

交流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案

孙 棚,王明新

(中国电力科学研究院 系统所,北京 100192)

摘要: 设计并研制开发了一套固定式直流融冰装置,其容量较大,可以为 500 kV 交流输电线路提供直流融冰电流。根据现有的融冰交流线路参数,对该套装置设计研制过程中几个重要的方面,包括主电路设计、基本结构与参数、控制保护设计以及过电压与绝缘配合等做出较为详细的论述。其运行范围很大,导致其基本结构比较复杂,比如需要 2 个六脉动换流器并联运行,换流变压器采用 Y/ Δ 接线,为小负荷融冰而配置一台较小容量的三相三绕组(Y/ Δ / Δ 接线)变压器,且需要配置交流和直流滤波器等。

关键词: 直流融冰; 大容量; 交流输电; 500 kV

中图分类号: TM 75

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0102-04

中国电力科学研究院设计制造的一台大容量固定式直流融冰装置,安装在湖南益阳复兴变电站。本文对该大容量固定式直流融冰装置设计制造过程中几个比较重要的方面做逐一的论述,为今后相关装置的标准化提供一定的参考^[1-3]。

1 融冰交流线路参数

复兴变电站是一座 500 kV 枢纽变电站,包括 9 回 500 kV 出线和 8 回 220 kV 出线,有 500 kV 主变一台,容量 750 MV·A。其中 500 kV 交流线路的长度范围为 12~97 km;220 kV 交流线路的长度范围为 14~20 km。可见直流融冰装置的负载变化范围很大,造成装置设计困难。

2 直流融冰装置的基本结构

根据湖南复兴 500 kV 变电站具体情况,如果既要保证不同电压等级、长度交流线路的融冰,又要保证较小的换流器触发角,以利于融冰装置安全运行,融冰装置需要根据融冰功率配置不同的换流变压器,以便于其制造。下面介绍其主结构^[4-5]。

a. 考虑最大功率融冰,需要电流 5000~6000 A,但是换流器采用元件(5 英寸)仅能提供 4000 A 稳态电流,因此需要 2 个六脉动换流器并联。

b. 由于 500 kV 较长线路的融冰功率较大,因此每一个六脉动换流器都需要一台三相两绕组变压器,以减小其电流和容量。

c. 为了单个六脉动换流器也能够单独使用进行较小直流电流融冰,不用考虑特征谐波变化对交流滤波器类型的影响,2 台换流变都采用 Y/ Δ 接线;这样也可以避免并联换流器触发相位不同的影响。

d. 220 kV 线路和 500 kV 较短线路的融冰功率

较小,在使用相同的换流器时,为了避免换流器大触发角长期运行,以及电流变化大导致变压器制造困难等问题,还需要配置较小容量的变压器。因此,再采用一台三相三绕组(Y/ Δ / Δ 接线)变压器,具体结构如图 1 所示。

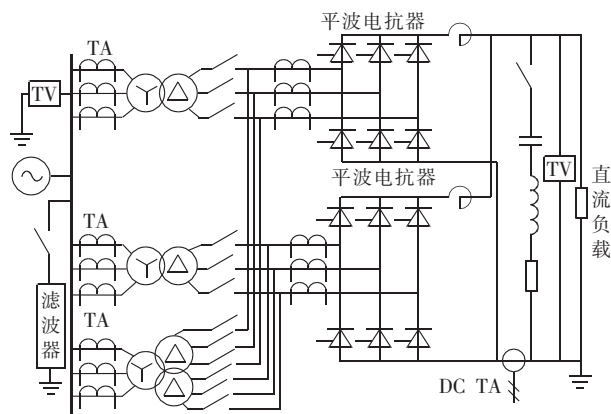


图 1 固定直流电流融冰装置主接线结构

Fig.1 Main circuit of fixed DC de-icing device

e. 为了避免换流器在交流侧产生的谐波影响换流器控制系统正常触发运行,需要配置交流滤波器。

f. 为了减小同杆并架线路融冰中运行线路对换流器的影响和阻尼基波谐振,在换流器直流出口设置基波(50 Hz)滤波器。

g. 建议融冰装置直流系统采用低压端接地,便于利用成熟的直流输电系统经验,以及换流器和换流变压器的制造,避免这些设备两端都需要考虑最高的绝缘水平,降低设备造价。如果直流系统采用大电阻中点接地,可以减小融冰线路对地短路电流和变电站地网暂态电流,但将提高换流器一端的绝缘水平,保护配置将有所不同。

h. 不设置直流电流互感器(TA),可以利用换流器交流侧 TA 进行控制和保护。如果经济上允许设置直流电流测量设备,可以采用 2 个六脉动换流器

低压端并联后,经过一个直流 TA 与融冰线路相连;2 个六脉动换流器低压端各串联一个直流 TA,并联后与融冰线路相连;2 个六脉动换流器高压端各串联一个直流 TA,并联后与融冰线路相连。

i. 直流电压测量设备,主要用于运行监视,利用这个电压互感器(TV)可以设置一些控制保护功能。直流融冰装置的主接线结构如图 1 所示。

3 直流融冰装置的基本参数

直流电流:取决于 500 kV 交流线路导线的融冰电流和时间,最大运行电流大于最小融冰电流,融冰电流按每根导线 1000 A 考虑,最大 6000 A。考虑不同装置结构,额定值分别为 6000 A、5000 A、4000 A、融冰电流采用 1.2 p.u.过负荷;最小运行电流分别为 2500 A、1000 A。

直流功率分 2 种情况。一是 2 个六脉动大功率换流器并联(对象 500 kV 长线路):额定功率为 100 MW,最大 121 MW,最小 45 MW;二是 2 个六脉动小功率换流器并联(对象 500 kV 短线路和 220 kV 线路):额定功率 7.2 MW,最大 8.7 MW,最小 2 MW (1000 A 的情况)。

直流电压:在额定直流功率为 100 MW 的情况下,为 20 kV(与融冰线路直流电阻有关,4 Ω 相当于单相交流 180 km 左右);针对不同线路的直流电阻,电压有所不同,最大 22 kV,最小 1.8 kV。

直流电阻:最大 4.4 Ω;最小 0.45 Ω。
触发角:额定值为 25°,变化范围为 10°~45°。
交流系统电压:额定值为 36 kV。

短路特性:直流融冰装置接在变电站 35 kV 站用电侧,不接地。最大短路电流(三相对称):37.87 kA (2558 MV·A);最小短路电流:8.25 kA(500 MV·A,考虑 5 倍的融冰装置直流功率)。

短路比 d_N :考虑换流器安全和阳极电抗器(光触发每桥臂 0.57 mH;电触发每桥臂 0.3~0.4 mH),加大对晶闸管最大短路电流限制,取为 14 %。

4 直流融冰装置的主电路设计

4.1 换流变压器

大功率换流变压器参数见表 1,小功率换流变压器参数见表 2。

4.2 平波电抗器

一般整流装置不需平波电抗器,但是为了滤波和防止雷电对换流器造成损坏,可以设置适当的平波电抗器。通过 EMTDC 计算 2 个互差 30°换流器,各串入 0.01~0.1H 的电感,就可以避免相互影响,并减小同杆并架交流线路感应电流的影响。

4.3 无功补偿和交流滤波器

由于固定直流融冰装置安置的复兴变电站靠近发电厂,系统可以提供较大的无功功率,交流母线电

表 1 大功率换流变压器参数
Tab.1 Parameters of high-power commutating transformer

编号	名称	单位	系统侧	换流器侧
1	接线		Y	Δ
2	额定相电压 (分接抽头为零)	kV	$36.0/\sqrt{3}$	19.42
3	最大相电压	kV	$39.6/\sqrt{3}$	21.36
4	额定容量 (一个 S_N 六脉动)	MV·A	69	69
5	额定电流 (一个 S_N 六脉动)	kA	1.91	2.04
6	过电流(一个 S_N 六脉动,分接抽头为零)	kA	1.97	2.25
7	过电流(一个 S_N 六脉动,分接抽头+40 %)	kA	1.63	2.45
8	分接 0 档(+0 %)变比	1.07	$36.0/\sqrt{3}$	19.42
	抽头 2 档(+20 %)变比	1.28	$36.0/\sqrt{3}$	16.19
	3 档 4 档(+40 %)变比	1.50	$36.0/\sqrt{3}$	13.87
9	漏抗	%	28	28

注:变压器类型为三相两绕组,每个六脉动换流器一台。

表 2 小功率换流变压器参数
Tab.2 Parameters of low-power commutating transformer

编号	名称	单位	系统侧	换流器侧	换流器侧
1	接线		Y	Δ	Δ
2	额定相电压 (分接抽头为零)	kV	$36.0/\sqrt{3}$	1.77	1.77
3	最大相电压	kV	$39.6/\sqrt{3}$	1.95	1.95
4	额定容量	MV·A	10	5	5
5	额定电流	kA	0.277	1.63	1.63
6	过电流 (分接抽头为零)	kA	0.306	1.80	1.80
7	分接 0 档(+0 %)变比	11.7	$36.0/\sqrt{3}$	1.77	1.77
	抽头 -2 档(-20 %)变比	9.41	$36.0/\sqrt{3}$	2.21	2.21
	3 档 -4 档(-40 %)变比	7.1	$36.0/\sqrt{3}$	2.94	2.94
8	漏抗	%	28	28	28

注:变压器类型为三相三绕组。

压较高,因此整流器运行的融冰装置主要考虑滤除它产生的特征谐波(5、7、11、13 次)。

根据计算,融冰需要的无功功率,大容量额定 82.5 Mvar,小功率额定仅 6 Mvar。考虑到复兴变电站原设计中 500 kV 主变低压侧容性无功补偿容量为 2×60 Mvar,感性无功补偿容量为 3×60 Mvar 的情况,可以将一组容性无功补偿容量 60 Mvar,改成 2 组 30 Mvar 的 6/12 次双调谐交流滤波器,滤波器结构参如图 2 所示,参数如下:6/12 次双调谐 2 组三相,无功容量 30 Mvar,运行线电压 36 kV,主电容 73.683 μF,串联电感 1.215 mH,并联电容 396.203 μF,并联电感 0.558 mH,并联电阻 70 Ω。

在小功率融冰时,根据交流母线电压,选择投入 1 组电抗器,1 组或 2 组交流滤波器;在大功率融冰时,根据交流母线电压,选择投入 1 组电容器或 1 组电抗器,1 组或 2 组交流滤波器。

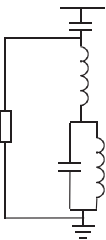


图 2 交流滤波器结构图
Fig.2 Structure of AC filters

另外,如果交流滤波器安置场地有困难,将 2 组双调谐滤波器改为 2 组单调谐滤波器,5 次、7 次各一组;在直流融冰或无功补偿时全投入,母线电压升高则由 3 组低抗降低。

4.4 直流滤波器

直流融冰装置中,由于同塔双回线路以及谐振等原因,直流滤波器的设计是一个比较复杂的问题。其具体设计方案及策略另文介绍,本文只提供其推荐的电路参数:电容 800 μF,电感 12.7 mH,电阻 0.08 Ω。

5 直流融冰装置的控制与保护策略^[6]

采用直流电流融冰仅需考虑被融冰输电线路的直流电阻 R 。将工作在整流状态的换流器直流输出端与需要融冰的交流线路相连(如图 1 中右侧的电阻直流负载),构成直流融冰回路。实际融冰电流可以按下式计算:

$$I_d = \frac{U_{d0} \cos \alpha - U_T}{R + (d_x + d_r) U_{d0N} / I_{dN}} \quad (1)$$

其中, U_{d0} 为换流变压器阀侧绕组空载线电压有效值; α 为换流器触发角; U_T 为阀导通压降; d_x 和 d_r 分别为等值换相电抗和电阻。

随着触发角的增加,直流电流非线性减小。另外为了保持融冰电流恒定,融冰装置需要采用闭环电流控制,具体控制流程参见图 3。

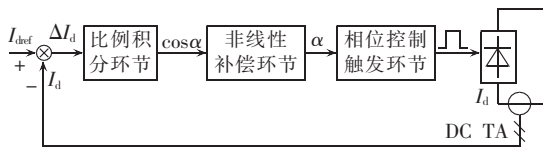


图 3 闭环直流电流控制功能示意图
Fig.3 Schematic diagram of close-loop DC current control

直流融冰装置保护主要考虑 6 种。

a. 换流器故障及保护。换流器故障包括换流器阀短路故障,换流器直流侧端口短路,换流器交流侧相间短路,换流器交流侧相对地短路,换流器直流侧对地短路,控制系统故障,换流器辅助设备故障。换流器故障保护包括阀短路保护,直流过流保护,交流过流保护,阀触发异常保护,直流过电压保护,晶闸管检测,大触发角监视。

b. 换流变压器故障及保护。换流变压器故障包括变压器的本体物理量变化,变压器辅助设备故障,变压器相关电气量变化。换流变压器故障保护包括换流器交流母线和换流变差动保护,换流器交流母线和换流变过流保护,换流变压器本体保护。

c. 交流滤波器故障及保护。通常交流滤波器由电容器、电感器和电阻器及避雷器等元件组成,均有可能出现不同类型的故障。交流滤波器故障保护包括电抗器过载保护,滤波电容器不平衡保护,滤波器差动保护。

d. 直流滤波器故障及保护。通常交流滤波器由电容器、电感器和电阻器等元件组成,均有可能出现不同类型的故障。直流滤波器故障保护包括直流滤波器电抗器过载保护,直流滤波电容器不平衡保护,直流滤波器差动保护。

e. 直流系统故障后备保护。除上述直流融冰装置设备保护外,还可以设置一些直流系统保护作为后备。直流系统故障后备保护包括直流欠电压保护,直流谐波保护。

f. 交流系统故障及保护。交流系统故障包括交流系统三相短路故障,交流系统单相故障。交流系统故障保护包括换流器交流母线欠压保护,换流器交流母线过压保护。

6 直流融冰装置的过电压与绝缘配合^[7-10]

装置交直流侧避雷器的配置参见图 4。各避雷器参数列于表 3 和表 4。

为了计算直流融冰装置的过电压水平,在仿真软件上搭建了直流融冰装置的模型,首先系统稳态参数满足各方面设计要求,另外对几种严重故障下的系

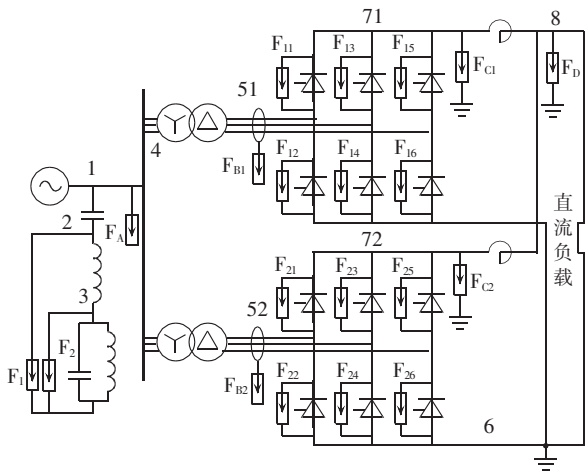


图 4 直流融冰装置避雷器配置示意图
Fig.4 Arrester configuration of DC de-icing device

表 3 直流融冰装置直流侧避雷器参数
Tab.3 DC-side arrester parameters of DC de-icing device

避雷器安装点	代号	U_t /kV	U_{nf} /kV
阀侧绕组(51,52)	F_{B1}, F_{B2}	21	26
直流阀顶(71,72)	F_{C1}, F_{C2}	27	24
直流极线(8)	F_D	24	30

注: U_t 为持续运行电压;表中电压均为峰值。

表 4 直流融冰装置交流侧避雷器参数
Tab.4 AC-side arrester parameters of DC de-icing device

避雷器安装点	代号	U_t /kV	U_N /kV
换流阀两端	$F_{11} \sim F_{26}$	24/34	30/42.4
交流母线(4)	F_A	24/34	30/42.4
acfilter 高压端(2)	F_1	-	6/8.5
acfilter 低压端(3)	F_2	-	3/4.2

注:表中电压为有效值/峰值。

统电气参数进行了统计,得出其过电压水平,也为上一节控制保护的设计提供了参考。在各种严重故障下,系统各点的最大过电压如表 5 所示。

表 5 直流融冰装置系统各点最大过电压
Tab.5 Maximum over-voltages at different points of DC de-icing device

测量位置	U_m/kV
交流母线线电压(4)	78.5
变压器 1 阀侧绕组端子(51)	42.4
变压器 2 阀侧绕组端子(52)	42.4
换流器 1 直流阀顶(71)	24.6
换流器 2 直流阀顶(72)	24.6
直流极线(8)	21.7
换流阀两端	36.1

注: U_m 为电压峰值。

最后,根据上面的计算结果,给出直流融冰装置的绝缘配合裕度推荐值,见表 6。

表 6 直流融冰装置绝缘配合裕度推荐值
Tab.6 Recommend insulation redundancy of DC de-icing device

设备类型	配合裕度	
	操作	雷电
交流开关场母线,户外绝缘子和其他常规设备	1.20	1.25
交流滤波器元件	1.15	1.25
换流变 网侧	1.20	1.25
(油中) 阀侧	1.15	1.20
换流阀	1.15	1.15
直流阀厅设备	1.15	1.15
直流开关场设备(户外)	1.15	1.20

7 结论

对大容量固定式直流融冰装置设计制造过程中几个比较重要的方面做了逐一的论述。在确定整套装置结构的基础上,给出了各相关设计的参数以

及计算结果,希望能为今后相关装置的研究设计、制造以及标准化提供一定的参考。

参考文献:

[1] 浙江大学. 直流输电[M]. 北京:水利电力出版社,1985:55-65.

[2] 赵嘏君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:29-33.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5223-2005 高压直流换流站设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2005.

[4] 许树楷,赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述[J]. 南方电网技术,2008,2(2):1-6.

XU Shukai,ZHAO Jie. Review of ice storm cases impacted seriously on power systems and de-icing technology[J]. Southern Power System Technology,2008,2(2):1-6.

[5] 王明新,孙栩. 500 kV 输电线路固定式直流融冰技术方案及装置研制——直流融冰装置技术方案研究报告[R]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

[6] 王明新,孙栩. 500 kV 输电线路固定式直流融冰技术方案及装置研制——直流融冰装置控制保护关键技术研究报告[R]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

[7] 王明新,孙栩. 500 kV 输电线路固定式直流融冰技术方案及装置研制——直流融冰系统过电压分析及绝缘配合研究报告[R]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

[8] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 605-1996 高压直流换流站绝缘配合导则[S]. 北京:中国电力出版社,1996.

[9] 蒋卫平. ± 800 kV 直流输电工程内过电压研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2007.

[10] 蒋卫平. 三峡-常州 ± 500 kV 直流输电工程内过电压研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,1997.

(编辑:李 玲)

作者简介:

孙 栩(1978-),男,天津人,工程师,博士,研究方向为直流输电及电力系统电磁暂态(E-mail:sunxu@epri.sgcc.com.cn);

王明新(1954-),男,广东广州人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为直流输电。

Design scheme of large-capacity fixed DC de-icing device for AC transmission lines

SUN Xu,WANG Mingxin

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: A large-capacity fixed DC de-icing device is designed and developed and it can de-ice for 500 kV AC transmission lines. According to the current parameters of AC transmission lines,some of its important aspects are introduced:main circuit design,basic structure and parameters,control and protection design, overvoltage and insulation coordination. Its wide operating range leads to its complex structure:two parallel operating 6-pulse converters,Y/ Δ connection commutating transformer,small-capacity three-phase three-winding Y/ Δ / Δ connection transformer for low load de-icing,AC and DC filters.

Key words: DC de-icing; large-capacity; AC transmission; 500 kV