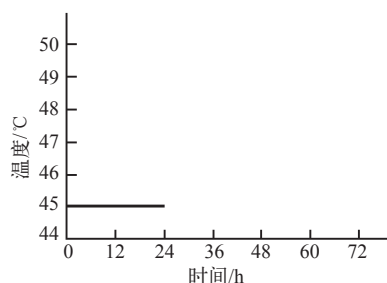


图4 第一阶段试验温度曲线

Fig. 4 Temperature curve of the first stage test

2) 第二阶段（0~48 h），其中环境温度为45~50℃（其中0~21 h温度为47℃，从21~24 h逐渐升高到48℃，24~33 h温度为48℃，33~36 h温度逐渐升高至50℃，36~48 h温度为50℃）。如通过第二阶段试验，则说明在事故工况下温度上升到50℃的48 h内，配电柜可正常工作，如图5所示。

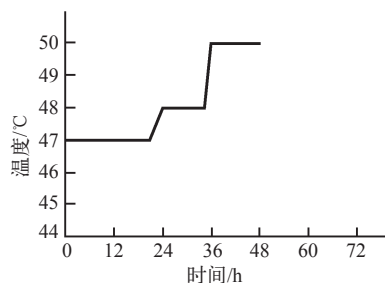


图5 第二阶段试验温度曲线

Fig. 5 Second stage test temperature curve

3) 第三阶段（第0~72 h），其中环境温度为50℃，如通过第三阶段试验，则说明配电柜可在50℃环境温度下持续工作72 h，如图6所示。

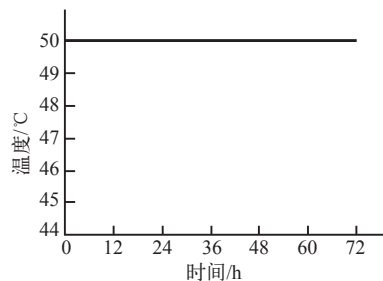


图6 第三阶段试验温度曲线

Fig. 6 Third stage test temperature curve

试验结果表明，低压配电柜在三个阶段的试验过程中未异常脱扣，配电柜内的最高温度低于70℃，试验后的基准性能满足标准要求。可知该配电柜可在50℃环境温度下持续工作72 h。

6 结束语

本研究分析了散热量的来源，提出了按工况计算电气设备散热量的方法，利用温升计算方法确定了保护元件工作的环境温度，通过保护配合优化和高温环境试验，研究了安全级低压配电柜的耐温极限。通过分析和试验得到如下结论。

1) 按工况计算电气设备散热量，是与实际运行情况接近的计算方法。

2) 高温环境下需保证柜内温度低于70℃，否则部分元件的运行特性未知，无法保证正常运行，同时需按柜内温度对保护配合参数进行校正。

3) 配电间环境温度50℃，配电柜内的最高温度达到70℃。安全级低压配电柜能在50℃环

境温度下正常运行72 h。

本文采用的研究方法可以为其他电气设备在高温环境运行能力的探索提供参考。

参考文献

- [1] 陈延鏢.钢铁企业电力设计手册[M].北京:冶金工业出版社,1996.
- [2] 刘屏周.工业与民用供配电设计手册[M].4版.北京:中国电力出版社,2016.
- [3] 天津电气科学研究院有限公司.通过计算进行低压成套开关设备和控制设备温升验证的一种方法:GB/T 24276-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [4] 中国建筑科学研究院.建筑照明设计标准:

GB50034-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

- [5] 杨金国.MNS3.0低压开关柜设备运行及维护手册[Z].2017.

作者简介



肖孟男

肖孟男(1981-),男,高级工程师,主要研究方向为核电站电气系统设计。

(收稿日期:2020-09-28)EA

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2021《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容,力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举,以丰富内涵充实经典栏目,持续深化专家视点、EA经理人等栏目,密切关注电气技术的发展和运用。

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题,隆重推出一场专题讨论的盛宴,共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂,针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用,以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间,促进应用经验交流。

国内邮发代号:82-341 国外发行代号:M1409

每期定价:30.00元 全年定价:360.00元



· 电气应用 盛情呈现 ·

2021