

# 特高压直流输电线路融冰方案

张庆武<sup>1</sup>, 吕鹏飞<sup>2</sup>, 王德林<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100; 2. 国家电力调度通信中心, 北京市 100031)

**摘要:** 针对输电线路覆冰严重影响特高压直流输电可靠性的问题, 研究了特高压直流输电线路融冰的 2 种方案: 预防性融冰方案和紧急融冰方案。预防性融冰方案是使特高压直流工程的 2 个极功率方向相反, 可以在直流双极总功率很小的情况下实现较大的线路电流, 防止线路覆冰形成; 紧急融冰方案是将特高压直流换流器从串联接线方式转换为每站 2 个换流器并联运行, 产生很大的融冰电流, 可迅速融化已经形成的覆冰。文中提出了特高压直流工程紧急融冰方案的控制策略, 即整流侧并联的 2 个换流器均处于定电流控制, 逆变侧并联的 2 个换流器一个为定电流控制、另一个为定电压控制, 逆变侧定电流换流器的电流参考值为线路电流测量值的一半, 达到平均分配电流的目的, 定电压状态的换流器控制整个极的直流电压。上述融冰方案的实施将大大降低覆冰对特高压直流输电系统可靠性的影响。

**关键词:** 融冰; 特高压直流输电; 控制策略; 控制保护系统; 换流器

**中图分类号:** TM721

## 0 引言

中国是世界上输电线路覆冰灾害最严重的国家之一。覆冰会使输电线路的机械和电气性能急剧下降, 严重时会造成跳闸、断线、倒杆塔, 导致停电事故, 给国民经济带来重大损失<sup>[1-3]</sup>。因此, 研究输电线路的防冰和除冰技术对提高电力系统的安全性和可靠性有重要意义<sup>[4]</sup>。

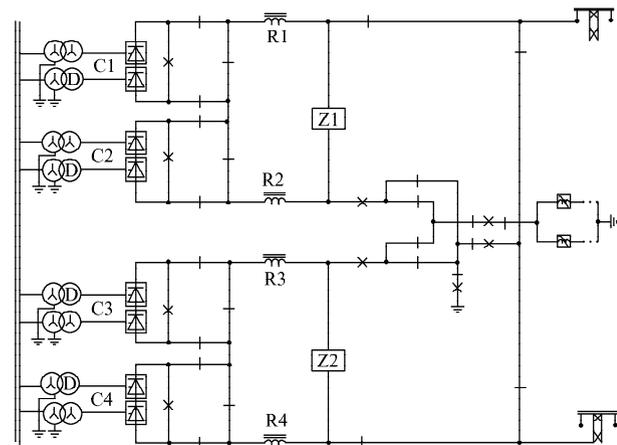
未来 3 年, 中国将陆续建成云南至广东、向家坝至上海、锦屏至苏南这 3 条 ±800 kV 特高压直流输电线路并投入运行, 还有多条特高压直流输电线路已列入建设计划<sup>[5-6]</sup>。一方面, 这些特高压直流系统双极额定输电容量高达 5 GW~7.2 GW, 如此大容量的电力输送对直流输电系统的可靠性提出了极高的要求<sup>[7-8]</sup>; 另一方面, 特高压直流输电线路输送距离远, 中间需跨越多个易发严重覆冰灾害的区域。因此, 研究特高压直流工程的防冰和除冰技术显得尤为紧迫和重要, 对确保特高压直流输电系统本身以及相关电力系统的安全可靠运行都具有重要意义。

目前输电线路防冰和除冰技术有很多种<sup>[9]</sup>, 本文采用加热融冰方法<sup>[10]</sup>, 其原理是使输电线路流过大的直流电流, 通过线路电阻发热升温融化覆冰。根据特高压直流工程的技术特点<sup>[11]</sup>, 本文将研究特高压直流输电线路融冰的 2 种方案: 一种方案是对

线路施加额定值左右的电流, 预防覆冰形成, 称为预防性融冰方案, 这种方案也能融化已形成的覆冰, 只是需要很长的时间; 另一种方案是对线路施加很大的直流电流, 快速融化已形成的覆冰, 称为紧急融冰方案。

## 1 特高压直流系统常规运行方式

特高压直流输电系统每端换流站有 4 个 12 脉动换流器, 分为 2 个极, 每个极 2 个换流器串联, 其主要接线如图 1 所示。



R1~R4 为平波电抗器; Z1和Z2为直流滤波器; C1和C4为高压换流器, 与极线路连接; C2和C3为低压换流器, 与直流中性线连接; 典型的特高压换流器两端直流电压为 400 kV, 额定直流电流 4 kA

图 1 特高压直流单侧换流站主接线

Fig. 1 Main connection at one side of DC converter station for UHVDC

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-01-13。

国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]87)。

正常运行方式下,特高压直流工程的2个极直流电压极性相反,一个极的线路对地电压为+800 kV,另一个极的线路对地电压为-800 kV。直流电流的方向始终与换流阀的导通方向一致。2个极的功率方向相同,都将功率从站1(整流站)输送至站2(逆变站)。

## 2 预防性融冰方案

### 2.1 直流高负荷时的预防性融冰方案

在丰大时段,特高压直流系统负荷较大,线路电流接近或达到额定直流电流4 kA,此时线路发热量基本可以预防覆冰的形成。即使环境温度很低或已有少量覆冰形成,由于特高压直流工程通常设计有短时10%以上的过负荷能力,可以充分利用系统短时过负荷能力间歇产生4.4 kA以上的线路电流,达到预防覆冰形成的目的。

在直流系统双极不能同时实现大负荷输电的情况下,可安排2个极轮流过负荷运行实施融冰,并同时维持设定的双极总功率。

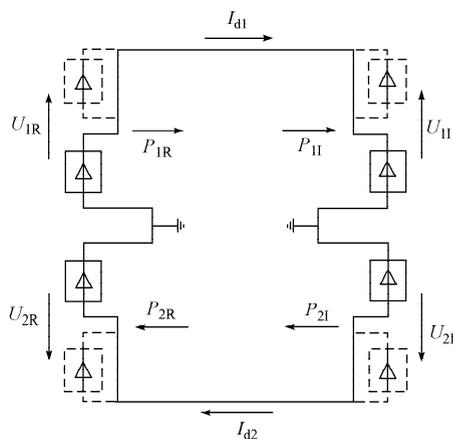
过负荷是特高压直流系统及其控制保护<sup>[12]</sup>的常规功能,这种融冰方案的优点是容易实现,且干扰特高压直流系统的正常运行。但易发覆冰的冬季通常处于枯小时段,此时特高压直流系统的整流端难以提供足够的功率,直流系统只能运行于低负荷工况,上述融冰方案将不再适用。

### 2.2 直流低负荷时的预防性融冰方案

枯小时段,受整流端系统功率不足的限制,特高压直流系统只能低负荷运行时,直流线路电流将远小于额定电流4 kA,此时如遇到低温雨雪天气,易产生覆冰灾害。针对这种情况,预防性融冰方案需要同时实现2个目标:

- 1) 特高压直流系统的总输送功率应较小;
- 2) 直流线路电流应尽可能大,至少达到额定值左右。

令特高压直流工程的2个极功率方向相反,一极正向传输功率,另一极反向传输功率,可同时实现上述2个目标。采用这种方案,单个极传输的功率可以很大,用于产生额定的直流电流;而由于2个极的功率方向相反,当2个极功率大小相近时,特高压直流系统的总传输功率很小,甚至可以使某一端换流站的总交换功率为0,而另一端换流站的双极总功率全部用于线路融冰损耗。由于这种融冰模式不需要很高的直流电压,因此,可以将特高压工程每个极的一个换流器隔离,采用双极单换流器大地回线运行方式。该预防性融冰方案如图2所示。



$U_1$ 和 $U_2$ 分别为极1和极2的直流电压; $I_{d1}$ 和 $I_{d2}$ 分别为2个极的线路电流; $P_1$ 和 $P_2$ 分别为极1和极2的功率;下标R和I分别代表特高压直流系统的两端换流站

图2 特高压直流预防性融冰方案示意图  
Fig. 2 Preventive de-icing scheme for UHVDC

这种预防性融冰方案的主要优点是:

1) 方案容易实现,几乎不需要对现有的特高压工程设计和控制保护系统功能进行修改就能实现这种融冰工作模式;

2) 融冰时不需要整流侧交流系统提供很大的功率源,对交流系统造成的扰动也较小。

在双极功率异向的融冰方案实施过程中还需注意以下几个问题:

1) 特高压直流控制系统的双极功率控制模式不支持2个极功率方向相反的运行方式,因此,在预防性融冰方式下,2个极应各自采用单极定电流控制模式。

2) 融冰方案采用双极大地地回线运行方式,如果2个极线路电流差异较大,接地极将流过较大的电流。为减小不平衡电流,融冰工作模式全过程(包括电流升降过程)中2个极的电流定值不应差别过大。如果需要特高压直流系统在融冰过程中同时传输少量功率,建议尽量采取一极全压运行,另一极降压运行的方式。

3) 在预防性融冰模式下,直流系统双极总功率较小,但每个极的传输功率却很大。虽然双极异向融冰运行不需要交流系统提供很大的功率,对交流系统造成的扰动也很小;但考虑到融冰时天气情况一般比较恶劣,线路故障概率较高,一旦故障造成一极停运,直流系统会转入单极大地地回线运行,将导致直流系统与交流系统的功率交换量突然增大,给两侧交流系统带来一定扰动。

为避免出现这种情况,应在特高压直流控制保护系统中为双极功率异向融冰方案增加特殊的保护功能:融冰大电流运行时,如果某极故障停运,控制保护系统应使另一极也迅速闭锁。该功能可采用以

下方法实现:

1) 设置融冰模式标志信号 Deice\_Mode, 需要运行融冰模式时将该标志信号置为 1;

2) 在特高压直流控制系统的极间通信中增加功率方向信号, 使本极能够接收对极的功率方向信号;

3) 比较本极与对极的功率方向, 如果 2 个极功率方向相反, 则判定系统处于预防性融冰状态, 定义 Deice\_Status 为 1;

4) 根据本极运行信号 OPN 和对极运行信号 OPN\_FOP, 采用以下逻辑判断对极在大电流融冰运行中是否出现故障停运: OPN\_FOP 为 0、OPN 为 1 且 2 个极功率差大于单极最小功率的 1.1 倍, 则定义对极故障停运信号 Deice\_Stop\_OP 为 1;

5) 当 Deice\_Mode, Deice\_Status, Deice\_Stop\_OP 均为 1 时, 判定系统在双极功率异向融冰运行过程中出现了对极停运, 此时定义 Deice\_Trip 为 1, 触发本极紧急停运。

采用上述特殊保护功能的双极功率异向融冰方案已在国内多个  $\pm 500$  kV 常规直流工程中进行了试验运行, 融冰过程中模拟单极故障停运的试验结果表明该保护能准确动作, 将融冰时单极故障停运对两侧交流系统的扰动降至最小。

### 2.3 单换流站带回路运行的预防性融冰方案

双极功率异向融冰运行方式下, 特高压直流工程 2 个极的直流电压是同极性的, 因此, 可考虑在特高压直流线路覆冰区外的某一点将 2 条直流极线路短接, 形成单侧换流站带回路融冰运行方式, 如图 3 所示。

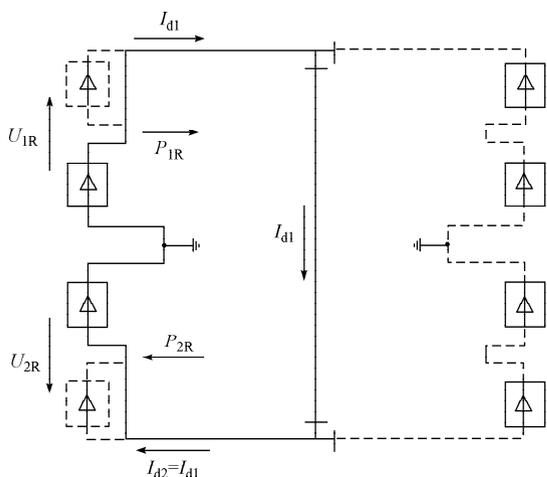


图 3 单换流站融冰方案示意图

Fig. 3 Preventive de-icing scheme of single converter station for UHVDC

通过规划短接点的位置, 使跨越易覆冰区的线路与一侧换流站形成回路, 有针对性地进行融冰, 而短接点以外的线路与对端换流站的融冰功率损耗就

可省去。当然, 这种融冰方案需要增加少量投资, 包括短路线路与隔离刀闸, 以及相关的站间通信等。

### 3 紧急融冰方案

如果大量覆冰已形成并威胁到杆塔安全, 就需在很短时间内融化覆冰。这种情况下, 额定的线路电流已不能满足融冰要求, 必须采取紧急融冰方案, 提供很大的线路电流, 迅速融化已形成的覆冰。

根据对特高压直流工程采用的  $6 \times 720$  mm<sup>2</sup> 导线的研究, 特高压直流输电线路的紧急融冰电流在 8 kA ~ 9 kA 左右<sup>[13]</sup>。在常规接线和运行方式下, 特高压换流站无法提供这么大的融冰电流。

针对特高压直流工程的特点, 可以采用 2 个换流器并联运行的方式提供紧急融冰电流。由于换流器是按照模块化原则设计的, 所以只需在特高压直流输电工程的两端换流站增加少量连接线和隔离开关, 就能方便地通过直流开关场操作, 使换流器的常规串联运行方式切换为每站 2 个换流器并联融冰运行方式, 这样在额定情况下可提供 8 kA 的直流线路电流, 考虑换流器的过负荷能力, 最高可提供超过 9 kA 的紧急融冰电流<sup>[14]</sup>。特高压直流单侧换流站内 2 个换流器并联运行的一种接线方式如图 4 所示。紧急融冰时对端换流站也采用同样的接线方式。

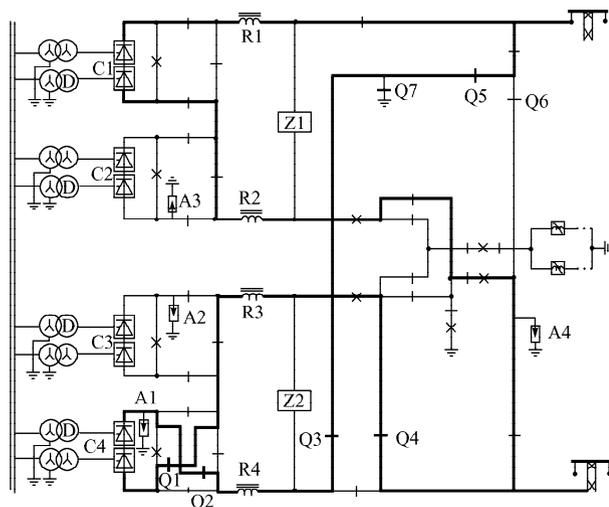


图 4 特高压直流两换流器并联融冰主接线  
Fig. 4 Main connection for de-icing under parallel operation of dual converters in UHVDC

图 4 中的接线方案将换流器 C1 和 C4 并联, 融冰电流流经的线路在图中用粗线标出。紧急融冰时, 先将换流站转入单极单换流器 C1 金属回线运行, 然后闭合 C4 并联线路上的隔离刀, 解锁 C4 并逐渐增大电流, 即可不停电实现 2 个换流器并联融冰运行方式。

图4所示的紧急融冰接线方案需换流站增加部分一次设备,主要包括:4个800 kV直流隔刀Q1~Q4;2个400 kV直流隔刀Q5和Q6;1个400 kV地刀Q7;1个400 kV避雷器A1;2个中性线避雷器A2和A3;1个金属回线避雷器A4;若干条连接线。

要实现特高压直流系统的紧急融冰工作方式,直流控制保护系统的部分功能模块还需修改,增加这些模块在融冰方式下的特殊处理程序。这些修改不对原有功能做任何变动,只是在满足特高压直流工程常规工作方式下所有功能要求的同时,也能在需要时使直流系统运行于紧急融冰工作方式。

紧急融冰方式下,特高压直流工程换流器从串联接线方式转入并联方式,考虑到每站并联的2个换流器间的电流平衡问题,建议紧急融冰时采用如下的控制策略:

1) 每站并联的2个换流器各自独立控制。

2) 整流侧并联的2个换流器均处于定电流状态,每个换流器电流定值为输入的融冰电流指令值的1/2。在额定条件下,每个换流器可提供4 kA电流,并联直流电压400 kV,直流线路电流为8 kA,过负荷时,可达到9 kA。

3) 逆变侧并联的2个换流器一个处于定电流状态,另一个处于定电压状态。处于定电流状态的换流器电流定值跟踪直流线路电流,使逆变侧2个换流器平均分配直流电流;定电压状态的换流器控制并联换流器的直流电压。由于两侧换流器都为并联接线,单换流器定电压完全能够确保所有换流器的电压均能保持在定值附近。

上述控制策略确保了特高压直流系统在融冰工作的所有时刻都处于稳定的工作点,融冰电流连续可控,整流和逆变两侧的直流电流都在并联的换流器之间被平均分配,不会引起单个换流器的超负荷运行。

除了控制策略的变化,紧急融冰方案还需要对换流站无功和滤波设备进行校核,以及对控制保护的许多相关功能进行调整,例如增加并联换流器的极间通信、增加融冰模式的顺序控制功能、无功控制功能、线路故障保护区从并联点后开始、很多保护定值需要修改、融冰时由单套保护代替3取2逻辑等。

除了图4的换流器并联接线方式,紧急融冰方案也可采取其他的换流器并联接线方式,例如单极的2个换流器并联融冰。这种方式下,本文提出的紧急融冰控制策略仍然有效。

紧急融冰方案需要注意的一个问题是:特高压直流输电线路通常很长,会跨越多种地理和气象区域。当紧急融冰运行时,整条输电线路都将通过很大的电流,在低温和严重覆冰区,大电流将融化覆

冰;但同时未覆冰区,大电流将使线路温度升得较高。根据±500 kV常规直流工程双极功率异向融冰试验的结果,在常温条件下,通过3 kA的融冰电流后,直流线路温升约为10℃。以此估算,特高压直流工程紧急融冰时,未覆冰区的线路温升约为20℃~30℃。考虑到输电线路的温度上限一般在90℃左右,该温升不会给直流线路带来太大影响。尽管如此,线路温度长时间处于较高温度仍会造成不利影响,因此,只有在紧急情况下才需要短时间使用8 kA以上的电流。由于紧急融冰方案的融冰电流是连续可控的,一旦覆冰状况缓解,就可逐渐降低融冰电流,避免未覆冰区线路和设备长时间运行在较高的温度下。

## 4 结语

双极功率异向的预防性融冰方案,其最大优点是不增加一次设备投资,对控制保护系统软件功能的修改也很少,容易实施;同时,这一方案对相关交流系统影响小,尤其适合在冬季低负荷时段使用;另外,只要做好覆冰监测<sup>[15]</sup>和气象预警,及时启用预防性融冰运行模式,在绝大多数情况下都能够防止线路受到冰灾影响。

紧急融冰方案的优点是可以提供很大的直流线路电流,快速融化线路覆冰。但这一方案也会带来下列问题:

1) 需增加特高压换流站的投资;

2) 控制保护系统功能需要相应增加;

3) 该方案需要整流侧交流系统短时间提供较多的功率,这在低负荷时段会增加功率调度的难度;

4) 紧急融冰时直流系统与交流系统的最大功率交换量与特高压直流双极单换流器运行时的功率交换量相当,因此,在最严重故障情况下,紧急融冰过程中双极停运,其对交流系统的扰动仅略小于常规双极单换流器运行时发生双极停运的扰动。

预防性融冰方案和紧急融冰方案的实施将大大增加直流输电线路的抗冰灾能力,提高特高压直流输电系统的可靠性。

## 参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [2] 陆佳政,蒋正龙,雷红才,等. 湖南电网2008年冰灾事故分析. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.  
LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, et al. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [3] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-10.  
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present

- study on conductor icing of transmission lines. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-10.
- [4] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.  
HUANG Xinbo, LIU Jiabing, CAI Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28.
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等.  $\pm 800$  kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.  
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of  $\pm 800$  kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [6] 尚春. 特高压输电技术在南方电网的发展与应用. 高电压技术, 2006, 32(1): 35-37.  
SHANG Chun. Development of ultra-high voltage transmission technology in China southern power grid. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 35-37.
- [7] 田杰, 曹冬明, 李海英, 等. 提高特高压直流输电控制保护系统可靠性研究. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 12-16.  
TIAN Jie, CAO Dongming, LI Haiying, et al. The research of improving the reliability of ultra HVDC transmission. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 12-16.
- [8] 张禄琦, 周家启, 刘洋, 等. 高压直流输电工程可靠性指标统计分析. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 95-99.  
ZHANG Luqi, ZHOU Jiaqi, LIU Yang, et al. Statistical analysis on reliability indices for HVDC transmission project. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 95-99.
- [9] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.  
LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [10] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.  
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [11] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用. 电力设备, 2006, 7(3): 1-4.  
LI Licheng. Technical characteristics and engineering application of UHVDC power transmission. Electric Equipment, 2006, 7(3): 1-4.
- [12] 胡铭, 田杰, 曹冬明, 等. 特高压直流输电控制系统结构配置分析. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 88-92.  
HU Ming, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 88-92.
- [13] 国家电网公司. 特高压直流输电系统的线路融冰方法: 中国, 1848575A[P]. 2006-10-18.
- [14] 张庆武, 田杰, 傅闯, 等. 特高压直流控制系统融冰工作方式研究. 高电压技术, 2008, 34(11): 2276-2282.  
ZHANG Qingwu, TIAN Jie, FU Chuang, et al. Research on de-icing operation mode of the control and protection system for UHVDC. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2276-2282.
- [15] 黄新波, 孙钦东, 程荣贵, 等. 导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 98-102.  
HUANG Xinbo, SUN Qindong, CHENG Ronggui, et al. Mechanical analysis on transmission line conductor icing and application of online monitoring system. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 98-102.

张庆武(1982—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 主要研究方向: 高压直流输电控制保护的开。E-mail: zhangqw@nari-relays.com

吕鹏飞(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向: 直流输电系统调度运行。

王德林(1972—), 男, 高级工程师, 副处长, 主要研究方向: 直流输电系统调度运行。

## De-icing Scheme for UHVDC Transmission Line

ZHANG Qingwu<sup>1</sup>, LÜ Pengfei<sup>2</sup>, WANG Delin<sup>2</sup>

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

2. National Electric Power Dispatching and Communication Centre, Beijing 100031, China)

**Abstract:** Ice-coating of overhead transmission lines is harmful to the reliability of ultra high voltage direct current (UHVDC). This paper discusses two kinds of de-icing schemes for UHVDC. One is preventive and the other is of emergency. In the preventive scheme, the power flows in opposite directions in the two poles, which forms high current and low net power to prevent the formation of ice. In the emergency scheme, dual converters are connected in parallel instead of series-connection mode at each station; high direct currents are formed to melt the ice quickly. The control strategy of emergency de-icing scheme for UHVDC system is presented, the parallel converters at the rectifier side are both in current control, and at the inverter side, one is in current control and the other is in voltage control. The reference value for the current controlled inverter is half of the measured DC line current to balance the paralleled converters, the voltage controlled inverter controls the voltage of whole pole. The proposed de-icing scheme can greatly improve the reliability of UHVDC by mitigating the influence of ice-coating.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]87).

**Key words:** de-icing; ultra high voltage direct current (UHVDC); control strategy; control and protection system; converter