

合成泡沫喷雾灭火系统应用于变压器灭火的设计与计算

史艳芳

(广东天联电力设计有限公司, 广州 510663)

摘要: 合成泡沫喷雾灭火系统在大型油浸式主变压器的消防设计中得到越来越多的应用。文章阐述了合成泡沫喷雾灭火系统的系统构成和动作流程, 结合工程实例对主要设计与计算过程进行了梳理, 并对如何使合成泡沫喷雾灭火系统的设计与计算更加合理、规范提出了相应的建议。

关键词: 油浸式主变压器; 合成泡沫喷雾灭火系统; 设计; 计算

中图分类号: TU892

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0107-06

Design and Calculation of the Synthetic Foam Spray System for Transformers Protection

SHI Yanfang

(Guangdong Tianlian Electric Power Design Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The applications of synthetic foam spray systems are more and more in the fire protection design of large oil-immersed main transformer. The system configuration and operation processes of the synthetic foam spray systems are described in the paper, the main design and calculation processes are combed based on engineering projects, and the corresponding recommendations are proposed to make the design and calculation of the synthetic foam spray systems more rational and standardized.

Key words: oil-immersed main transformer; synthetic foam spray system; design; calculation

目前, 我国在建和运行的变电站中, 油浸式主变压器的应用是最普遍的。根据统计, 主变压器着火主要是由短路、故障导致的局部过热、电火花、电弧等引起的^[1], 由于变压器内充装了大量的具有绝缘和散热双重作用的可燃变压器油, 而变压器油在温度过高时极易分解为氢、甲烷和乙炔^[2], 分解产生的这些气体使得变压器内部压力快速升高, 导致套管和焊缝等薄弱位置爆裂, 从而引发大火。因此, 主变压器灭火系统需具备快速冷却、窒息的特点, 现阶段主变压器常用的消防灭火方式主要有水喷雾灭火、合成泡沫喷雾灭火及排油注氮灭火三种方式。合成泡沫喷雾灭火由于其适用于扑灭热油流淌的火灾、对环境无毒害、系统管路简单、前期投资少等特点越来越受到重视, 在缺

水地区的变电站得到大量采用, 在不缺水地区的变电站得到试点推广。但由于目前合成泡沫喷雾系统的设计与计算可依据的规范及可参考的资料较少, 还没有形成系统、清晰的设计计算过程, 因此, 笔者结合工程实例, 提出自己的设计、计算观点, 使得合成泡沫喷雾灭火系统的设计、计算更加规范、合理。

1 合成泡沫喷雾灭火系统简介

1.1 系统构成

合成泡沫喷雾灭火系统主要由泡沫储液罐、合成泡沫灭火剂、启动源、氮气动力源、控制阀、控制盘、水雾喷头及管网等组成, 详见图 1。其中, 合成泡沫灭火剂为以表面活性剂和适量的添加剂为基料制成的泡沫灭火剂; 启动源由启动瓶组和电磁阀组成, 平时储存高压气体, 工作时能通过自动、手动和机械应急操作方式释放气体, 用以打开动力源; 氮气动力源由储压气瓶和减压阀组成, 平时储

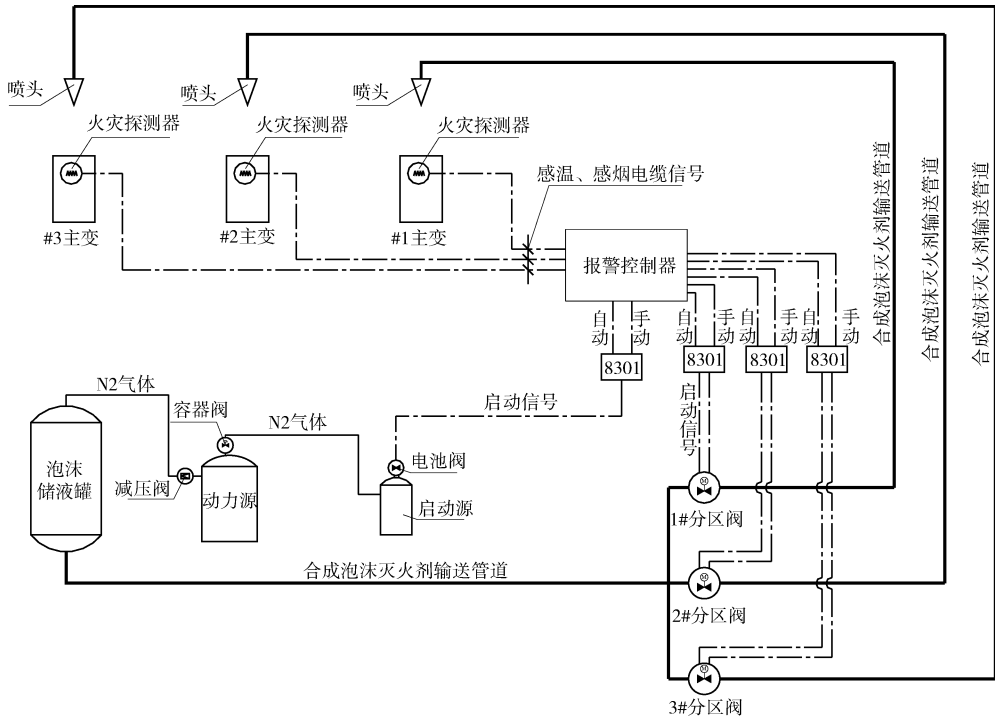


图1 合成泡沫喷雾灭火系统图

Fig. 1 Diagram of Synthetic Foam Spray System

存一定容积的高压气体，工作时向储液罐输送设计工作压力范围的增压气体，以推动泡沫液通过管网经喷头喷入火场。

1.2 系统动作流程

当主变区域出现火险时，火灾探测器向报警控制器发出火灾信号，报警控制器立即发出声、光警报，在接收到温感、烟感两组火灾探测器的火灾信号后，报警控制器发出联动指令，启动疏散报警，经过0~30 s延时后打开相应的分区阀和启动源电磁阀，启动源释放出的启动气体打开动力源的容器阀，动力源储存的高压气体随即通过减压阀，进入储液罐中，推动泡沫灭火剂通过分区阀、管网和水雾喷头喷向着火主变。

合成泡沫喷雾灭火系统除能实现自动探测火灾并自动释放泡沫灭火剂实施灭火的自动控制外，还能手动控制及机械应急手动操作。当主变压器发生火灾时，现场管理人员手动按下启动按钮即可按上述规定流程释放泡沫灭火剂，实施灭火。当自动控制和手动控制均无法执行时，可由现场管理人员使用专用扳手先打开相应的分区阀，再拔掉对应启动源电磁阀上的保险卡环，然后按下电磁阀的铜按钮，实现灭火剂的释放^[3]。合成泡沫喷雾灭火系统

工作原理详见图2。

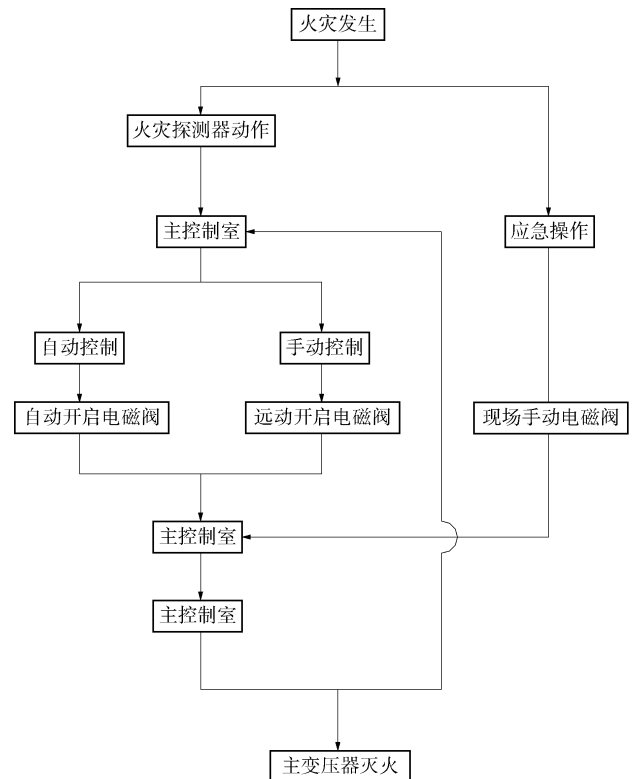


图2 系统工作原理图

Fig. 2 Principle Diagram of Action

2 设计与计算

2.1 设计参数及依据

广东某地电压等级为 220 kV 的变电站, 内设 4 台容量为 180 MVA 的主变压器, 室外布置, 变压器外形尺寸长、宽、高分别为 9 m、6 m、4 m, 主变油枕直径 1.3 m、长 3.3 m, 主变油坑长 14 m、宽 9 m。根据《火力发电厂与变电站设计防火规范》(GB 50229—2006), 本站主变容量大于 125 MVA, 应设置水喷雾灭火系统、合成型泡沫喷雾系统或其他固定式灭火装置, 且同一时间火灾次数按一次考虑。因此, 本站主变消防拟设计 1 套合成泡沫喷雾灭火系统, 采用组合分配方式同时保护 4 台主变。

主变压器合成泡沫喷雾灭火系统设计依据包括:《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)、《合成型泡沫喷雾灭火系统应用技术规程》(CECS 156—2004)、《泡沫喷雾灭火装置》(GA 843—2009)、《水喷雾灭火系统设计规范》(GB 50219—2014)、《自动喷水灭火系统设计规范》(GB 50084—2001)、《Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection》(NFPA 15—2007) 及设备厂家提供的资料。

2.2 泡沫灭火剂设计用量的计算

2.2.1 计算公式

扑灭一次火灾所需合成泡沫灭火剂的设计用量按计算式(1)计算:

$$M = S \times W \times T \quad (1)$$

式中: M 为扑灭一次火灾所需合成泡沫灭火剂的设计用量, L; S 为保护面积, m^2 ; W 为合成泡沫灭火剂的供给强度, $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; T 为合成泡沫灭火剂连续供给时间, min。

2.2.2 保护面积的确定

《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010) 第 7.4.2 条第 1 款规定: 当保护油浸电力变压器时, 系统保护面积应按变压器油箱本体水平投影且四周外延 1 m 确定。

根据笔者在实际工程设计当中遇到的情况, 设计人员对于变压器油箱本体包不包含散热器存在争议。由于变压器形状不规则且表面凹凸不平, 若油箱本体按照不包含主变散热器考虑, 则系统设计流量较小, 变压器表面的凸出构件有可能影响泡沫流淌覆盖, 造成灭火失败。因此, 本文参照《水喷雾

灭火系统技术规范》(GB 50219—2014) 及美国 NFPA 15 中水喷雾灭火系统对变压器整个外表面全防护的要求, 变压器油箱本体按包含散热器考虑。

本文变压器设有带卵石层的油坑, 根据《水喷雾灭火系统技术规范》(GB 50219—2014), 水喷雾灭火系统的保护面积除了包含整个外表面还包含主变油坑, 但美国 NFPA 15 中规定的变压器的保护面积并没有考虑带卵石层的油坑。由于变压器排油时所涉及的周围地面通常为变压器底部向四周延长 1 m 后的范围^[4], 因此, 本文系统保护面积根据《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010) 第 7.4.2 条第 1 款规定, 按照主变本体(含散热器)水平投影且四周外延 1 m 考虑, 即 $S = 11 \times 8 = 88 \text{ m}^2$ 。

2.2.3 泡沫灭火剂设计用量的计算

根据《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010) 第 7.4.2 条, 供给强度 W 取 $8 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; 连续供给时间 T 取 15 min。计算得合成泡沫灭火剂的设计用量 $M = 88 \times 8 \times 15 = 10\ 560 \text{ L}$ 。

2.3 喷头的布置及选型

泡沫喷雾灭火原理是利用体积小、表面被液体包围的气泡群在着火物体表面形成一个泡沫覆盖的漂浮层。泡沫具有一定的黏度, 可以随可燃液体流淌也可以粘附于可燃固体的表面, 借助泡沫的冷却、窒息、乳化、隔离等综合作用实现迅速灭火。由于泡沫喷雾具有粘性和流动的特点, 泡沫喷雾喷头不需完全包络主变, 根据相关厂家经验, 只需在主变上方布置一排喷头即可。

根据《泡沫喷雾灭火装置》(GA 843—2009) 第 5.4 条, 泡沫喷雾灭火系统喷头采用水雾喷头, 根据水雾喷头的喷射曲线及布置原则进行本系统喷头布置, 详见图 3。图中所示, 主变本体共布置 12 只喷头保护, 单个喷头保护面积为 7.3 m^2 , 喷头距离主变本体约 1.2 m, 喷头间距 1.5 m; 油枕上方布置 3 只喷头保护。喷头布置满足《合成型泡沫喷雾灭火系统应用技术规程》(CECS 156—2004) 表 3.2.1 中规定的单只水雾喷头最大保护面积 12.5 m^2 、最大水平间距 3.6 m 的要求, 满足水雾喷头水雾锥相交原理的要求。

水雾喷头的计算流量按式(2)计算:

$$q = \frac{S \times W}{N} \quad (2)$$

式中: q 为单个喷头的计算流量, L/min ; N 为喷

头数量, 个; S 、 W 同上。

计算得喷头流量系数:

$$K = \frac{q}{\sqrt{10p}} \quad (3)$$

式中: K 为喷头流量系数; p 为喷头最低工作压力; q 同上。根据《合成泡沫喷雾灭火系统应用技术规程》(CECS 156—2004) 表 3.2.1, 喷头工作压力不小于 0.35 MPa, 计算得 $K=25.1$, 根据水雾喷头国家标准, 选用 $K=27$ 的喷头。

2.4 水力计算及管径确定

绘制系统轴测图, 确定最不利管段, 如图 4 所示。

由于泡沫混合液中水的成份占 96% 以上, 有的高达 99% 以上, 具有水流体特点, 所以在水力计算时, 泡沫混合液可按水对待。泡沫喷雾灭火系统管道可采用自动喷水灭火系统的特性系数法进行水力计算, 计算过程如下:

2.4.1 管段流量的计算

自节点 1 开始, $q_{1-2} = q_1 = K\sqrt{10p}$, $h_1 = p = 0.35\text{MPa}$, $h_2 = h_1 + \Delta h_{1-2}$, $h_3 = h_2 + \Delta h_{2-3}$ 。自节点 a 开始, $h_3' = h_2 = h_1 + \Delta h_{1-2}$, $h_a = h_1 = p = 0.35\text{MPa}$ 。根据特性系数法, 则:

$$q_{a-3} = q_{1-2} \sqrt{\frac{h_3}{h_3'}}, q_{3-4} = q_{1-2} + q_{a-3} \dots \quad (4)$$

式中: q_{1-2} 为管段 1~2 的流量; h_1 为节点 1 的压力; Δh_{1-2} 为管段 1~2 的水头损失; h_3' 为为不同计

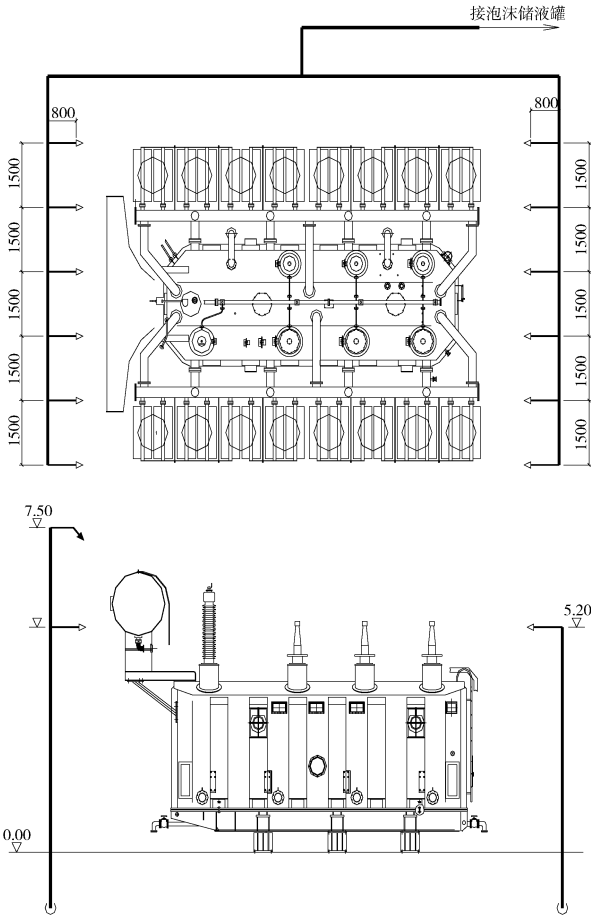


图 3 喷头布置图

Fig. 3 Layout Drawing of Nozzles

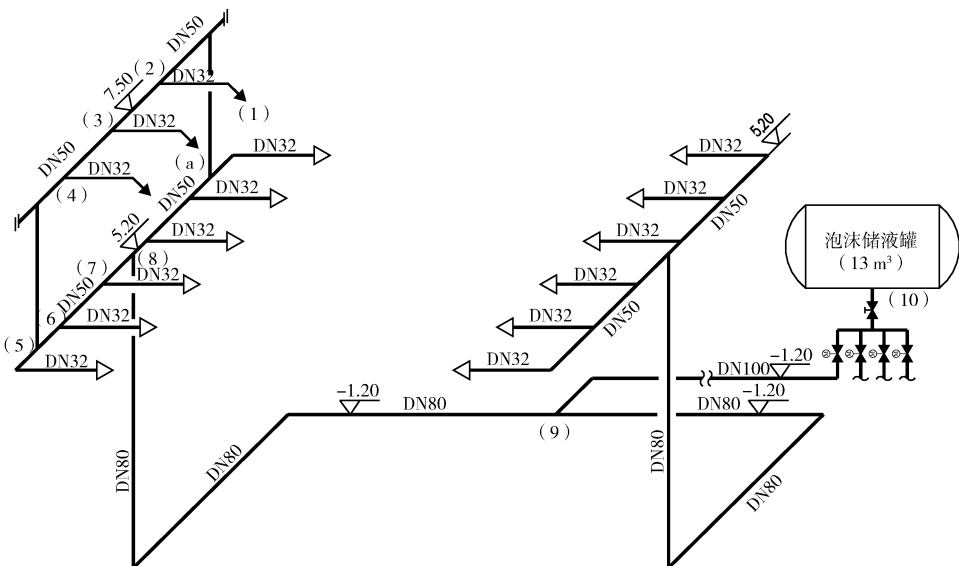


图 4 系统轴测图

Fig. 4 Axonometric Drawing of Synthetic Foam Spray System

算方向算得的节点3的压力; 以此类推。计算得单个喷头流量 q 为46.93 L/min。根据式(3)

2.4.2 管道水头损失的计算

本文泡沫喷雾管道为干式供液管道, 管材采用双面热镀锌钢管, 根据《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)第9.2.2条, 沿程水头损失按式(5)计算:

$$i = 0.000\ 010\ 7 \frac{V^2}{d_j^{1.3}} \quad (5)$$

式中: i 为管道单位长度水头损失, MPa/m; V 为管道内泡沫混合液的平均流速, m/s; d_j 为管道的计算内径, m。

局部水头损失采用当量长度法计算, 当量长度根据《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)第9.2.3条条文说明中表7所列当量长度相应选取。

泡沫喷雾管道的水头损失按式(6)计算:

$$\Delta h = i(L_1 + L_2) \quad (6)$$

式中: Δh 为管道水头损失, MPa; L_1 为管道长度, m; L_2 为管件、阀门的当量长度, m; i 同上。

2.4.3 系统供给压力的计算

根据《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)第9.2.4条, 泡沫喷雾灭火系统供给压力按式(7)计算:

$$H = \sum h + p + h_z \quad (7)$$

式中: H 为系统供给工作压力, MPa; $\sum h$ 为管道沿程和局部水头损失之和, MPa; p 为最不利喷头的最低工作压力, MPa, 即0.35 MPa; h_z 为最不利喷头与储液罐出水管中心线的静压差, MPa。

2.4.4 水力计算结果

泡沫喷雾灭火系统水力计算结果见表1。由表1可知, 泡沫喷雾灭火系统实际喷放灭火剂的量为 $M_0 = 13.09 \times 60 \times 15 = 11\ 781$ L, 系统供给压力 $H = 0.191 + 0.35 + 0.072 = 0.613$ MPa。

2.5 设备选型

2.5.1 储液罐

水力计算可知, 灭火剂实际喷放量为11 781 L, 则合成泡沫灭火剂的储存量 $G = 1.05 \times M_0 = 12\ 370$ L, 其中1.05为考虑储液罐及管道容量的安全系数。设计选用容积为13 m³、工作压力为0.75 MPa的不锈钢储液罐, 内充装12 370 L泡沫灭火剂。

2.5.2 动力瓶组

根据厂家提供的动力气瓶的型号, 拟选用70 L、储存压力为15 MPa的动力瓶组。系统所需动力瓶组数量按式(8)计算:

$$N = \frac{P_2 V_2}{(P_1 - P_2) V_1} \cdot k \quad (8)$$

式中: N 为所需氮气瓶组数量, 只; P_1 为氮气瓶组储存压力, MPa; P_2 为系统储液罐出口压力, MPa; V_1 为单个氮气瓶组容积, L; V_2 为系统储液罐容积与氮气管路容积之和, L; k 为裕量系统, 不小于1.5。

经计算, $N = 12.0$, 取动力瓶组数量为12只。

3 结论

由上可知, 系统灭火剂实际喷放量为11 781 L, 大于设计用量10 560 L, 满足设计要求; 各管

表1 泡沫喷雾灭火系统水力计算表

Table 1 Hydraulic Calculation Table of Synthetic Foam Spray System

管段编号	流量 $q/(L/s)$	管径 d/mm	流速 $V/(m/s)$	管道长度 L_1/m	当量长度 L_2/m	水头损失 $\Delta h/MPa$	位置高差/MPa
1~2	0.84	32	1.05	0.8	0.4	0.002	0
2~3	0.84	50	0.43	1.5	3.1	0.000	0
3~4	1.68	50	0.86	1.5	3.1	0.002	0
4~5	2.53	50	1.29	3.0	6.2	0.008	0.023
5~6	3.41	50	1.74	0.75	3.1	0.006	0
6~7	4.30	50	2.19	1.50	3.1	0.012	0
7~8	5.20	50	2.65	0.75	3.1	0.014	0
8~9	7.81	80	1.55	18	12.5	0.021	0.064
9~10	13.09	100	1.67	120	93.3	0.126	-0.015
合计						$\sum h = 0.191$	$h_z = 0.072$

段流速均小于 5 m/s, 满足《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)第 9.2.1 条第 3 款主管道流速不大于 5 m/s、支管道流速不大于 10 m/s 的要求。因此, 本系统设计、计算合理。

对于《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)中油箱本体包不包含主变散热器的问题, 本文参考相关规范综合考虑按照包含主变散热器设计, 在此提出与各同行商榷并希望规范编委会予以明确。

参考文献:

- [1] 沈海涛. 变压器火灾及预防 [J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(3): 69-71.
SHEN Haitao. Transformer Fire and Its Prevention [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005, 1(3): 69-71.
- [2] 李殿臣, 梁戈, 陈雪峰. 变电站灭火系统应用探讨 [J]. 消防科学与技术, 2011, 30(7): 612-614.

- LI Dianchen, LIANG Ge, CHEN Xuefeng. Application of Fire Extinguishing Systems for Substation [J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(7): 612-614.
- [3] 高振锡, 阎玲, 王瑞. 泡沫喷雾灭火系统设计计算 [J]. 消防科学与技术, 2010, 29(2): 126-128.
GAO Zhenxi, YAN Ling, WANG Rui. Design and Calculation of The Synthetic Foam Spray System [J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(2): 126-128.
- [4] 徐明. 变压器水喷雾消防系统设计的考虑 [J]. 四川电力技术, 2003, 1(3): 17-21.
- [5] GB 50151—2010, 泡沫灭火系统设计规范 [S].
- [6] CECS 156—2004, 合成型泡沫喷雾灭火系统应用技术规程 [S].
- [7] GA 843—2009, 泡沫喷雾灭火装置 [S].
- [8] GB 50219—2014, 水喷雾灭火系统技术规范 [S].
- [9] GB 50084—2001, 自动喷水灭火系统设计规范 [S].
- [10] NFPA 15—2007, Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection [S].

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 106 页 Continued from Page 106)

参考文献:

- [1] 侯丽, 刘琦, 鲁宝春. UPFC 控制器设计 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 51-54.
HOU Li, LIU Qi, LU Baochun. Controller design for UPFC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 51-54.
- [2] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉. 统一潮流控制器在南京西环网的应用 [J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.
CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of UPFC in Nanjing Western Power System [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 73-78.
- [3] 习贺勋, 汤广福, 刘杰, 等. 800kV/4 750 A 特高压直流输电换流阀研制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 15-22.
XI Hexun, TANG Guangfu, LIU Jie, et al. Development of the ± 800 kV/4 750 A Ultra High Voltage Direct Current Converter Valve [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 15-22.
- [4] GB 50116—2013. 火灾自动报警系统设计规范 [S].
- [5] GB 50229—2006. 火力发电厂与变电所设计防火规范 [S].
- [6] 马春英, 王亚慧. 大型卖场火灾自动报警及消防联动系统的设计分析 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 459-464.
MA Chunying, WANG Yahui. Design Analysis of Large Stores Automatic Fire Alarm and Fire Linkage System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 459-464.
- [7] 潘俊锐, 曹俊生. 特高压直流换流站消防系统分析 [J]. 电气技术, 2014(12): 95-97.
PAN Junrui, CAO Junsheng. Fire Extinguisher System's Analysis of UHVDC Converter Station [J]. Electrical Engineering, 2014(12): 95-97.
- [8] 于永正. 紫外火焰探测器性能综合检测平台设计 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2009.
YU Yongzheng. Integrated Design on UV Flame Detector Performance Testing Platform [D]. Heilongjiang: Harbin Engi-

- neering University, 2009.
- [9] 徐辉. 换流站阀厅消防报警改跳闸的实施与保护策略 [J]. 中国科技成果, 2014(17): 67-69.
- [10] 吴家骏. 火灾自动报警系统设计 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
Wu Jiajun. The Design of Fire Automatic Alarm System [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [11] 郭云鹤. 火灾自动报警系统在变电站中的应用和发展 [J]. 华东电力, 2007, 35(6): 92-94.
GUO Yunhe. Application and Development of Automatic Fire Alarm Systems in Substations [J]. East China Electric Power, 2007, 35(6): 92-94.
- [12] 刘海燕. 火灾自动报警系统原理及联动应用 [J]. 测控技术, 2005(3): 71-75.
Liu Haiyan. Principle of Fire Auto-alarm System and Application of Linkage Control [J]. Measurement & Control Technology, 2005(3): 71-75.
- [13] SCHAUDER C, KERI A, EDRIS A, et al. AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of the 60 MVA STATCOM (Phase 1) [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1530-1535.
- [14] 王莹, 甄宏宁, 常宝立, 等. UPFC 在南京西环网中的应用需求分析 [J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1): 53-56.
WANG Ying, ZHEN Hongning, CHANG Baoli, et al. Research on the Application of UPFC in Nanjing Western Grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 53-56.
- [15] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 41-45.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC System Control Strategy Research in Nanjing Western Power Grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 41-45.

(责任编辑 高春萌)