

大容量直流融冰系统在 500 kV 康定变的应用

吴林平, 田杰, 李长伟, 吴俊, 李敏
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211100)

摘要:研制了 12 脉动整流融冰方式、额定输出直流电流 5000 A 下容量最大的直流融冰系统。根据融冰交流线路参数, 对 PCS-9590 融冰系统设计研制过程中几个比较重要的方面, 包括融冰方案、主电路设计、过电压和绝缘配合、控制保护系统等进行了较为详细的论述。现场应用表明, 直流融冰是解决线路覆冰、缓解冰雪灾害的有效方案。

关键词:直流融冰; 直流融冰系统; 融冰方案; 主电路设计; 零功率试验

中图分类号: TM726

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0026-05

目前, 国内外输电线路的防冰、除冰大致有以下几类技术手段: 通过调度改变潮流, 自藕变压器加多分裂导线, 交流短路融冰法, 直流电流融冰法和阻性线融冰法等^[1,2], 其中, 直流融冰在融化线路覆冰方面效果显著, 目前已有多个直流融冰系统在四川、湖南、云南、贵州等地区投入了实际运行^[3-6]。已投运的系统有 12 脉动晶闸管带整流变结构、6 脉动晶闸管带整流变结构、6 脉动晶闸管不带整流变结构、6 脉动二极管带整流变等多种结构形式, 有纯融冰和融冰兼 SVC2 种系统, 存在一相进一相出、一相进二相出两种运行方式^[7-12]。直流融冰系统需要根据不同站的线路型号、长度等因素具体设计, 确定具体的设备参数。四川 500 kV 康定变是一座枢纽变电站, 站内有 10 条 500 kV 线路在冬季有融冰需求。2012 年 12 月, 一套大容量的直流融冰系统在康定变成功投运。文中结合 500 kV 康定变电站内的直流融冰系统的研制情况, 对直流融冰设计开发过程中几个比较重要的方面作一论述, 为今后类似工程的开发建设提供参考。

1 融冰方案

1.1 融冰容量

康定变交流线路参数见表 1, 其中最长的 500 kV 线路——康定—崇州(I, II 回)型号为 LGJ-630/45, 长度约 202.5 km, 按环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风速 5 m/s, 覆冰厚度 10 mm, 融冰时间为 1 h 计算, 最小融冰电流达 5000 A, 最小融冰功率 117.27 MW^[1]。

取康定变融冰系统的额定直流电压为 24.54 kV, 直流融冰容量为 122.7 MW, 该参数满足所有出线的融冰需要。

1.2 主回路结构

从康定变电站 35 kV 母线引入电源, 直流融冰系统接在 35 kV 母线上, 经由 1 台三相三绕组整流变压器, 2 组 6 脉动整流阀组接在变压器的低压侧, 待融

表 1 康定变 500 kV 交流线路参数

线路名称	线型	线路长度/km	直流电阻 (20℃) /($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	融冰 电流 /A	直流 电压 /kV	融冰直 流容量 /MW
康定—崇州 (I, II 回)	LGJ- 630/45	202.5	0.046 33	5000	23.45	117.27
康甘线(康崇 I 回线一段)	LGJ- 630/45	35	0.046 33	5000	4.05	20.27
康定—崇州 (III, IV 回)	LGJ- 630/45	200	0.046 33	5000	23.17	115.83
康定—丹巴 (I, II 回)	LGJ- 500/45	109	0.059 12	4500	14.50	65.25
康定—猴子 岩(I 回)	LGJ- 400/50	50	0.072 32	4000	7.23	28.93
康定—长河 坝(I, II 回)	LGJ- 630/45	30	0.046 33	5000	3.47	17.37
康定—黄金 坪(I 回)	LGJ- 400/50	10	0.072 32	4000	1.45	5.79

冰交流线路通过 S1~S4 四把隔刀实现自动切换。主回路结构图如图 1 所示。

融冰时, 2 组 6 脉动阀组在直流侧串联成 12 脉动阀组, 阀组之间连接处接地, 可以降低直流融冰系统的绝缘需求。12 脉动阀组与三相三绕组整流变压器一起运行, 通过一次设备的优化设计使换流阀组可以长期大角度运行, 直流电压调节范围很广, 满足康定变不同长度 500 kV 交流线路的融冰需求。

康定变直流融冰系统额定输出直流电流为 5000 A, 容量为 122.7 MW, 这是目前双 6 脉动阀组串联结构下, 同等电流时输出容量最大的直流融冰系统。

1.3 谐波的考虑

融冰系统在运行时, 主要产生 5, 7, 11, 13 次谐波, 康定变直流融冰采用 12 脉动整流方案, 5, 7 次谐波分量很小。选取滤波器参数见表 2, 采用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行谐波电压计算, 结果见表 3。电压谐波总畸变率($THDu$)反应了电压波形畸变的程度。康定变加装了直流融冰系统之后, 500 kV 母线电压 $THDu \leq 2\%$, 220 kV 母线电压 $THDu \leq 2\%$, 35

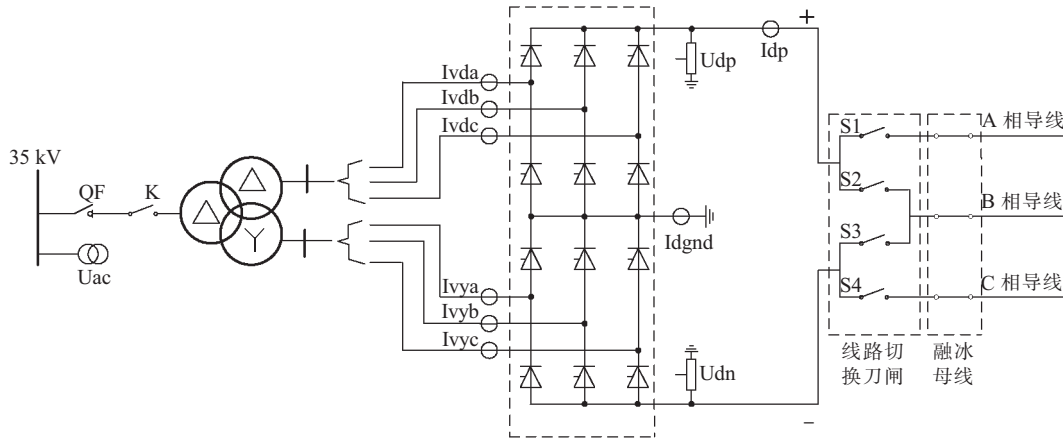


图 1 康定变直流融冰系统结构

表 2 滤波器 LC 参数

谐波	L/mH	C/ μ F
5 次	37.76	11.3
7 次	18.91	11.3
11 次	2.48	33.9
13 次	2.67	22.6

表 3 滤波仿真结果

融冰线路	滤波器是否投入	500 kV 电压 THDu/%	220 kV 电压 THDu/%	35 kV 电压 THDu/%
康定—崇州 (I, II 回)	否	0.046 1	0.728	6.554
	是	0.004 5	0.071	0.612
康定—崇州 (III, IV 回)	否	0.047 2	0.748	6.72
	是	0.005 3	0.084 7	0.789
康定—丹巴 (I, II 回)	否	0.065 9	1.044	9.497
	是	0.014 0	0.222	1.998
康定—猴子岩 (I 回)	否	0.064 9	1.022 7	9.275
	是	0.041 82	0.235	2.103
康定—长河坝 (I, II 回)	否	0.074 6	1.18	10.874
	是	0.015 8	0.250 6	2.287
康定—黄金坪 (I 回)	否	0.065 0	1.026	9.301
	是	0.014 6	0.231	2.078

kV 母线电压 $THDu \leq 12\%$, 从表 3 可见, 不论是否配置交流滤波器组, 母线 $THDu$ 都满足要求。

因此康定变采用如图 1 所示的不加装滤波器组的主回路结构, 能够满足线路融冰的需要, 也不影响原站内设备安全稳定运行。

2 主电路设计

2.1 整流变压器

一般变压器采用有载调压, 由于变电站需要融冰的交流线路长度相差极大, 变压器调压范围有限, 因而通过变压器调压难以解决换流器大角度运行的问题, 部分线路融冰时, 融冰系统的运行触发角仍然较大, 而且变压器设置分接头, 将增加成本和后期维护工作量。

PCS-9590 直流融冰系统通过优化阀组设计, 可以不需要变压器分接调节, 通过触发的控制就能够满足站内所有出线的融冰需要。

康定变直流融冰所用整流变的参数。额定容量 $150 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 接线方式 $D/d0/y11$; 额定电压 $35 \pm 2 \times 2.5\% / 10.5 / 10.5 \text{ kV}$; 短路阻抗 21% ; 调压方式不调压。

2.2 避雷器配置与设备绝缘水平设计

根据系统过电压和设备绝缘配合的结果来配置避雷器。避雷器保护水平的确定需考虑 2 个因素, 其一为正常情况下的最高持续运行电压, 其二为故障情况下的过电压水平。正常运行情况下, 直流融冰系统换流变阀侧、直流侧电压包含大量的谐波、纹波分量; 同时, 还需要考虑交流系统电压的波动。因此, 这两处避雷器的参考电压需高于其最大电压, 并采用合适的电荷率计算得到避雷器的参考电压。

过电压水平需考虑操作过电压和雷击过电压。使用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 结果表明: 在短路故障情况下, 系统的操作过电压并不严重。如直流融冰系统发生 35 kV 母线单相短路、融冰变阀侧单相接地故障、直流单极接地故障时, 未出现操作过电压。然而, 在融冰线路断线故障下, 整流变压器网侧、阀侧, 换流器直流侧出口上都产生较为严重的过电压, 因此需要配置避雷器, 以保护变压器、晶闸管等设备。

康定变避雷器配置如图 2 所示, 避雷器参数见表 4。康定变配置了 3 处避雷器: 换流变网侧, 配置相对地避雷器 A, 保护换流变网侧绕组; 换流变阀侧, 配置相对地避雷器 AF, 保护换流变阀侧绕组; 直流出口侧, 配置 D 避雷器, 防止雷击过电压传入阀厅, 保护阀厅设备和穿墙套管, 同时, 在故障情况下, 降低晶闸管两端、变压器阀侧过电压。

考虑到设备绝缘老化、避雷器自身的老化、环境污染等诸多因素, 在确定设备的绝缘水平时, 对操作波考虑 15% 的绝缘裕度, 对雷电波考虑 20% 的绝缘裕度, 以保证受到过电压应力时设备的安全性。

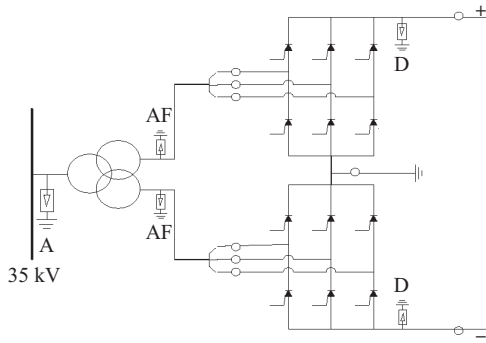


图 2 直流融冰系统避雷器配置

表 4 避雷器参数 kV

避雷器	A 型	AF 型	D 型
额定电压	54.0	19.0	18.0
雷电波保护水平	134.0	44.3	38.4

3 控制保护系统

3.1 系统架构

康定变融冰控制保护系统由监控柜(PCP)、阀控柜(VC)和变压器保护柜等组成,其结构如图 3 所示。

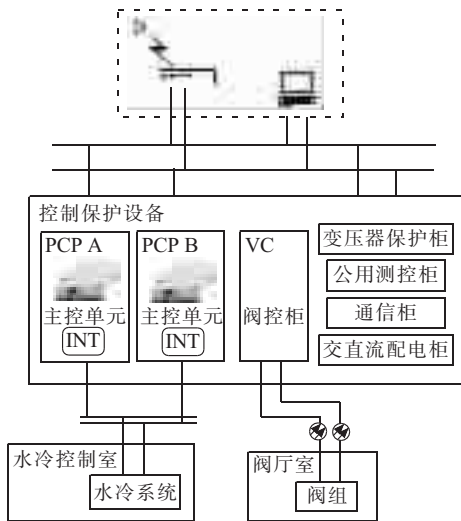


图 3 控制保护系统

3.2 控制保护策略

康定变直流融冰系统在融冰模式下采用定直流电流控制,控制保护系统中集成了阀短路保护、桥差动保护、直流过流保护、直流过压保护、直流谐波保护以及交流过电压保护等。另外,对于整流变压器单独配置了变压器保护。

4 零功率试验

直流融冰系统只在冬季线路覆冰的时候使用,其余时间都处于停用状态,为了检测整套系统的可用性,在每年冬季来临之前,需要做相应的定检试验。为此 PCS-9590 直流融冰系统提供了零功率试验功能,这是

在不接入融冰线路(即交流线路不停电)的情况下,全面检验直流融冰系统的直流电流控制功能,检验换流阀、直流侧刀闸和融冰母线的电流耐受能力,保证直流融冰系统在需要融冰时能够可靠地投入运行,其控制策略与正常融冰一致。PCS-9590 直流融冰系统提供 2 种拓扑实现此项功能。

方案一:利用相控电抗器 L 作为负载,其结构如图 4 所示。PCS-9590 直流融冰系统在不融冰时可以兼做静止无功补偿器(SVC)使用,进行快速无功补偿、改善电能质量,图 4 所示结构可以通过对 Q11~Q17 7 次模式转换隔离开关的分、合操作来实现一次系统结构的切换,方便地在融冰、零功率试验和 SVC 3 种模式灵活转换。以与换流变压器 Y 绕组连接的 6 脉动阀组为例,在融冰、零功率试验和 SVC 3 种运行模式下,各组隔离开关的分合位置分别如表 5 所示。

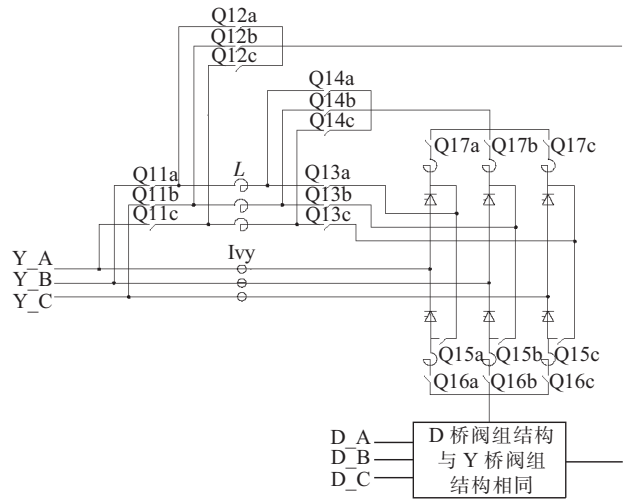


图 4 零功率试验方案一

表 5 融冰、零功率试验和 SVC3 种模式下切换隔离刀的位置

刀闸	融冰模式	零功率试验	SVC 模式
Q11	分	分	合
Q12	合	合	合
Q13	分	分	合
Q14	合	合	分
Q15	分	分	合
Q16	合	合	分
Q17	合	合	分

方案二:在直流输出侧加装隔离刀闸和电抗器构成回路,如图 5 所示。仍然以电抗器 L 为负载,分开 S2、S3、S5~S7 (不接入交流线路),合上 S1、S4、S8、S9,就可以进行零功率试验了。这种结构不支持 SVC 运行模式。

康定变直流融冰系统可以扩展零功率试验功能。

5 运行情况

康定变直流融冰系统的设计容量是,额定功率

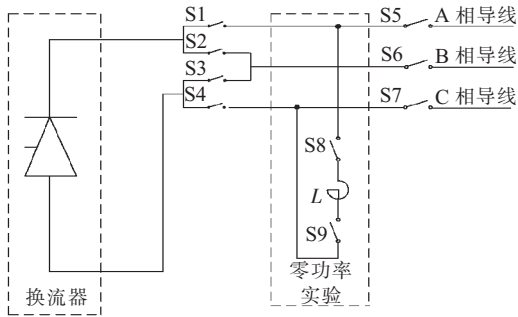
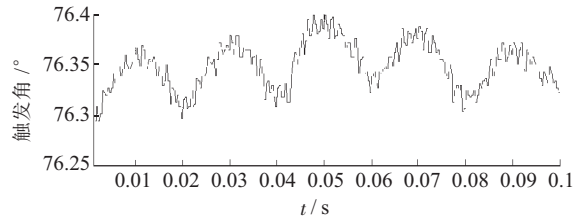


图 5 零功率试验方案二

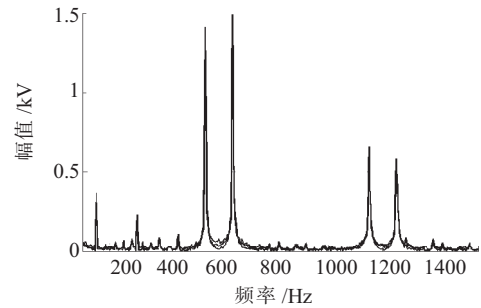
122.7 MW, 额定直流电压 $DC\pm 12.27$ kV, 额定直流电流 5000 A, 额定触发角 15° 。该装置于 2012 年 12 月 27 日对 500 kV 康甘线(康崇线一段)成功进行了大电流融冰试验, 直流电流从 500 A 平稳上升至额定电流 5000 A, 装置累计持续运行将近 2 h。通过直接在站内出线上加探头测量导线温度, 在环境温度 12°C 、风速 3 m/s 的情况下, 导线最高温度 24°C , 温升达到 12°C 。

图 6 所示为康甘线按“一去一回”方式融冰, 直流电流达到额定电流 5000 A 时进线侧 35 kV 母线电压、直流电压、直流电流、触发角的现场录波波形, 其 35 kV 母线电压的频谱分析如图 7 所示。可见, 直流融冰装置输出的直流电压、直流电流等与理论计算结果基本吻合, 符合设计预期, 研制的直流融冰系统满足站内线路融冰需求。12 脉动整流融冰系统工作时交流电源中主要含有 11、13、23、25 等 $(12k\pm 1)$ 次谐波电压; 经计算, 35 kV 母线电压 $THDu$ 为 $9.49\leq 12\%$, 与 PSCAD 仿真结果相符。

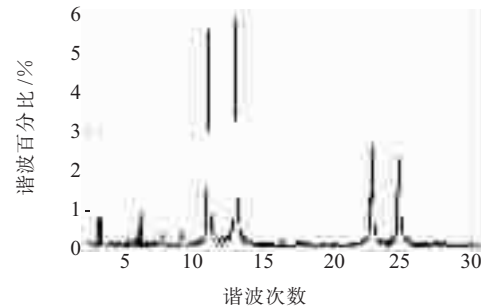


(d) 触发角

图 6 康甘线融冰电流达 5000 A 时 35 kV 母线录波波形

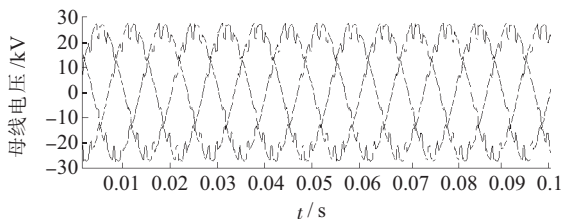


(a) 谐波电压

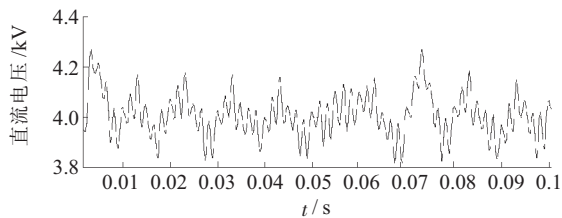


(b) 谐波百分比

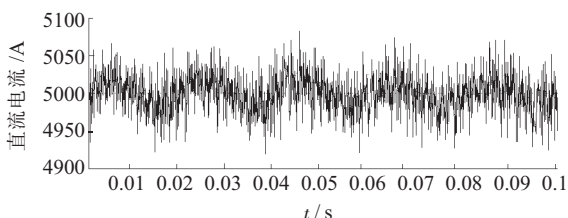
图 7 康甘线融冰电流达 5000 A 时 35 kV 母线电压频谱分析



(a) 母线电压



(b) 直流电压



(c) 直流电流

6 结束语

康定变直流融冰系统设计了简洁的主回路结构, 采用 1 台三相三绕组变压器直接从变电站高压母线受电, 中低压侧分别接入 6 脉动阀组, 可以兼顾不同线径和长度的输电线路融冰; 通过 4 把选相隔离开关可以完成多种融冰方式的自动转换, 实现对交流线路的均衡融冰; 具有零功率试验功能, 可以方便地实现对整套设备的定检。该系统基于 5000 A 的输出电流和 122.7 MW 的融冰容量而设计, 可以为直流融冰设备的研制和工程应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 杜蕴莹, 邢军, 王澄, 等. 南方覆冰灾害造成输电线路倒塔原因及策略的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 14-17.
- [2] 吴元华. 输电线路覆冰的潜在危害及对策研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 18-21.
- [3] 张翔, 丁勇, 朱炳坤, 等. 大容量直流融冰兼静止无功补偿装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 104-108.
- [4] 张庆武, 吕鹏飞, 王德林. 特高压直流输电线路融冰方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 38-42.

- [5] 傅 闯, 饶 宏, 黎小林, 等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 53-56, 107.
- [6] 谢 彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
- [7] 范瑞祥, 孙 旻, 贺之渊, 等. 江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 67-70.
- [8] 申屠刚, 程极盛, 江道灼, 等. 500 kV 直流融冰兼动态无功补偿系统研发与工程试点[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 75-80.
- [9] 许树楷, 黎小林, 饶 宏, 等. 南方电网 500 kW 直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 32-36.
- [10] 孙 栩, 王明新. 交直流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 102-105.
- [11] 陆佳政, 李 波, 张红先, 等. 新型交直流融冰装置在湖南电网

的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 77-79.

- [12] 马晓红, 赵立进, 李 巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.

作者简介:

吴林平(1980), 男, 安徽桐城人, 高级工程师, 从事直流输电及直流融冰技术与开发工作;

田 杰(1969), 男, 四川秀山人, 教授级高级工程师, 从事直流输电及柔性输电技术与开发工作;

李长伟(1983), 男, 河南荥阳人, 工程师, 从事直流融冰及无功补偿技术与开发工作;

吴 俊(1979), 男, 江苏东台人, 工程师, 从事柔性输电电气设计工作;

李 敏(1982), 女, 湖南娄底人, 工程师, 从事过电压及绝缘配合研究工作。

Application of Large-capacity DC Deicing System in 500 kV Kangding Substation

WU Linping, TIAN Jie, LI Changwei, WU Jun, LI Min

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: A new DC deicer system with 12-pulse mode and 5000 A rated current is developed. According to the parameters of AC transmission lines, some of its important aspects of PCS-9590 are introduced, including deicing solution, main circuit design, overvoltage and insulation coordination, control and protection system. Field application shows that the proposed DC deicer is an effective solution for the ice-clad problem of AC lines.

Key words: DC deicer; DC deicing system; main circuit design; zero-power test

(上接第 25 页)

作者简介:

陆玉军(1972), 男, 江苏句容人, 高级工程师, 从事变电站综合自动化系统的开发及工程应用工作;

徐 勇(1970), 男, 江苏仪征人, 高级工程师, 从事电力系统二次技术管理工作及应用研究工作;

薛 军(1980), 男, 江苏仪征人, 工程师, 从事电力系统二次技术管理工作;

蒋 莹(1970), 女, 江苏兴化人, 工程师, 从事变电二次检修维护和管理的工作;

陈 颢(1987), 男, 湖北钟祥人, 工程师, 从事变电站综合自动化系统的开发及工程应用工作。

Design and Analysis of Middle-low Voltage Busbar Protection in Smart Substation

LU Yujun¹, XU Yong², XUE Jun³, JIANG Ying³, CHEN Hao¹

(1. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 22500, China; 3. Yangzhou Yizheng County Maintenance Filiale, Yizheng 211400, China)

Abstract: For satisfying the demand of fast clearing fault on Middle-low Busbar, an over-current block protection approach for is proposed. The typical short circuit faults on middle-low voltage busbar are analyzed. With the advantage of GOOSE networks in the substation, a novel-type middle-low voltage busbar protection is designed. The details of the process of protection design and handling communication interrupt are presented. The effectiveness and reliability of the proposed approach are validated by practical application in a smart substation.

Key words: smart substation; middle-low voltage busbar protection; block component; startup component

欢迎投稿 欢迎订阅