

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.027

# 新型整流桥串并联切换直流融冰装置

陈立群, 李成博, 周启文, 王聃

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**我国南方地区冬季气温低湿度大,在远距离传输的高压输电线路上经常出现区域覆冰问题,覆冰严重时会造成杆塔倒塌等电力事故。文中研究的新型整流桥串并联切换直流融冰装置即用于解决输电线路覆冰问题,可避免造成大面积供电中断。文中基于常规十二脉动直流融冰装置,通过原理分析、参数设计和仿真验证,提出一种新型直流融冰拓扑,可以同时满足导线融冰的大电流和地线融冰的高电压需求。相较于常规十二脉动直流融冰装置,采用新型直流融冰拓扑可以选用一半容量的换流变压器和一半通态平均电流的晶闸管,显著降低设备投资成本;且在大电流输出模式下可以有效减小注入系统的谐波电流,从而减小接入点的系统电压畸变,改善直流融冰装置投入运行时的系统电压质量。

**关键词:**线路覆冰;直流融冰装置;串并联切换;切换开关;平衡电抗器;成本优势

**中图分类号:** TM755

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)06-0230-09

## 0 引言

线路覆冰受地形、海拔高度、空气湿度、风速等多种因素影响<sup>[1-5]</sup>,覆冰达到一定厚度后会带来一系列问题,如导线相间舞动<sup>[6]</sup>、杆塔倒塌<sup>[7]</sup>、铝线断裂等,严重影响电网的安全稳定运行<sup>[8]</sup>。我国各地区针对各自的线路覆冰情况采取了相应的融冰措施<sup>[9-14]</sup>,文献<sup>[15-19]</sup>结合国内外融冰技术进行了充分研究,提出了各类新型融冰方案,成效显著。

220 kV 以上电压等级输电线路的传输距离跨度较大,杆塔上一般同时安装有导线和地线,两者都有融冰需求。据工程统计,导线的直流电阻一般较小,需要施加较大的融冰电流进行除冰,导线在注入融冰电流后的线端压降一般较小;地线的直流电阻一般较大,施加较小的融冰电流即可实现除冰,地线在注入融冰电流后的线端压降一般较大<sup>[20]</sup>。综上,导线融冰需要较大的融冰电流,地线融冰需要较高的融冰电压<sup>[21-24]</sup>。

从经济性考虑,在站内安装的直流融冰装置一般需要同时兼顾导线和地线融冰,即需要同时具备大电流和高电压的输出能力,常规十二脉动直流融冰装置选用通态平均电流较大的晶闸管以输出较大的融冰电流<sup>[25]</sup>;采用2组六脉动整流桥串联以输出较高的融冰电压。2组六脉动整流桥和换流变压器共同组成融冰装置,将待融冰线路接入融冰装置输出端,由融冰装置提供的直流电流通过发热进行融冰。该方案在对导线进行融冰时不需要融冰装

置具备较高的电压输出能力,在对地线进行融冰时不需要融冰装置具备较大的电流输出能力,所以融冰装置在对导线或地线进行融冰作业时均存在部分性能浪费的问题。

文中研究的新型整流桥串并联切换直流融冰装置可以兼顾导线融冰的大电流和地线融冰的高电压需求。通过整流桥的串并联切换可以实现拓扑的适应性切换,选用的换流变压器容量和晶闸管通态平均电流均为常规十二脉动直流融冰装置的一半,大幅降低了设备投资成本。文中首先介绍新型整流桥串并联切换直流融冰装置的拓扑和工作原理,然后通过参数设计说明该装置的成本优势,最后搭建仿真模型验证该装置的运行可行性及其在大电流输出模式下具备的电流谐波优势。

## 1 新型整流桥串并联切换直流融冰装置拓扑及工作原理

### 1.1 拓扑

图1为常规十二脉动直流融冰装置拓扑,主要由换流变压器、整流桥、平波电抗器和直流连接开关组成,适用于对融冰直流电压有较高要求的场合,目前在高压输电领域应用广泛。其中,整流桥采用晶闸管作为可控整流器件。

常规十二脉动直流融冰装置交流侧一般接入站内35 kV及以上电源系统,融冰装置的输出侧接入待融冰线路,一般是交流导线、交流地线或直流地线,采用“1-1”(导线融冰时单相去单相回,地线融冰时地线去导线回,即一去一回)或“1-2”(导线融冰时单相去两相并联回,即一去两回)连接方式

收稿日期:2022-04-03;修回日期:2022-08-13

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFB0904700)

进行全线或分段融冰,末端采用短接线或者短接开关进行短接。

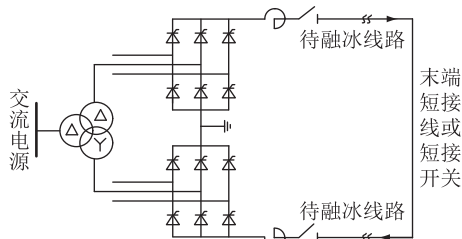


图1 常规十二脉动直流融冰装置拓扑

Fig.1 Conventional 12-pulse DC ice-melting device topology

文中研究的新型整流桥串并联切换直流融冰装置拓扑如图2所示,该装置与图1的应用场景相同。文中研究的直流融冰装置由换流变压器T,六脉动整流桥V<sub>1</sub>和V<sub>2</sub>,切换开关S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>,平衡电抗器L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>,平波电抗器L<sub>3</sub>和L<sub>4</sub>,直流连接开关S<sub>3</sub>和S<sub>4</sub>组成。其中,切换开关可采用单刀双掷开关,六脉动整流桥采用晶闸管作为可控整流器件。

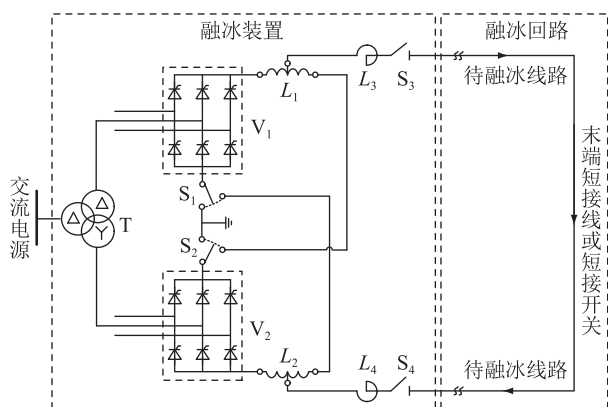


图2 新型整流桥串并联切换直流融冰装置拓扑

Fig.2 New DC ice-melting device topology with the function of series-parallel switching of rectifier bridge

## 1.2 工作原理

根据输电线路类型选择六脉动整流桥串并联模式。

### 1.2.1 并联工作模式

在对导线进行融冰作业时,将切换开关S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>分别切换到平衡电抗器侧,如图3所示,此时2组六脉动整流桥处于并联工作模式,可以输出较大的融冰电流,满足导线融冰的大电流需求。在直流输出正极和负极分别设置一组平衡电抗器,使2组六脉动整流桥的输出电流趋于均衡,达到并联供电的目的。

设2组六脉动整流桥的输出电压瞬时值分别为 $u_{d1}$ 和 $u_{d2}$ 。由于2组六脉动整流桥的输出电压相位相差 $30^\circ$ ,当各晶闸管的触发角相同时,2组六脉动

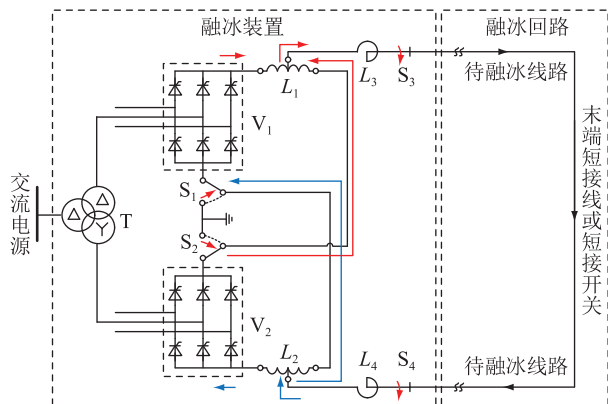


图3 并联工作模式

Fig.3 Parallel operation mode

整流桥的输出平均电压相等。但是由于 $u_{d1}$ 和 $u_{d2}$ 存在相位差,非实时相等,如果直接将2个整流输出端并联,会导致其中一个六脉动整流桥的桥臂承受反向电压而阻断,所以应加入平衡电抗器。

文中研究的具备整流桥串并联切换功能的直流融冰装置在正极和负极各配置一台平衡电抗器,平衡电抗器左半绕组与右半绕组匝数相等,并绕在同一铁芯上,通过感应电压补偿 $u_{d1}$ 和 $u_{d2}$ 的瞬时压差。设2组六脉动整流桥输出电压平均值分别为 $U_{d1}$ 和 $U_{d2}$ ,则并联模式下融冰装置的总输出直流电压为:

$$U_{dP} = \frac{1}{2}(U_{d1} + U_{d2}) \quad (1)$$

设2组六脉动整流桥的输出电流平均值分别为 $I_{d1}$ 和 $I_{d2}$ ,则并联模式下融冰装置的总输出直流电流为:

$$I_{dP} = I_{d1} + I_{d2} \quad (2)$$

此时合上直流连接开关S<sub>3</sub>和S<sub>4</sub>,接入待融冰线路,即可进行升流。在并联工作模式下,2组六脉动整流桥分别输出负荷电流的一半。即在输出同等负荷电流时,相较于常规十二脉动直流融冰装置,可以选用一半通态平均电流的晶闸管。

### 1.2.2 串联工作模式

在对地线进行融冰作业时,将切换开关S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>分别切换到中接地侧,如图4所示,此时2组六脉动整流桥处于串联工作模式。工作原理与图1中常规十二脉动直流融冰装置相同,可以输出较高的融冰电压,满足地线融冰的高电压需求。2个平衡电抗器各有一半绕组接入直流输出回路中,充当部分平波电抗器的功能,从而减少平波电抗器的设计电感值。

串联模式下融冰装置的总输出直流电压为:

$$U_{dS} = U_{d1} + U_{d2} \quad (3)$$

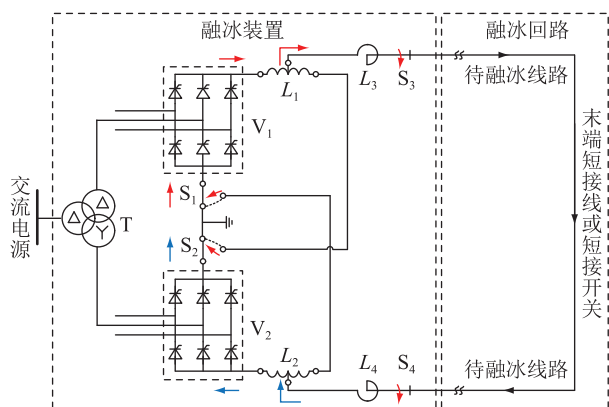


图4 串联工作模式

Fig.4 Series operation mode

串联模式下融冰装置的总输出直流电流为:

$$I_{dS} = I_{d1} = I_{d2} \quad (4)$$

此时合上直流连接开关  $S_3$  和  $S_4$ , 接入待融冰线路, 即可进行升流。在串联工作模式下, 2 组六脉动整流桥分别承担输出电压的一半。即在输出同等直流电压时, 选用和常规十二脉动直流融冰装置相同断态重复峰值电压的晶闸管。

综上, 文中研究的具备整流桥串并联切换功能的直流融冰装置可以同时兼顾导线融冰的大电流和地线融冰的高电压需求, 通过拓扑的适应性切换发挥融冰装置的最佳性能。

## 2 参数设计

文中基于云南 500 kV 牛寨换流站直流融冰装置进行参数设计, 对比分析现有投运的常规十二脉动直流融冰装置和文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置的参数设计差异。溪洛渡—牛寨换流站 I/II 回导地线的融冰需求见表 1, 表中列出了 2 回导地线中的最高融冰电压和最大融冰电流需求。

表 1 导地线融冰需求

Table 1 Ice-melting requirement of transmission line

线路类型	最大融冰电流/A	最高融冰电压/kV
导线	4 825.78	11.85
地线	490.00	20.77

牛寨换流站直流融冰装置采用常规十二脉动直流融冰装置, 主要技术参数如表 2 所示。

表 2 主要技术参数

Table 2 Main technical parameters

参数	数值
接入点电压等级/kV	35
融冰装置额定直流电流 $I_{dN}$ /A	5 000
融冰装置额定直流电压 $U_{dN}$ /kV	$\pm 12$

融冰装置主要一次设备包括换流变压器、整流阀和电抗器, 占整套融冰装置总成本的 90% 以上, 文中基于上述一次设备分析常规十二脉动直流融冰装置和新型整流桥串并联切换直流融冰装置的差异。

### 2.1 换流变压器参数设计

换流变压器参数设计时, 根据额定直流电流和额定直流电压反推换流变压器阀侧交流电流和交流电压, 继而计算出变压器容量。

#### 2.1.1 常规十二脉动直流融冰装置中的换流变压器参数设计

不考虑电网电压波动系数, 整流阀交直流侧电压关系为:

$$U_d = 1.35U_a \cos \alpha - \frac{3X_r I_d}{\pi} \quad (5)$$

式中:  $U_d$  为融冰装置直流输出电压;  $U_a$  为换流变压器阀侧线电压;  $\alpha$  为晶闸管额定触发角, 取  $15^\circ$ ;  $I_d$  为融冰装置直流输出电流;  $X_r$  为回路阻抗, 一般取变压器漏抗的近似计算值。

$$X_r = \frac{U_k U_a^2}{0.5S_T} \quad (6)$$

式中: 变压器视在功率  $S_T = 2\sqrt{3}U_a I_a$ ,  $I_a$  为换流变压器阀侧电流,  $I_a = 0.816I_d$ ; 变压器选用常规短路阻抗百分比, 即  $U_k = 12\%$ 。取  $U_d = 12 \text{ kV}$ ,  $I_d = 5 000 \text{ A}$ , 计算可得换流变压器阀侧线电压  $U_a$  为 9.8 kV, 换流变压器阀侧电流  $I_a$  为 4 080 A。

则换流变压器容量为:

$$S_T = 2\sqrt{3}U_a I_a = 138.51 \text{ MV} \cdot \text{A} \quad (7)$$

取 1.1 倍左右的裕度, 换流变压器设计容量为 150 MV·A。

#### 2.1.2 新型整流桥串并联切换直流融冰装置中的换流变压器参数设计

在对导线进行融冰时, 2 组六脉动整流桥为并联工作模式, 此时每组六脉动整流桥的输出电流为表 2 中融冰装置额定直流电流的一半, 即 2 500 A。取  $U_d = \pm 6 \text{ kV}$  (表 1 中 11.85 kV 向上取整),  $I_d = 2 500 \text{ A}$ , 则换流变压器阀侧线电压和电流为:

$$\begin{cases} U_a = 4.9 \text{ kV} \\ I_a = 2 040 \text{ A} \end{cases} \quad (8)$$

在对地线进行融冰时, 2 组六脉动整流桥为串联工作模式。取  $U_d = \pm 12 \text{ kV}$ ,  $I_d = 500 \text{ A}$  (表 1 中 490 A 向上取整), 计算可得换流变压器阀侧线电压和电流为:

$$\begin{cases} U_a = 9.8 \text{ kV} \\ I_a = 408 \text{ A} \end{cases} \quad (9)$$

分别取式(8)和式(9)中电压电流的较大值,则换流变压器容量为:

$$S_T = 2\sqrt{3}U_a I_a = 69.25 \text{ MV} \cdot \text{A} \quad (10)$$

取 1.1 倍左右的裕度,换流变压器设计容量为 75 MV·A。

综上,常规十二脉动直流融冰装置设计的换流变压器容量为 150 MV·A,文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置设计的换流变压器容量为 75 MV·A,容量减小一半,设备投资成本显著降低。

## 2.2 整流阀参数设计

整流阀的核心器件是晶闸管,晶闸管选型是根据直流电流预选晶闸管参数,预设串联级数,然后校核过压和过流裕度,判断是否满足设计需求。

### 2.2.1 常规十二脉动直流融冰装置中的整流阀参数设计

根据整流桥输出最大电流 5 000 A 初步选择断态重复峰值电压  $V_{\text{DRM}}$  为 5 200 V、通态平均电流  $I_{\text{T(AV)}}$  为 5 060 A 的晶闸管。

对该型号晶闸管进行校验,按 10 只串联,其中 2 只冗余考虑,按照晶闸管断态重复峰值电压计算过压裕度  $k_u$ 。

$$k_u = \frac{(n-2)V_{\text{DRM}}}{U_{\text{peak}}} = 3.00 \quad (11)$$

式中: $n$  为晶闸管串联个数; $U_{\text{peak}}$  为换流变压器低压侧额定线电压峰值,即  $U_{\text{peak}} = \sqrt{2}U_a = 13.86 \text{ kV}$ 。

因此,选用断态重复峰值电压为 5 200 V 的晶闸管完全可以满足电压裕度要求。

取  $I_d = 5 000 \text{ A}$ ,则整流桥臂交流电流有效值为:

$$I_{\text{VT}} = 0.577I_d = 2 885 \text{ A} \quad (12)$$

流过晶闸管的通态平均电流为:

$$I_{\text{VT(AV)}} = \frac{I_{\text{VT}}}{1.57} = 1 837.58 \text{ A} \quad (13)$$

按照晶闸管通态平均电流计算过流裕度  $k_i$ 。

$$k_i = \frac{I_{\text{T(AV)}}}{I_{\text{VT(AV)}}} = 2.75 \quad (14)$$

因此,选用通态平均电流为 5 060 A 的晶闸管完全可以满足电流裕度要求。

### 2.2.2 新型整流桥串并联切换直流融冰装置中的整流阀参数设计

根据整流桥输出最大电流 2 500 A 初步选择断态重复峰值电压  $V_{\text{DRM}}$  为 5 200 V、通态平均电流  $I_{\text{T(AV)}}$  为 2 760 A 的晶闸管。

对该型号晶闸管进行校验,按 10 只串联,其中 2 只冗余考虑,取  $I_d = 2 500 \text{ A}$ ,代入式(11)一式(14)可计算出晶闸管的过压、过流裕度为:

$$\begin{cases} k_u = 3.00 \\ k_i = 3.00 \end{cases} \quad (15)$$

选用断态重复峰值电压为 5 200 V、通态平均电流为 2 760 A 的晶闸管完全可以满足电压、电流裕度要求。

综上,常规十二脉动直流融冰装置选用的晶闸管通态平均电流为 5 060 A,文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置选用的晶闸管通态平均电流为 2 760 A,通态平均电流减少近一半,设备投资成本显著降低。

## 2.3 电抗器参数设计

常规十二脉动直流融冰装置涉及的电抗器是平波电抗器,文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置涉及的电抗器是平衡电抗器和平波电抗器。

### 2.3.1 常规十二脉动直流融冰装置中的电抗器参数设计

平波电抗器的作用是避免直流电流出现断续。计算回路等值总电感为:

$$L_{\Sigma} = \frac{U_{\text{dio}}k_1 \sin \alpha_{\text{max}}}{\omega I_{\text{dj}}} = 29.06 \text{ mH} \quad (16)$$

式中: $U_{\text{dio}}$  为理想空载直流电压,取  $1.35U_a$ ;  $k_1$  为计算系数,取 0.023;  $\alpha_{\text{max}}$  为最大触发角,取  $90^\circ$ ;  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $I_{\text{dj}}$  为临界电流,一般取 100 A。

平波电抗器的电感值为:

$$L = L_{\Sigma} - k_2 L_T = 27.35 \text{ mH} \quad (17)$$

式中: $k_2$  为计算系数,取 3.5;  $L_T$  为换流变压器折算到阀侧的电感,计算值为 0.49 mH。对式(17)计算结果取 1.1 倍左右的裕度,可得  $L$  为 30 mH,即正负极各配置一台 15 mH 的平波电抗器。

### 2.3.2 新型整流桥串并联切换直流融冰装置中的电抗器参数设计

触发角  $\alpha = 0^\circ$  时,设其中一组六脉动整流桥的输出电压傅里叶分解为:

$$u_{d1} = 1.35U_a \left( 1 + \frac{2\cos(6\omega t)}{5 \times 7} - \frac{2\cos(12\omega t)}{11 \times 13} + \frac{2\cos(18\omega t)}{17 \times 19} - \frac{2\cos(24\omega t)}{23 \times 25} + \dots \right) \quad (18)$$

另一组六脉动整流桥的输出电压平均值相等,在相位上相差  $\pi/6$ ,傅里叶分解为:

$$u_{d2} = 1.35U_a \left( 1 - \frac{2\cos(6\omega t)}{5 \times 7} - \frac{2\cos(12\omega t)}{11 \times 13} - \frac{2\cos(18\omega t)}{17 \times 19} - \frac{2\cos(24\omega t)}{23 \times 25} + \dots \right) \quad (19)$$

平衡电抗器两端压降  $u_p$  即为 2 组六脉动整流



桥的输出电压差,即:

$$u_p = u_{d1} - u_{d2} = 1.35U_a \left( \frac{4\cos(6\omega t)}{5 \times 7} + \frac{4\cos(18\omega t)}{17 \times 19} + \dots \right) \quad (20)$$

由式(20)可知, $u_p$ 的主要成分为6次谐波。

六脉动整流桥交直流侧电压波形如图5所示。图中 $u_{an}$ 为换流变压器阀侧相电压瞬时值, $u_{d1}$ 和 $u_{d2}$ 幅值相等,相位相差 $\pi/6$ 。

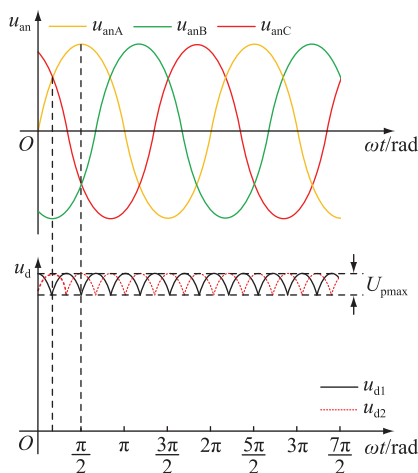


图5 六脉动整流桥交直流侧电压波形

Fig.5 Input and output voltage waveform of 6-pulse rectifier bridge

由图5可知, $\omega t = \pi/6$ 时, $u_{d1}$ 达到谷值, $\omega t = \pi/3$ 时, $u_{d1}$ 达到峰值,则 $u_p$ 峰值 $U_{pmax}$ 为:

$$U_{pmax} = \left( \sqrt{2}U_2 \sin \frac{\pi}{3} - \sqrt{2}U_2 \sin \frac{5\pi}{3} \right) - \left( \sqrt{2}U_2 \sin \frac{\pi}{6} - \sqrt{2}U_2 \sin \frac{3\pi}{2} \right) = \sqrt{2}U_2 \left( \sqrt{3} - \frac{3}{2} \right) \quad (21)$$

式中: $U_2$ 为换流变压器阀侧相电压。

近似计算可取:

$$\frac{U_{pmax}}{6\omega L_p} = I_{pmax} \quad (22)$$

式中: $I_{pmax}$ 为最大环流值,一般取 $I_{pmax} = I_{dmin}/2$ , $I_{dmin}$ 为最小负载电流, $I_{dmin}$ 按照并联工作模式下融冰装置额定直流电流的10%选取,即500 A。代入式(22)可解出:

$$L_p = \frac{U_{pmax}}{6\omega I_{pmax}} = 3.94 \text{ mH} \quad (23)$$

即输出正负极各配置一台电感值为1.97 mH的平衡电抗器。

在整流桥串联工作模式下,由2.3.1节可知,直流回路所需平波电抗器的电感值为30 mH,在该模式下2台平衡电抗器各有一半绕组接入直流回路中,则所需平波电抗器电感值为:

$$L = 28.03 \text{ mH} \quad (24)$$

即每台平波电抗器的电感值为14.02 mH。

综上,采用常规十二脉动直流融冰装置需要设计2台电感值为15 mH的平波电抗器;采用文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置需要设计2台电感值为1.97 mH的平衡电抗器和2台电感值为14.02 mH的平波电抗器。由于平衡电抗器的一半绕组在串联模式下兼具平波功能,增加的投资成本有限。

### 3 成本对比

常规十二脉动直流融冰装置和新型整流桥串并联切换直流融冰装置的成本差异体现在换流变压器、整流阀、切换开关、平衡电抗器和平波电抗器上。

2种方案的设备投资成本对比如表3所示,采用常规十二脉动直流融冰装置的总成本为875万元,采用新型整流桥串并联切换直流融冰装置的总成本为731万元,节省成本144万元,占成套设备总成本的10%左右,经济效益显著,具有一定的实用价值。

表3 成本对比

Table 3 Comparison of cost

设备类型	设备数量	设备成本/万元	
		常规十二脉动直流融冰装置	新型整流桥串并联切换直流融冰装置
换流变压器	1台	410	275
整流阀	1套	215	110
切换开关	2台		16
平衡电抗器	2台		140
平波电抗器	2台	250	190

### 4 仿真实验

利用PSCAD仿真软件搭建仿真模型,验证文中新型整流桥串并联切换融冰装置的运行可行性及其在大电流输出模式下的电流谐波优势。

#### 4.1 运行可行性分析

导线融冰模式下,满负荷输出即 $I_d = 5000 \text{ A}$ , $U_d = 12 \text{ kV}$ 时,2组六脉动整流桥的输出波形如图6所示,此时2组六脉动整流桥处于并联工作模式。

由图6(a)可知,在并联工作模式下,2组六脉动整流桥输出电压 $u_{d1}$ 和 $u_{d2}$ 的平均值相等,且等于融冰装置总输出电压 $u_d$ , $u_{d1}$ 与 $u_{d2}$ 的相位差为 $\pi/6$ ,瞬时电压值不相同。由图6(b)可知,经过平衡电抗器后实现了均流,2组六脉动整流桥的输出电流 $i_{d1}$

和  $i_{d2}$  幅值相等且等于融冰装置总输出电流  $i_d$  的一半,与理论分析一致。

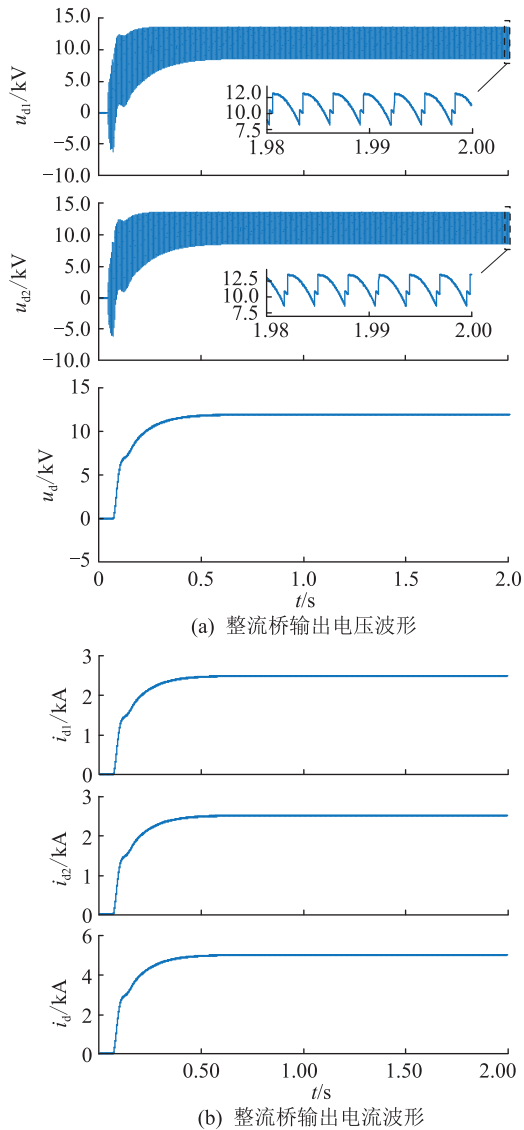


图6 并联工作模式下整流桥输出波形

Fig.6 Output waveforms of rectifier bridge under parallel operation mode

地线融冰模式下,满负荷输出即  $I_d = 500$  A,  $U_d = 24$  kV 时,2组六脉动整流桥的输出波形如图7所示,此时2组六脉动整流桥处于串联工作模式。

由图7(a)可知,在串联工作模式下,文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置与常规十二脉动直流融冰装置工作原理相同,2组六脉动整流桥的输出电压  $u_{d1}$  和  $u_{d2}$  的平均值相等且等于融冰装置总输出电压  $u_d$  的一半。由图7(b)可知,2组六脉动整流桥的输出电流  $i_{d1}$  和  $i_{d2}$  相等且等于融冰装置总输出电流  $i_d$ ,与理论分析一致。

综上,文中所提具备整流桥串并联切换功能的直流融冰装置在并联工作模式下可以实现均流,在串联工作模式下工作原理与常规十二脉动直流融

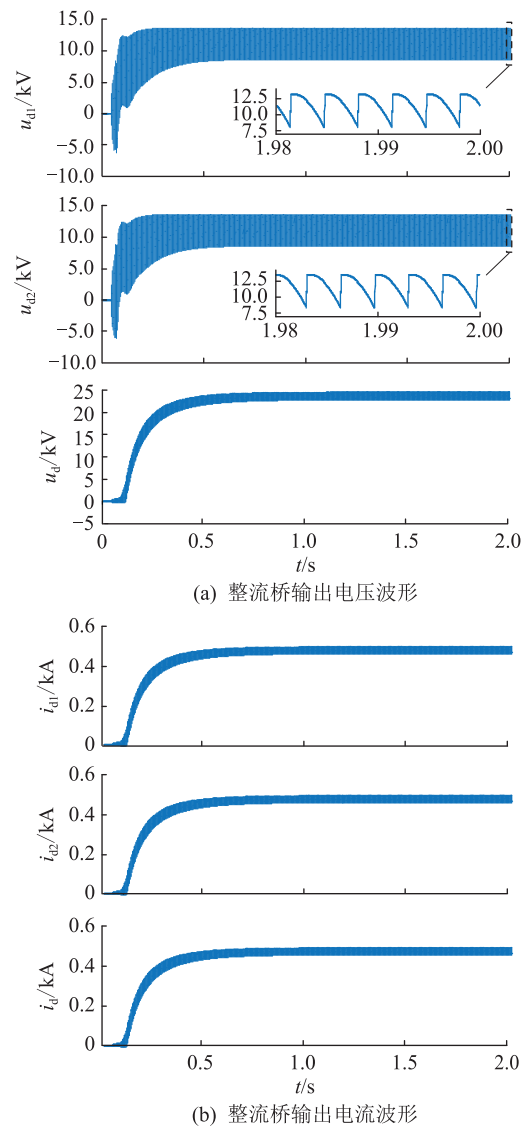


图7 串联工作模式下整流桥输出波形

Fig.7 Output waveforms of rectifier bridge under series operation mode

冰装置相同,仿真结果与理论分析一致。

#### 4.2 注入系统的谐波电流对比

在对导线进行融冰时,2组六脉动整流桥处于并联工作模式,相较于常规十二脉动直流融冰装置,每组六脉动整流桥的输出电流减小一半,注入系统的谐波电流相应减小一半左右,换流变压器高低压侧特征次谐波电流仿真结果如表4所示。

在对地线进行融冰时,2组六脉动整流桥处于串联工作模式,与常规十二脉动直流融冰装置的工作原理相同,换流变压器高低压侧特征次谐波电流仿真结果如表5所示。

综上,相较于常规十二脉动直流融冰装置,文中新型整流桥串并联切换直流融冰装置在对导线进行融冰即处于大电流输出模式时,注入系统的谐波电流减小一半,有效降低了系统电压畸变。

表4 并联工作模式下谐波电流对比

Table 4 Comparison of harmonic currents in parallel operation mode

换流变压器	谐波次数	谐波电流/A	
		常规十二脉动直流融冰装置	新型整流桥串并联切换直流融冰装置
高压侧	11	192.88	93.02
	13	149.51	75.70
	23	74.02	34.57
	25	64.04	29.81
低压侧	5	773.24	383.44
	7	545.52	272.10
	11	347.97	165.93
	13	267.08	136.50
	23	135.09	61.82
	25	114.00	53.72

表5 串联工作模式下谐波电流对比

Table 5 Comparison of harmonic currents in serial operation mode

换流变压器	谐波次数	谐波电流/A	
		常规十二脉动直流融冰装置	新型整流桥串并联切换直流融冰装置
高压侧	11	22.52	22.52
	13	13.69	13.70
	23	9.51	9.51
	25	7.31	7.31
低压侧	5	77.04	77.04
	7	57.54	57.53
	11	39.44	39.42
	13	25.73	25.74
	23	16.15	16.15
	25	14.36	14.36

## 5 结语

理论分析和仿真结果表明,文中所提具备整流桥串并联切换功能的直流融冰装置具有显著优势,相较于常规十二脉动直流融冰装置,优点体现在:可以选用一半容量的换流变压器,节省成本与占地;可以选用一半通态平均电流的晶闸管,节省成本;大电流输出模式下注入系统的谐波电流大幅减小,有效降低系统电压畸变;结合控保系统可实现拓扑的自适应切换,可操作性强。综合上述优点,文中所提新型融冰拓扑具有较强的工程应用价值。

本文得到南瑞集团有限公司科技项目(JS2001-741)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 范帅,王博文,李峥,等. 高海拔、污秽、覆冰气候地区下高压输电线路绝缘子的选择研究[J]. 电瓷避雷器,2020(6):

164-170.

FAN Shuai, WANG Bowen, LI Zheng, et al. Selection of HV transmission lines' insulators at high altitude, polluted and icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 164-170.

[2] 曹云东,冯宇宁,李静,等. 直流覆冰绝缘子电气特性及伞裙结构抗冰性能优化研究[J]. 电瓷避雷器,2021(1):177-186. CAO Yundong, FENG Yuning, LI Jing, et al. Electrical characteristics of DC ice-covered insulators and anti-icing function optimization of shed structure[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1):177-186.

[3] 庄文兵,祁创,熊小伏,等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(17):6-13.

ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 6-13.

[4] 陈勇,李鹏,张忠军,等. 基于PCA-GA-LSSVM的输电线路覆冰负荷在线预测模型[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):110-119.

CHEN Yong, LI Peng, ZHANG Zhongjun, et al. Online prediction model for power transmission line icing load based on PCA-GA-LSSVM[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 110-119.

[5] 徐世泽,龚坚刚,李江涛,等. 中重冰区输电线路防雷措施及分区防雷研究[J]. 电瓷避雷器,2021(4):47-54.

XU Shize, GONG Zhigang, LI Jiangtao, et al. Lightning protection methods and zoning protection strategy for transmission lines in serious icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4):47-54.

[6] 杨伦,楼文娟,陈勇,等. 覆冰导线舞动作用下输电塔破坏机理的试验研究[J]. 振动与冲击,2013,32(24):70-75,82.

YANG Lun, LOU Wenjuan, CHEN Yong, et al. Test for failure mechanism of a transmission tower under iced conductor galloping[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 70-75, 82.

[7] 戚大安. 防治电网覆冰研究报告之一:电网覆冰灾害的特点和发展趋势[J]. 电业政策研究,2007(1):27-30.

QI Daan. One of the research reports on prevention and control of power grid icing: characteristics and development trend of power grid icing disaster[J]. Electric Industry Policy Research, 2007(1):27-30.

[8] 蒋兴良,马俊,王少华,等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力,2005,38(11):27-30.

JIANG Xingliang, MA Jun, WANG Shaohua, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.

[9] 张宇,胡琴,李雪源,等. 复合绝缘子光热型涂料制备与融冰试验[J]. 电网与清洁能源,2020,36(7):1-8.

ZHANG Yu, HU Qin, LI Xueyuan, et al. Ice-melting effect of photo-thermal coating applied to composite insulators[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 1-8.

- [10] 蒋兴良. 贵州电网冰灾事故分析及预防措施[J]. 电力建设, 2008, 29(4): 1-4.  
JIANG Xingliang. Accident analysis of Guizhou power grid ice hazard and its countermeasures[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4): 1-4.
- [11] 漆铭钧, 李西泉. 湖南电网冰冻灾害及其应对措施的回顾与思考[J]. 华中电力, 2008, 21(3): 36-38, 43.  
QI Mingjun, LI Xiquan. The review and reconsider of icing disaster & countermeasure in Hunan electric grid[J]. Central China Electric Power, 2008, 21(3): 36-38, 43.
- [12] 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.  
LU Jiazheng, LI Bo, ZHANG Hongxian, et al. Application of new-type AC and DC de-icers in Hunan power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 77-79.
- [13] 雷红才, 陆佳政, 李波, 等. 可调电容串联补偿式交流融冰装置在湖南电网的应用[J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 28-29, 44.  
LEI Hongcai, LU Jiazheng, LI Bo, et al. Application of new-style regulative capacitor in series compensation AC de-icing equipment in Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(5): 28-29, 44.
- [14] 高燃, 杨兵, 于和林, 等. 安徽地区超高压输电线路融冰技术方案分析[J]. 电力安全技术, 2016, 18(10): 9-12.  
GAO Ran, YANG Bing, YU Helin, et al. Analysis of technical scheme of ice melting for EHV transmission lines in Anhui Province[J]. Electric Safety Technology, 2016, 18(10): 9-12.
- [15] 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[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-9.  
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.
- [16] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13, 22.  
LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13, 22.
- [17] 杜明. 输电线路抗冰除冰技术分析[J]. 科技创业家, 2013(23): 106-107.  
DU Ming. Analysis of anti-icing and de-icing technology for transmission lines[J]. Technological Pioneers, 2013(23): 106-107.
- [18] 刘文涛, 和识之, 陈亦平, 等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 102-107.  
LIU Wentao, HE Shizhi, CHEN Yiping, et al. Defensive strategy for wide area ice disaster of power grid based on DC deicer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 102-107.
- [19] 罗日成, 潘俊文, 刘化交, 等. 超/特高压输电线路带电直流融冰方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1551-1558.  
LUO Richeng, PAN Junwen, LIU Huajiao, et al. A living DC ice-melting approach for UHV & EHV transmission lines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5): 1551-1558.
- [20] 胡叶舟, 余绍峰, 张琳, 等. 输电线路架空地线融冰特性的研究[J]. 浙江电力, 2015, 34(9): 29-33.  
HU Yezhou, YU Shaofeng, ZHANG Lin, et al. Study on characteristics of ice melting of overhead ground wire of transmission line[J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(9): 29-33.
- [21] 宋宏俊. 输电线路导线及地线复用新型直流融冰装置技术研究综述[J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 72-76.  
SONG Hongjun. Overview on technology of new model DC ice-melting device for phase wire and ground wire of transmission line[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(3): 72-76.
- [22] 赵国帅, 李兴源, 傅闯, 等. 线路交直流融冰技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 148-154.  
ZHAO Guoshuai, LI Xingyuan, FU Chuang, et al. Overview of de-icing technology for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 148-154.
- [23] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 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[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [24] LANDRY M, BEAUCHEMIN R, VENNE A. De-icing EHV overhead transmission lines using electromagnetic forces generated by moderate short-circuit currents[C]//IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. IEEE, 2000: 94-100.
- [25] 陆佳政, 张允. 基于12脉动整流技术的500 kV输电线路融冰装置实现[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3041-3047.  
LU Jiazheng, ZHANG Yun. Realization of de-icing device based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3041-3047.

---

作者简介:



陈立群

陈立群(1992),男,硕士,工程师,从事静止无功补偿器、直流融冰相关工作(E-mail: chenlq@nrec.com);

李成博(1985),男,硕士,高级工程师,从事静止无功补偿器、直流融冰相关工作;

周启文(1976),男,硕士,高级工程师,从事可控串补相关工作。



## New DC ice-melting device with the function of series-parallel switching of rectifier bridge

CHEN Liqun, LI Chengbo, ZHOU Qiwen, WANG Chong  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The winter in southern China is very cold, along with high humidity. Regional ice coating problem often appears in the long distance high voltage transmission lines, which may lead to serious power accidents such as tower collapse. A new direct current (DC) ice-melting device with series-parallel switching of rectifier bridge is studied to avoid widespread power outages. Based on the conventional 12-pulse DC ice-melting device, a new DC ice-melting topology is proposed through principle analysis, parameter design and simulation verification, and it simultaneously meet the high current demand for wire melting and the high voltage demand for ground wire melting. Compared with the conventional 12-pulse DC ice-melting device, the new DC ice-melting topology is able to select half-capacity transformer and half-current thyristor, which significantly reduces the equipment costs. Meanwhile, the harmonic current injected into the system decreases effectively when operating in high current output mode, so as to reduce the voltage distortion of the connected system. The new DC ice-melting device with the function of series-parallel switching of rectifier bridge is able to reduce the equipment costs and improve the system voltage quality when the DC ice-melting device is put into operation.

**Keywords:** ice coating of transmission line; direct current (DC) ice-melting device; series-parallel switching; mode switching disconnector; balanced reactor; cost advantage

(编辑 吴楠)

(上接第 220 页)

## MMC-SST input-level control strategy considering power quality optimization

ZHAO Wei, YUAN Zhi, WANG Weiqing, HE Shan  
(Engineering Research Center of Renewable Energy Generation and Grid Connection Control,  
Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The surge of negative sequence component of current affects the waveform quality of grid side current and endangers the normal operation of the system when the three-phase voltage of solid state transformer (SST) in the distribution network is unbalanced and harmonic pollution occurs. In order to solve this problem, a new dual-sequence control strategy is proposed to effectively suppress the negative sequence component of current at the input level of SST. In this paper, the operation principle and input level mathematical model of modular multilevel converter-solid-state transformer (MMC-SST) are introduced firstly. The positive and negative sequence components of voltage and current signals at grid side are separated and extracted by improved second-order generalized integral-quadrature signal generator (SOGI-QSG). The mathematical model of proportional complex integral (PCI) controller is established by introducing orthogonal intermediate variables. A new dual-sequence control strategy based on PCI is proposed under the positive and negative sequence model in the two-phase static coordinate system ( $\alpha\beta$  coordinate system) to control the positive and negative sequence components of the current at grid side. Finally, the simulation system of MMC-SST is built in Matlab/Simulink. Compared with traditional proportional integral (PI) control and improved PI dual-sequence control, the results verify the feasibility and superiority of the proposed dual-sequence control strategy.

**Keywords:** modular multilevel converter-solid-state transformer (MMC-SST); power quality; proportional complex integral (PCI) dual-sequence control; proportional integral (PI) control; three-phase unbalance; harmonic pollution; negative sequence current

(编辑 方晶)