

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.017

## 一种直流分段架空地线融冰方案的设计与研究

李晋伟<sup>1</sup>, 王 奇<sup>1</sup>, 唐金昆<sup>1</sup>, 朱 坚<sup>1</sup>, 刘 彬<sup>2</sup>

(1. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2. 南方电网超高压输电公司柳州局, 广西 柳州 545006)

**摘要:** 针对由不同型号地线组成的长距离架空地线融冰问题,提出了一种长距离多分段架空地线直流融冰方案。研究长距离多分段地线融冰中普通地线及 OPGW 光缆的接线方式。为满足地线融冰电流与实际需要的融冰电流保持一致,提出了一种地线设计融冰电流计算方法。最后结合桂林站直流融冰装置与黎桂线架空地线具体参数,设计了黎桂线多分段架空地线直流融冰方案,通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真分析与黎桂线地线直流融冰方案的工程应用,证明了该融冰方案的合理性与有效性。

**关键词:** 架空地线; 地线融冰接线; 融冰电流; 多分段融冰; 直流融冰方案

### Design and Study of Segmented DC De-icing Scheme for Overhead Ground Wire

LI Jinwei<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, TANG Jinkun<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

(1. Maintenance & Test Centre, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;

2. Liuzhou Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangxi Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** A segmented DC ice-melting scheme is proposed to solve the de-icing problem for the long distance overhead ground wire composed of different types of wires. The connection modes of common ground wire and optical fiber composite overhead ground wire in the DC de-icing scheme are analyzed. And a method for computing the ice melting current is presented for the design of the DC de-icing scheme. Consequently, a segmented DC de-icing approach is designed for the overhead ground wire of Li-Gui transmission line with consideration of the Guilin substation DC ice-melting device and the overhead ground wire parameters of Li-Gui transmission line. Simulation result via software PSCAD/EMTDC and the actual application demonstrate that the present de-icing approach is feasible and effective.

**Key words:** overhead ground wire; connection modes of ground wire for de-icing; ice melting current; segmented de-icing; DC de-icing scheme

## 0 引言

南方电网超高压输电公司(下简称超高压公司)运行着 500 kV 天广四回交流,贵广四回交流,±500 kV 天广、贵广直流,±800 kV 云广特高压直流的长达 16 110 km 的南方电网“八交四直”西电东送大通道,输电走廊横跨多个冰区,线路覆冰灾害严重。为保障超高压输电网安全稳定的正常运行,超高压公司分别在南方电网主网架通道上的桂林、独山、河池等 500 kV 变电站加装了直流融冰装置,并在高坡换流站采用两端背靠背运行方式对±500 kV 贵广直流输电线路的光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)进行融冰<sup>[1-11]</sup>。超高压公司将直流融冰技术应用于架空地线融冰工作

中,取得了良好的融冰效果,积累了一定的地线融冰相关设计研究经验。

笔者以超高压公司的 500 kV 黎桂甲乙线架空地线融冰工程为研究对象,根据黎桂线地线参数确定了地线设计融冰电流,结合桂林站直流融冰装置与架空地线参数研究了多种的地线融冰方案,提出了一套适用于超高压骨干网地线融冰的多分段地线直流融冰方案,进行了仿真试验并通过地线融冰工程的实践考验,对各级电网公司的地线融冰方案设计与研究具有指导意义。

## 1 直流分段架空地线融冰方案

### 1.1 地线融冰接线方式的选择

地线融冰接线方式主要有地线串联方式、并联

收稿日期:2015-03-07; 修回日期:2015-04-20

方式及多段并联方式,研究表明长距离架空地线如采用整体一次性融冰,对融冰设备要求高,融冰方案实施困难。特别当单回架空地线中线材型号较多时,不同型材其最大允许电流亦不相同,若进行一次性地线融冰,容易出现大截面地线达到融冰电流时,小截面地线已超过其最大允许电流,进而破坏其强度甚至烧毁地线,因此推荐选择一根分流地线根据同型号分段与导线组成回路融冰,OPGW 光缆采用全段与导线组成回路融冰的方案。

普通地线及 OPGW 光缆通直流电时即可通过大地或导线返回,但考虑到地线融冰时运行安全等因素,推荐采用地线通过两相导线返回形成融冰回路的方案,具体融冰接线见图 1、2。

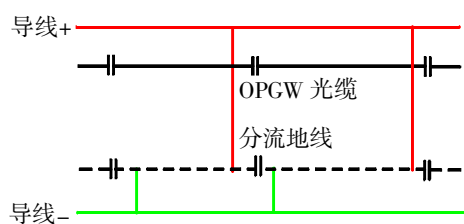


图 1 分流地线融冰接线示意图

Fig. 1 The connection modes of DC de-icing on ground wire

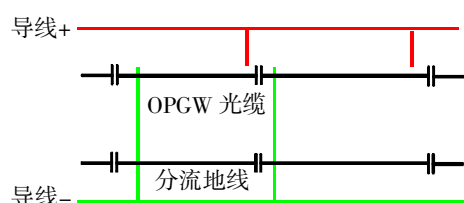


图 2 OPGW 光缆融冰接线示意图

Fig. 2 The connection modes of DC de-icing on OPGW

## 1.2 地线设计融冰电流的计算

地线融冰电流是指地线覆冰后,在相应覆冰厚度、环境温度、风速条件和给定时间下,使地线覆冰融化的电流。美国、前苏联、日本等国家也都提出了导线融冰电流的计算公式,其中以前苏联提出的布尔格道夫融冰电流计算公式考虑的因素比较齐全,公认为比较准确<sup>[9-12]</sup>。但由于布尔格道夫融冰电流计算公式理想化了外部条件,而实际融冰的外部条件比较复杂,如地形、气候、覆冰情况等不同对融冰电流影响较大,其计算结果与实际需要的融冰电流可能有相当的差距<sup>[13]</sup>。超高压公司在多年地线融冰研究中得出了地线设计融冰电流的经验公式为

$$I_r = K \sqrt{\frac{\Delta t}{(R_{T_0} + R_{T_1}) R_0}} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } I_{\min} < I_r < I_{\max}$$

式(1)中: $I_r$ 为地线设计融冰电流, $A$ ; $K$ 为可靠系数,为保证架空地线或 OPGW 上覆冰在预期时间内

完全脱落,可靠系数一般取 1.1~1.3,具体值与环境条件、覆冰厚度、融冰时间等因素相关; $R_0$ 为 0℃时的地线电阻, $\Omega/\text{m}$ ; $\Delta t$ 为导体温度与外界气温之差,℃; $R_{T_0}$ 为等效冰层传热阻,℃·cm/W; $R_{T_1}$ 为对流及辐射等效热阻,℃·cm/W; $I_{\min}$ 为地线最小融冰电流; $I_{\max}$ 为地线最大允许电流。 $R_{T_0}$ 、 $R_{T_1}$ 、 $I_{\min}$ 、 $I_{\max}$ 与计算公式可参见文[14-15]。对于长距离多分段架空地线某一段或几段地线需要融冰时,可根据式(1)求出的地线设计融冰电流进行分段地线融冰。

## 2 黎桂线直流分段地线融冰方案

### 2.1 黎桂甲乙线地线分布概况

500 kV 黎桂甲乙线紧邻 500 kV 施黎甲乙线与 500 kV 桂山甲乙线,线路全长 2×178.3 km,其中黎桂甲线 337 号-373 号、乙线 340 号-376 号为紧凑型同塔双回路,其余段为紧凑型单回路,其与其他线路连接概况见图 3。



图 3 500 kV 黎桂甲乙线概况

Fig. 3 The diagrammatic sketch of 500 kV Li-Gui transmission line

其中 10、15 mm 轻、中冰区为紧凑型线路,导线采用 6×LGJ-300/40 钢芯铝绞线,分裂间距 375 mm,相间距离为 6.7 m,倒三角排列;20 mm 及以上重冰区为常规型线路,导线采用 4×LGJ-630/45 钢芯铝绞线,分裂间距 450 mm,水平排列,相间距离为 12 m;全线地线架设一根 OPGW 光缆,位于乙线前进方向右侧,其余为普通地线。全线地线分段示意图见图 4,详细参数见表 1。

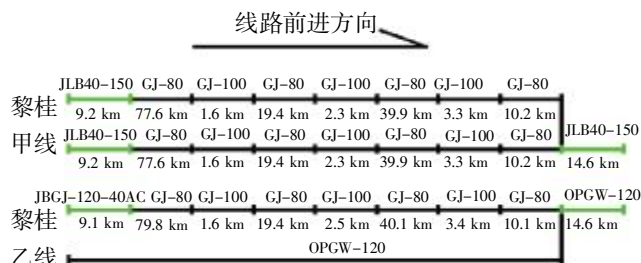


图 4 500 kV 黎桂线地线分段示意图

Fig. 4 The diagrammatic sketch of 500 kV Li-Gui segmented overhead ground wire

### 2.2 黎桂线多分段地线融冰方案的确定

在环境温度 -5℃,风速 5 m/s、冰厚 10 mm 的融

表 1 500 kV 黎桂甲乙线地线参数  
Table 1 Parameters of 500 kV Li-Gui  
overhead ground wire

| 线路名称 | 杆塔号     | 前进方向左侧地线型号 | 前进方向右侧地线型号 | 地线长度/km |
|------|---------|------------|------------|---------|
| 黎桂甲线 | 1-19    | JLB40-150  | JLB40-150  | 9.198   |
|      | 19-176  | GJ-80      | GJ-80      | 77.627  |
|      | 176-179 | GJ-100     | GJ-100     | 1.602   |
|      | 179-216 | GJ-80      | GJ-80      | 19.439  |
|      | 216-222 | GJ-100     | GJ-100     | 2.295   |
|      | 222-307 | GJ-80      | GJ-80      | 39.933  |
|      | 307-315 | GJ-100     | GJ-100     | 3.337   |
|      | 315-337 | GJ-80      | GJ-80      | 10.207  |
|      | 337-373 | JLB40-150  | OPGW-120   | 14.636  |
|      | 1-182   | GJ-80      | OPGW-120   | 88.922  |
| 黎桂乙线 | 182-185 | GJ-100     | OPGW-120   | 1.554   |
|      | 185-222 | GJ-80      | OPGW-120   | 19.401  |
|      | 222-228 | GJ-100     | OPGW-120   | 2.491   |
|      | 228-314 | GJ-80      | OPGW-120   | 40.050  |
|      | 314-320 | GJ-100     | OPGW-120   | 3.391   |
|      | 320-340 | GJ-80      | OPGW-120   | 10.135  |
|      | 340-376 | JLB40-150  | OPGW-120   | 14.636  |

冰外部环境设计条件下,根据式(1)可以得出 500 kV 黎桂线中不同型号的地线设计融冰电流值,详见表 2。

表 2 500 kV 黎桂线地线设计融冰电流  
Table 2 The designed ice melting current of  
500 kV Li-Gui overhead ground wire

| 地线型号      | 20 °C时直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 设计融冰电流/A |
|-----------|----------------------------------------------|----------|
| GJ-80     | 2.482 0                                      | 140      |
| GJ-100    | 1.950 0                                      | 140      |
| JLB40-150 | 0.295 2                                      | 380      |
| OPGW-120  | 0.530 0                                      | 280      |

针对黎桂甲线地线融冰有 2 种融冰方案:

表 4 500 kV 黎桂乙线地线分段方式及融冰参数

Table 4 Parameters of de-icing scheme for 500 kV Li-Gui II overhead ground wire

| 线路名称 | 杆塔号     | 地线型号      | 地线长度/km | 直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 最小融冰电流/A | 最大允许电流/A | 设计融冰电流/A |
|------|---------|-----------|---------|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| 黎桂乙线 | 1-19    | JLB40-150 | 9.143   | 0.295 2                                | 343      | 515      | 380      |
|      | 19-185  | GJ-100    | 81.333  | 1.950 0                                | 126      | 216      | 140      |
|      | 185-340 | GJ-100    | 75.468  | 1.950 0                                | 126      | 216      | 140      |
|      | 340-376 | JLB40-150 | 14.636  | 0.295 2                                | 343      | 515      | 380      |

表 5 500 kV 黎桂乙线 OPGW 地线分段方式及融冰参数

Table 5 Parameters of de-icing scheme for 500 kV Li-Gui II OPGW

| 线路名称      | 杆塔号   | 地线型号     | 地线长度/km | 直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 最小融冰电流/A | 最大允许电流/A | 设计融冰电流/A |
|-----------|-------|----------|---------|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| 黎桂乙线 OPGW | 1-376 | OPGW-120 | 180.58  | 0.53                                   | 252.70   | 359.00   | 280.00   |

2)将普通地线全部更换为 JLB40-150,融冰电流取 380 A,可实现全线整段融冰。

考虑到经济投入问题,分析同黎桂甲线融冰方

1)黎桂甲线全线地线分为 3 段分别进行融冰,见表 3。对黎桂甲线 1-19 号塔之间的地线以及 337-373 号塔之间的地线进行融冰,融冰电流取 380 A;对黎桂甲线 19-337 号塔之间的地线进行融冰,融冰电流取 140 A。

2)将普通地线全部更换为 JLB40-150,融冰电流取 380 A,可实现全线整段融冰。

融冰方案 1 不涉及更换地线,改造费用较少,但融冰分段数较多,融冰时接线较复杂,无法全线整段融冰;融冰方案 2 改造费用较大,但可实现全线整段融冰。两个方案融冰效果均能达到要求,考虑到方案 1 所需费用仅为方案 2 费用的十分之一,因此采用融冰方案 1,其地线分段方式及融冰参数见表 3。考虑到地线钢绞线有其一定的使用年限,因此在线路后续运行维护过程中将钢绞线逐步换成铝包钢绞线,以便实现全线整段融冰。

表 3 500 kV 黎桂甲线地线分段方式及融冰参数  
Table 3 Parameters of de-icing scheme for  
500 kV Li-Gui I overhead ground wire

| 线路名称 | 杆塔号     | 地线型号      | 地线长度/km | 直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 最小融冰电流/A | 最大允许电流/A | 设计融冰电流/A |
|------|---------|-----------|---------|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| 黎桂甲线 | 1-19    | JLB40-150 | 9.198   | 0.295 2                                | 343      | 515      | 380      |
| 地线   | 19-337  | GJ-100    | 15.440  | 1.950 0                                | 126      | 216      | 140      |
|      | 337-373 | JLB40-150 | 14.636  | 0.295 2                                | 343      | 515      | 380      |

针对黎桂乙线地线融冰亦有 2 种融冰方案:

1)全线地线分为 4 段进行分段融冰,见表 3-5。对黎桂乙线 1-19 号塔之间的地线以及 340-376 号塔之间的地线进行融冰,融冰电流取 380 A;对黎桂乙线 19-185 号塔之间的地线以及 185-340 号塔之间的地线进行融冰,融冰电流取 140 A。

案选择,黎桂乙线地线融冰采用融冰方案 1),其地线分段方式及融冰参数见表 4。

因黎桂乙线 OPGW 为同一型号,所以黎桂乙线

综上所述,黎桂线地线融冰电流范围为 140~380 A,考虑到融冰接线与融冰装置容量限制,对黎桂线地线按 1 根架空地线与导线形成回路的方式多分段地线直流融冰,其地线融冰方式见图 5。

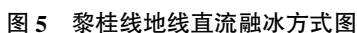


**Fig. 5 The diagrammatic sketch of de-icing scheme for Li-Gui overhead ground wire**



**Fig. 6 The electric first wiring diagram of DC ice-melting and SVC device in Guilin substation**

表 6 桂林站融冰装置主要参数

**Table 6** Parameters of DC ice-melting device in Guilin substation

| 参数                 | 设计值               | 备注                |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 接入点额定电压/kV         | 220.0             | 电力系统额定电压          |
| 整流变二次侧电压/kV        | 20.5              | 无                 |
| 直流电压稳定<br>运行范围/kV  | $\pm 25.0$        | 融冰装置能够稳定运行电压的范围   |
| 直流电流稳定<br>运行范围/A   | 120.0~<br>4 500.0 | 融冰装置能够稳定运行电流的范围   |
| 融冰功率/MW            | 225.0             | 无                 |
| 触发电角稳态<br>运行范围/(°) | 5.0~88.0          | 融冰装置能够稳定运行触发电角的范围 |
| 滤波电容器容量/Mvar       | 180.0             | 配置 5、7、11 次滤波器    |
| 过载能力               | 1.2 p.u./2.0 h    | 无                 |

### 3.1 桂林站直流融冰兼 SVC 装置参数

目前,主要由 500 kV 桂林站对黎桂线进行地线融冰,桂林站直流融冰兼 SVC 装置的一次主接线见图 6,融冰装置主要参数见表 6。

### 3.2 黎桂线多分段地线直流融冰方案仿真分析

根据桂林站直流融冰装置参数与黎桂线的地线参数在 PSCAD/EMTDC 仿真软件上对黎桂线多分段地线直流融冰方案进行了仿真计算<sup>[16-19]</sup>,按直流电压条件进行黎桂线地线多分段直流融冰方案仿真结果见表 7。从表 7 可看出,对黎桂线架空地线进行分段融冰时,桂林站直流融冰装置的输出直流电压均能满足,运行触发角在  $5^{\circ}\sim 88^{\circ}$  的正常触发角范围内。

图 6 500 kV 桂林站直流融冰兼 SVC 装置一次接线图

**Fig. 6 The electric first wiring diagram of DC ice-melting and SVC device in Guilin substation**

表 6 桂林站融冰装置主要参数

**Table 6** Parameters of DC ice-melting device in Guilin substation

| 参数                 | 设计值               | 备注                |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 接入点额定电压/kV         | 220.0             | 电力系统额定电压          |
| 整流变二次侧电压/kV        | 20.5              | 无                 |
| 直流电压稳定<br>运行范围/kV  | $\pm 25.0$        | 融冰装置能够稳定运行电压的范围   |
| 直流电流稳定<br>运行范围/A   | 120.0~<br>4 500.0 | 融冰装置能够稳定运行电流的范围   |
| 融冰功率/MW            | 225.0             | 无                 |
| 触发电角稳态<br>运行范围/(°) | 5.0~88.0          | 融冰装置能够稳定运行触发电角的范围 |
| 滤波电容器容量/Mvar       | 180.0             | 配置 5、7、11 次滤波器    |
| 过载能力               | 1.2 p.u./2.0 h    | 无                 |

对黎桂线地线分段直流融冰进行直流电流连续性仿真计算, 将其每个分段融冰电流值由设计融冰电流开始逐渐降低融冰电流值至融冰电流出现过零断续情况, 经分析融冰电流波形结果见表 8。

从表 8 可看出,在对黎桂线地线进行多分段直流融冰时,在融冰设计电流下进行融冰不会出现融冰电流过零断续的情况,对于各分段的 GJ-100 架空地线融冰时,融冰装置的最小电流需要设置为 140 A;对于其他型号的架空地线融冰时,融冰装置的最小电流需要设置为 200 A。

#### 4 黎桂线融冰方案的应用效果

2013 年 1 月 6 日,超高压覆冰预警系统监测到

表 7 满足直流电压条件的黎桂线地线多分段直流融冰方案参数表

Table 7 Parameters of de-icing scheme for Li-Gui overhead ground wire meeting the requirements of DC voltage

| 线路名称 | 杆塔号     | 地线型号      | 长度/km   | 设计融冰电流/A | 直流电压/kV | 融冰直流容量/MW | 运行触发角/(°) |
|------|---------|-----------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| 黎桂甲线 | 1-19    | JLB40-150 | 9.198   | 380      | 3.15    | 1.20      | 86.16     |
|      | 19-337  | GJ-100    | 154.440 | 140      | 42.58   | 5.96      | 38.54     |
|      | 337-373 | JLB40-150 | 14.636  | 380      | 1.73    | 0.66      | 87.65     |
| 黎桂乙线 | 1-19    | JLB40-150 | 9.143   | 380      | 3.17    | 1.21      | 86.13     |
|      | 19-340  | GJ-100    | 156.801 | 140      | 43.23   | 6.05      | 37.44     |
|      | 340-376 | JLB40-150 | 14.636  | 380      | 1.73    | 0.66      | 87.65     |
|      | 1-376   | OPGW-120  | 180.580 | 280      | 27.61   | 7.73      | 59.21     |

表 8 黎桂线地线融冰方案的融冰电流断续值

Table 8 Intermittent value of ice melting current of de-icing scheme for Li-Gui overhead ground wire

| 线路名称 | 杆塔号     | 地线型号      | 设计融冰电流/A | 仿真结果               |
|------|---------|-----------|----------|--------------------|
| 黎桂甲线 | 1-19    | JLB40-150 | 380      | $I_d=200$ A 时未出现断续 |
|      | 19-337  | GJ-100    | 140      | $I_d=140$ A 时未出现断续 |
|      | 337-373 | JLB40-150 | 380      | $I_d=200$ A 时未出现断续 |
| 黎桂乙线 | 1-19    | JLB40-150 | 380      | $I_d=200$ A 时未出现断续 |
|      | 19-340  | GJ-100    | 140      | $I_d=100$ A 时未出现断续 |
|      | 340-376 | JLB40-150 | 380      | $I_d=200$ A 时未出现断续 |
|      | 1-376   | OPGW-120  | 280      | $I_d=200$ A 时未出现断续 |

黎桂乙线 19-340 铁塔段导线覆冰厚度达到 6.5 mm, 超过地线覆冰预警三级警戒值(4 mm), 接近地线覆冰预警二级警戒值(7 mm), 覆冰比值达 0.43%, 达到地线融冰启动条件, 桂林站启动融冰装置按照黎桂线多分段地线直流融冰方案对黎桂乙线 19-340 铁塔段型号为 GJ-100 的导线进行了融冰电流为 140 A, 时间长达 55 min 的地线分段融冰, 融冰效果显著, 有效处理了黎桂乙线 19-340 铁塔段地线覆冰险情, 也从地线融冰实践上证明了长距离多分段地线直流融冰方案的有效性与实用性。

## 5 结语

1) 提出了一个适用于单回地线中线材型号不同的长距离多分段地线直流融冰方案, 研究了符合长距离地线融冰的接线方式, 分析了超高压输电网的

地线设计融冰电流的经验公式。

2) 结合 500 kV 黎桂线地线参数与融冰外部环境条件, 计算了黎桂线多分段地线的设计融冰电流, 分析并确定了黎桂线多分段地线直流融冰方案。

3) 通过 PSCAD/EMTDC 仿真分析证明了黎桂线多分段地线直流融冰方案融冰参数选择的合理性, 并得到黎桂线地线融冰实践的有效支持, 验证了文中提出的长距离多分段地线直流融冰方案的有效性与实用性。

## 参考文献:

- [1] 胡 毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215-219.  
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215-219.
- [2] 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.
- [3] 饶 宏, 傅 闯, 朱功辉, 等. 南方电网直流融冰技术的研究与应用[J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 7-12.  
RAO Hong, FU Chuang, ZHU Gonghui, et al. Research & application of DC-based deicing technology in CSG [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(6): 7-12.
- [4] HORWILL C, DAVIDSON C C, GRANGER M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines [C]//2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dallas, USA: IEEE, 2006: 529-534.
- [5] 肖明训, 肖谷金, 周海波, 等. 复合导线融冰技术及装置[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 130-132.  
XIAO Mingxun, XIAO Gujin, ZHOU Haibo, et al. Melting-ice technology and equipment by using compound wire [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 130-132.

- [6] 南方电网科学研究院有限责任公司. 南方电网融冰技术应用专题报告[R]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2011.
- [7] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1677-1682.  
HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [8] 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.
- [9] 刘泽洪. 直流输电线路覆冰与防治[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [10] 陈彦州, 王奇, 蔡延雷, 等. 南方电网主网架直流融冰工作流程与融冰效率研究[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 86-92.  
CHEN Yanzhou, WANG Qi, CAI Yanlei, et al. Analysis on DC deicing process and efficiency in China Southern Power Grid[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 86-92.
- [11] 陈智. 江西省电网直流融冰计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 72-74.  
CHEN Zhi. The research of DC anti-icing for Jiangxi grid [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 72-74.
- [12] 中南电力设计院. 500 kV 桂山甲乙线架空地线融冰改造工程可行性报告[R]. 武汉: 中南电力设计院, 2012.
- [13] 蒋兴良, 范松海, 胡建林, 等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 111-116.  
JIANG Xingliang, FAN Songhai, HU Jianlin, et al. Analysis of critical ice-melting current for short-circuit DC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 111-116.
- [14] 陆佳政, 谭艳军, 李波, 等. 特高压直流输电线路分段直流融冰方案[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 541-545.  
LU Jiazheng, TAN Yanjun, LI Bo, et al. Segmented DC ice-melting solution of UHV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 541-545.
- [15] PÉTER Z. Modeling and simulation of the ice melting process on a current-carrying conductor [D]. Québec: Université Du Québec, 2006.
- [16] HUNEAULT M, LANGHEIT C, CARON J. Combined models for glaze ice accretion and de-icing of current-carrying electrical conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1611-1616.
- [17] 何鹏飞, 王渝红, 李兴源, 等. 换流变压器在直流融冰装置中的作用研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 113-117.  
HE Pengfei, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Research on influences of converter transformer on DC ice-melting device[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 113-117.
- [18] 王少华. 输电线路典型覆冰事故及防治技术分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 85-89.  
WANG Shaohua. Analysis of typical ice accidents of transmission lines and preventing techniques [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 85-89.
- [19] 彭向阳, 周华敏, 杨楚明. 广东电网直流融冰装置安装调试及实冰演练[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 98-102.  
PENG Xiangyang, ZHOU Huamin, YANG Chuming. Installation debugging and ice-melting drilling of DC de-icer in Guangdong power grid [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 98-102.

李晋伟(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事柔性输电与直流融冰、超高压交直流系统在线监测方面的工作。

王奇(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统稳定与控制、直流及串补控制保护方面工作。

唐金昆(1973—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统控制保护、柔性输电技术研究。

(上接第 96 页)

- LIANG Yongchun, CHAI Jin'ai, LI Yanmu, et al. Study on current distribution in same phase of two parallel large section cables based on FEM[J]. High Voltage Apparatus 2007, 43(3): 186-188.
- [17] SINGER H, STEINBIGLER H, WEIB P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1974(93): 1660-1667.
- [18] 河野照哉. 电磁场数值算法[M]. 宅间董, 尹克宁, 译. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [20] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- 柴进爱(1981—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力电缆温度场、载流量方面的研究和海洋电气工程设计工作。
- 李彦明(1946—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力设备在线监测方面的研究。