

基于非接触耦合式潮流控制器的 不停电融冰装置拓扑及控制方法研究

唐爱红¹, 杨熠¹, 杨惠源¹, 宋金根², 裘鹏³, 陈骞³, 宋幸¹, 贾涛¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省 杭州市 310007; 3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省 杭州市 310014)

Research on Topology and Control Method of Uninterrupted Ice Melting Device Based on Non-contact Coupling Power Flow Controller

TANG Aihong¹, YANG Yi¹, YANG Huiyuan¹, SONG Jinggen², QIU Peng³, CHEN Qian³, SONG Xing¹, JIA Tao¹

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Most of the existing AC deicing technology of split sub-conductors will change the load current, affect the normal power transmission or the normal disconnection of power lines, and thus increase the risk of line outage. Based on the control principle of distributed power flow controller, the single-turn coupling transformer is distributedly stuck on the split sub-conductor, and the spacer rod in the ice melting section is insulated to make the ice melting current rotate only between the sub-conductors in the ice melting section. The bypass switch is used in the control side of the coupling transformer to exit the ice melting device, and the controllable switch is used in the parallel connection capacitor and inductance element to realize the flexible regulation of the equivalent impedance of the coupling transformer. The non-contact coupling AC ice melting topology is formed with the single-turn coupling transformer. In order not to change the magnitude of load current, based on the split ratio of de-icing current and load current, the mathematical relationship between the equivalent impedance of each sub-conductor and de-icing sub-unit with constant external equivalent impedance of de-icing section is derived, and the coordinated control strategy of each de-icing sub-unit without affecting the normal power transmission and de-icing of each sub-conductor in turn is proposed. Based on a 500kV transmission line example, the effectiveness of the proposed method is verified from two aspects of theoretical calculation and digital simulation.

KEY WORDS: non-contact coupling ice melting device; distributed power flow control technology; topology of ice melting device; coordinated control strategy; external equivalent impedance

摘要: 现有分裂子导线的交流融冰技术大多将改变负荷电流, 影响正常电力输送, 或者影响电力线路正常开断, 增加线路停电风险。利用分布式潮流控制器的调控原理, 将单匝耦合变压器分布式地卡合在分裂子导线上, 将被融冰段内的间隔棒进行绝缘改造, 使融冰电流只在融冰段内的子导线间进行轮换; 在耦合变压器的控制侧采用旁路开关将融冰装置退出, 在并联连接电容与电感元件中采用可控开关实现耦合变压器等效阻抗的柔性调控, 与单匝耦合变压器共同形成非接触耦合式交流融冰拓扑; 为了不改变负荷电流的大小, 基于融冰电流与负荷电流的分流比, 推导了被融冰段对外等效阻抗不变的各子导线与融冰子单元等效阻抗的数学关系式, 提出不影响正常电力传输的、各子导线依次融冰的各融冰子单元协调控制策略。基于某 500kV 输电线路实例, 从理论计算和数字仿真 2 个方面验证了所提方法的有效性。

关键词: 非接触耦合式融冰装置; 分布式潮流调控技术; 融冰装置拓扑; 协调控制策略; 对外等效阻抗

0 引言

处于高寒地区的输电线路在冬季易发生覆冰现象, 不同的覆冰程度可能会产生线路断线、杆塔倒塌、线路振荡、绝缘闪络等事故, 致使部分地区电网输变电设施受损以及相关发电机组跳闸停机, 不仅会极大地降低系统供电可靠性, 还会造成严重

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS20008F)。

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211DS20008F).

的经济损失^[1-3]。热力除冰是目前应用最广的除冰方法^[4-6]，其主要通过加大覆冰线路电流的方法以增加线路发热量，从而实现融化线路表面覆冰的功能。基频交流融冰可在线路供电正常的情况下实现融冰，支持带负荷融冰，相比需要停电转供的直流融冰、高频交流融冰具备更高的供电可靠性^[7-8]。

目前，基频交流融冰主要包括过负荷融冰、移相变压器融冰、分裂子导线交替融冰等方案。其中，过负荷融冰需要通过运行方式改变潮流分配方案以增大覆冰线路负荷电流，此融冰方法已经在韶关电网的 8 条 110kV 融冰线路中得到运用，该过程中输电线路无需停电^[9]，但是在运行中要经过多层级的协商，并通过调整发电厂若干台机组出力、母线分裂运行和选择开环点来增加导线电流，执行困难。移相变压器融冰适用于双回线路中，其通过往线路中串联接入一个移相变压器强迫产生环路电流，以此增大其中一回线的电流大小，从而实现对该线路的融冰功能。杨旗等基于 220kV 电压等级电网的典型融冰要求，设计了一种线路融冰用移相变压器，并以贵州电网某 220kV 线路为算例进行了理论计算与仿真研究^[10]，目前该技术已在加拿大魁北克电网有对应的应用^[11]，但因为该方案涉及大范围继电保护装置的重新整定以及大容量无功补偿需求，实现困难，装置只能布置于变电站内，不适用长距离大容量的融冰，所以在国内没有采取该方案^[12]。分裂子导线交替融冰方案即在保持单相输电电流不变的条件下，通过交替开断部分子导线以增大其他子导线的电流，重庆大学张志劲团队进行了四分裂导线交替融冰的方法研究与现场试验，并验证了该方案的可行性^[13]，然而，该种融冰方案需要在不同分裂导线上单独安装断路器，在实际运行时频繁开断电流，从而大幅度降低断路器寿命，经济性较差，而且断路器的存在又增加了电网运行的安全风险^[14]。

分布式潮流控制器^[15-16]是一种可平滑实现容性、感性调节的非接触式耦合串联补偿装置，可快速精准地控制线路的阻抗、电流以及潮流^[17-19]，为此，本文拟将分布式潮流控制器的灵活调节特性^[20]应用至线路融冰中，将单匝耦合变压器分布式卡合在各分裂子导线上(如图 1 所示)，形成一种非接触耦合式不停电交流融冰装置，研究装置的投切及保护拓扑，研究其协调优化控制方法，在不改变电力线路正常电力输送的情况下将被融冰段内几根子

导线的潮流(电流)挪移到某一根或某几根上，使各根子导线依次达到融冰电流值，逐次对各根子导线进行融冰。

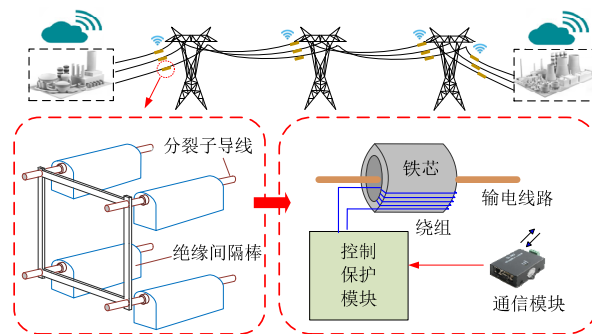


图 1 非接触耦合式融冰装置示意

Fig. 1 Schematic of non-contact coupled ice melting device

1 拓扑研究

1.1 安装方法

本文提出的非接触耦合式融冰为交流融冰技术，其在线路上的安装方法具体如图 2 所示，将分裂导线进行分段，对段内的间隔棒进行绝缘改造，段头段尾的间隔棒保持原来的非绝缘。

如此，融冰电流只被限制在本段内进行挪移，融冰装置中所用的变压器初级绕组直接由分裂子导线形成，等效为单匝绕组，因此无需对分裂子导线进行物理改造即可将融冰装置卡钳安装在上面，具备很好的便捷性与灵活性。

1.2 融冰装置拓扑

为了使该融冰装置对外体现的阻抗在容性与感性间能进行连续平滑调节，本文将电容 C 和电感 L 进行并联，接入单匝耦合变压器的二次侧，并在电感 L 支路串入反向并联的双向可控电力电子开关。为了保护可控开关管，并便于融冰装置的投切，在单匝耦合变压器的二次侧还并联了旁路开关。形成的融冰装置拓扑如图 3 所示。

通过对可控开关管触发脉冲的控制，改变其所在的电感 L 支路中电流的大小，以连续改变该装置在被控线路中总的等效电抗。结合实时融冰电流需求，连续调节各分裂子导线阻抗。

在需要融冰时，旁路开关断开， LC 并联支路通过单匝耦合变压器等效串入输电线路，融冰装置可根据实时融冰电流大小的需求对可控开关管导通角进行调节，从而连续调节融冰装置串入线路等效阻抗的大小，使分裂子导线电流达至对应的融冰

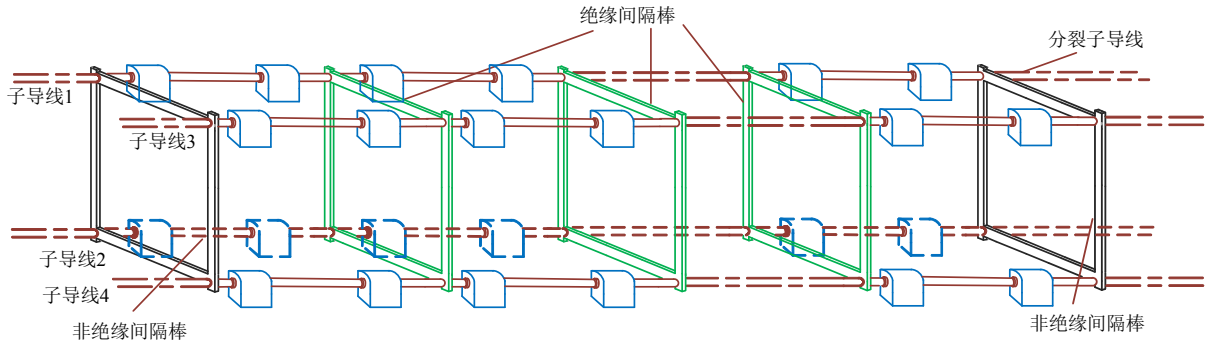


图2 分段融冰示意

Fig. 2 Schematic of segmented ice melting

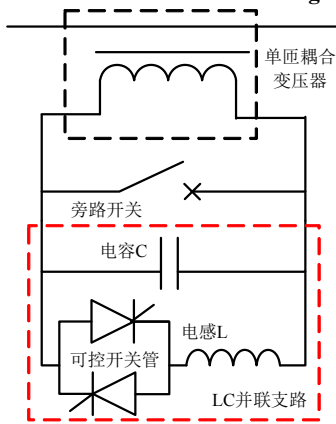


图3 融冰装置拓扑

Fig. 3 Topology diagram of ice melting device

电流值；在不需融冰时，旁路开关闭合，将 LC 并联支路退出。

2 多融冰装置协调控制策略

当线路上的融冰装置工作时，由于各子导线的等效阻抗在依据融冰电流的需要而发生变化，线路阻抗的变化将对该线路的潮流大小产生影响。为了不影响电力线路的正常电力输送，不改变负荷电流的大小，保障线路的正常供电，必须研究一定的协调控制策略，使被融冰线路段的对外等效阻抗不变。

为了说明方便，本文将图2等效成图4。

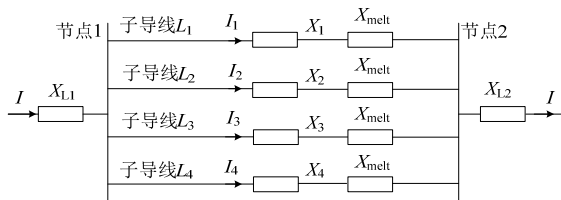


图4 四分裂被融冰线路段等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of four-split ice-melting line segment

被绝缘棒支撑的被融冰线路段为节点1与节点2之间的等效阻抗；节点1与节点2之间相互并联的4个阻抗 X_{melt} (假设所有子导线阻抗完全相同)为

被融冰段内的4根子导线等效电抗； X_{L1} 与 X_{L2} 为非融冰段线路4根分裂子导线的并联的等效阻抗； I 为该相线路4根分裂子导线的电流之和，同时也是负荷电流； I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 分别为4根分裂子导线中流过的电流； X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为各分裂子导线上融冰装置的等效输出阻抗。

设 n 为融冰子导线的分流比，则融冰电流 I_{melt} 与负荷电流 I 的关系为

$$n = I_{melt} / I \tag{1}$$

当子导线1进行融冰时，为实现不影响正常电力输送的非停电融冰，必须保证负荷电流保持不变。因此，要使子导线1上的电流达到融冰所需的电流值，且要使被融冰段线路对外等效阻抗不变，必须协调控制各子导线上融冰装置的出力，使各融冰装置的等效输出阻抗满足如下关系：

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1/(X_{melt} + X_1)}{\frac{1}{X_{melt} + X_1} + \frac{1}{X_{melt} + X_2} + \frac{1}{X_{melt} + X_3} + \frac{1}{X_{melt} + X_4}} &= n \\ \frac{1}{X_{melt} + X_1} + \frac{1}{X_{melt} + X_2} + \frac{1}{X_{melt} + X_3} + \frac{1}{X_{melt} + X_4} &= \frac{1}{X_{melt} / 4} \end{aligned} \right. \tag{2}$$

设 X_a 为融冰子导线(子导线1)上融冰装置的输出阻抗，即， $X_1 = X_a$ ；设 X_b 为非融冰子导线(子导线2、3、4)上融冰装置的输出阻抗，即， $X_2 = X_3 = X_4 = X_b$ 。

一般情况下，分裂子导线的阻抗是对称的，则，可得融冰子导线的分流比为： $n=0.25$ 。

为了使子导线电流满足融冰需求，融冰子导线的分流比 n 需要增大，但又要使被融冰段对外的等效阻抗保持不变，则在 $X_a \leq 0$ 时，必须使 $X_b \geq 0$ 。

3 实例分析

3.1 融冰装置出力计算

某500kV输电线路全长均约为170km，跨越了

多个县域，中间包含了高山大岭、山地、丘陵、平地以及泥沼等地理环境，全线海拔高程为 116.3~1174.86m。为加强线路对冰灾的防范能力，使输电线路能应对最大风速为 3m/s、最低气温为 -5℃、最高气温 40℃、覆冰程度为 10mm 的气象条件，本文将以该地区的 GJL630/45 四分裂导线为例开展基于本融冰装置与协调控制策略的在线融冰分析，为其线路改造做理论准备。现引入该环境下 GJL630/45 四分裂导线的典型融冰数据进行计算，即线路额定电流 $I=3000\text{A}$ ，子导线固有阻抗 $X_{\text{melt}}=46\Omega$ ，融冰长度为 170km。

依据《架空线路电流融冰技术导则》^[21]，计算出该环境下导线的最大融冰电流为 1843.18A、最小融冰电流为 839.36A，融冰电流应在最小融冰电流和最大融冰电流之间选取，为了确保本融冰方法在重度覆冰情况下有效性，融冰电流的选取应接近最大融冰电流，故本算例按融冰电流为 1398.6A 进行出力计算与参数配置。

此外该导线于可查最严重覆冰情况(风速 5m/s，气温 -5℃，覆冰厚度为 25mm)下的最大融冰电流为 2231.01A、最小融冰电流为 964.76A，选取的该融冰电流值仍能满足融冰要求，且该电流值对于融冰子导线可调节电流范围仍有较大提升裕度，故本融冰方法在重度覆冰情况下依然是可行的。

依据本协调控制策略，为了保证融冰段对外等效阻抗不变，

首先联立求解约束关系式(1)与式(2)，可得

$$\begin{cases} X_a = \frac{I - 4I_{\text{melt}}}{4I_{\text{melt}}} X_{\text{melt}} \\ X_b = \frac{4I_{\text{melt}} - I}{4(I - I_{\text{melt}})} X_{\text{melt}} \end{cases} \quad (3)$$

再代入系统数据计算得 $X_a = -21.33\Omega$ ， $X_b = 18.63\Omega$ 。据此方案调控各融冰装置出力，便可实现融冰时对线路潮流无影响。

同时于装置设计的角度，考虑到单一融冰设备的容量、体积、重量等限制，在实际运行中，每两根线路杆塔之间应分布式安装一组融冰装置子单元。假设本线路平均档距 454m，170km 共有 377 档，则每根子导线上所需融冰装置应有 377 个融冰装置子单元。上述输出阻抗应平均分配于每档的融冰装置子单元上，即融冰子导线与非融冰子导线上每一融冰装置子单元分别输出 $X_a^* = -0.0566\Omega$ ， $X_b^* = 0.0494\Omega$ 。

3.2 融冰装置参数配置

为研究融冰装置子单元阻抗输出能力，使其满足本文所提协调控制策略下对等效阻抗调节能力的要求，下面讨论其参数设定。

图 3 所示融冰装置的 LC 并联控保支路等效阻抗可表示为

$$X_{\text{LC}} = \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{2 \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} (\lambda \tan \lambda \beta - \tan \beta) - \beta - \frac{\sin \beta}{2} \right] \right\} \left(-\frac{1}{\omega C} \right) \quad (4)$$

式中： $\beta = \pi - \alpha$ ； $\lambda = \omega_0 / \omega$ ； $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

由式(4)可知，当触发延迟角 $\alpha=0$ 时，该控保支路输出最小感性阻抗，即 $X_{\text{LC}(0)} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$ ；当触

发延迟角 $\alpha=180^\circ$ 时，该控保支路输出最小容性阻抗，即 $X_{\text{LC}(180^\circ)} = -X_C$ 。

考虑到融冰装置子单元的输出阻抗调节范围应覆盖 X_a 与 X_b 且应有一定阻抗裕度，电力系统中大电感的制造难度，单匝耦合变压器对二次侧阻抗的变换作用等，本文融冰装置子单元中电感 L 取 1.592mH，电容 C 取 3.183mF，单匝耦合变压器变比为 1:10。此时融冰装置子单元的感性阻抗输出范围是 $[0.01, +\infty)\Omega$ ，容性阻抗输出范围是 $(-\infty, -0.01]\Omega$ 。

基于如此设计的融冰参数，在触发延迟角调整范围内，谐振点仅出现一次，满足融冰装置阻抗输出要求。

各子导线上融冰装置输出电压与使用容量是反映装置设计的技术经济可行性的重要参数，结合式(1)、(2)可得：

各子导线上融冰装置输出电压与使用容量是反映装置设计的技术经济可行性的重要参数，结合式(1)、(2)可得：

$$U_{\text{se1}} = nIX_a = \frac{I - 4I_{\text{melt}}}{4} X_{\text{melt}} \quad (5)$$

$$U_{\text{se2}} = \frac{1-n}{3} IX_b = \frac{4I_{\text{melt}} - I}{12} X_{\text{melt}} \quad (6)$$

$$S_1 = (nI)^2 X_a = \frac{(I - 4I_{\text{melt}})I_{\text{melt}}}{4} X_{\text{melt}} \quad (7)$$

$$S_2 = \left[\frac{(1-n)}{3} I \right]^2 X_b = \frac{(I - I_{\text{melt}})(4I_{\text{melt}} - I)}{36} X_{\text{melt}} \quad (8)$$

式中： U_{se1} 、 S_1 分别为融冰子导线上融冰装置的输出电压与使用容量； U_{se2} 、 S_2 分别为非融冰子导线上融冰装置的输出电压与使用容量。

考虑到输电线路在实际运行中其线路电流在额定值附近波动，为了进一步评估融冰装置制造安装的可行性与运行的可靠性，有必要对线路电流波

动范围对应的各子导线融冰装置输出电压与使用容量进行计算分析。

该被研究线路电流大约在 2500A 与 3200A 之间进行变化,对应的各子导线融冰装置输出电压与使用容量计算结果如图 5 所示。

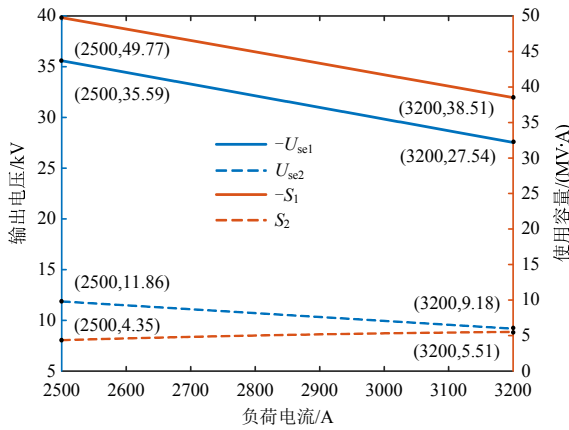


图 5 各子导线融冰装置输出电压与使用容量

Fig. 5 Output voltage and capacity of sub-conductor ice melting device

由图 5 可见,本方案中,融冰子导线上融冰装置的使用容量远远大于非融冰子导线上的,在设计制造融冰装置时满足融冰子导线上的使用容量即可;在负荷电流波动的范围内,各子导线融冰装置输出电压与使用容量随负荷电流呈反向单调变化。

对线路电流取 3 个典型值(最小值、最大值、额定值),分别计算融冰子导线上融冰装置子单元的输出电压与使用容量,计算结果见表 1 所示。

表 1 融冰装置子单元输出电压与使用容量

Table 1 Output voltage and operating capacity of subunit of ice melting device

线路电流/kA	输出电压/V	使用容量/(kV·A)
2500	94.4	132.02
3000	79.1	110.68
3200	73.0	102.15

可以看到,每档每根子导线所需装置容量仅为 110kV·A 左右,装置只需向线路注入 80V 左右的电压,这在装置制造安装过程中都是可行的。

中国电机工程学会发布的现行行业标准 T/CSEE 0061—2017《架空线路电流融冰技术导则》规定:融冰方法和融冰装置应保证在覆冰环境条件下进行有效融冰,宜按照单相导线融冰时间不大于 45min 配置装置容量。下面按照式(9)计算基于本协调控制策略下融冰装置于此覆冰环境所需的融冰时间。

$$T_r = \frac{10g_0db + \frac{0.045g_0D^2}{R_{T0} + R_{T1}}(R_{T1} + 0.22\frac{R_{T0}}{\lg D/d})\Delta t}{I_r^2 R_0 - \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}}} \quad (9)$$

$$R_{T0} = \frac{\lg D/d}{273\lambda} \quad (10)$$

$$\text{雨淞: } R_{T1} = \frac{1}{0.09D + 0.22 + 0.73(vD)^{2/3}} \quad (11)$$

$$\text{雾淞: } R_{T1} = \frac{1}{0.04D + 0.84(vD)^{3/4}} \quad (12)$$

式中: T_r 为融冰时间, h; g_0 为冰的比重,按雨淞取 0.9; d 为导线直径,取 2.8322cm; b 为冰层厚度,取 1cm; D 为导体覆冰后的外径,取 4.9316cm; R_{T0} 为等效冰层传热阻,取 $0.0389^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$; R_{T1} 为对流及辐射等效热阻,取 $0.1975^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$; Δt 为导体温度与外界气温之差,取 8°C ; I_r 为融冰电流,取 1398.6A; R_0 为 0°C 时导线的单位长度电阻,取 $2.7059 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$; λ 为导热系数,按雨淞取 $2.27 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$; v 为风速,取 3m/s。

按式(9)带入上述参数计算得单根子导线融冰时间为 4.0275min,考虑到 4 根子导线交替融冰,得单相导线融冰时间为 16.11min,符合行业标准。

综上,本融冰装置子单元的参数设计如表 2 所示。

表 2 融冰装置子单元参数设计

Table 2 Parameter design of ice melting device sub-unit

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	500	工作频率/Hz	50
输出电压/V	80	使用容量/(kV·A)	110
电感值/mH	1.592	电容值/mF	3.183
变压器变比	1:10	融冰时间/min	16.11

为了进一步减小装置容量,下面讨论融冰子导线上融冰装置的使用容量的影响因素。为了便于分析,其可化简为

$$S_1 = (1 - \frac{1}{4n})I_{\text{melt}}^2 X_{\text{melt}} \quad (13)$$

因为投入运行线路所需的融冰电流为固定值,为了降低装置容量,应减小融冰段线路阻抗 X_{melt} 或减小融冰支路分流比 n ,从而增大干路电流 I 。

3.3 基于 PSCAD/EMTDC 的控制策略仿真分析

为验证所提控制策略的正确性与有效性,本文基于 PSCAD/EMTDC 构建了如图 6 所示的含融冰子装置的四分裂导线单相线路仿真模型,各个元件参数按照 3.1 节和 3.2 节所给出的系统参数和装置

参数进行配置。

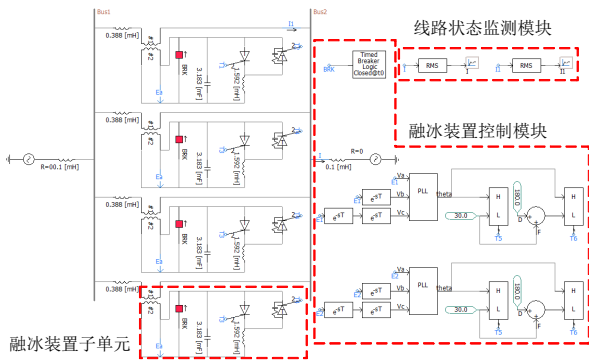


图 6 融冰子装置的四分裂导线单相线路模型

Fig. 6 Single phase line model of four-split conductor in ice melting device

模型中每根分裂子导线上都通过单匝耦合变压器等效串入一组融冰子装置，利用断路器控制其切断与投入运行，设置每个断路器的初始状态为 Close，在仿真进行至第 25s 时断路器动作，即初始状态融冰子装置从线路中被切断，25s 后融冰子装置投入运行，进行线路融冰。

通过示波器，我们监测这个过程中线路负荷电流 I 、融冰子导线 I_1 与非融冰子导线 I_2 的变化如图 7 所示。

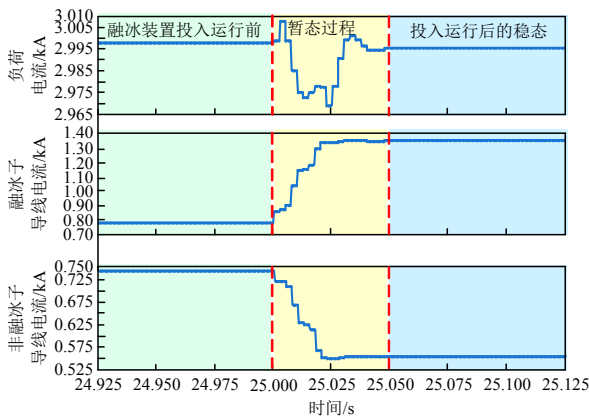


图 7 融冰子装置投入前后线路电流的变化

Fig. 7 Change of line current before and after ice melting device

分析图 7 可知，第 25s 时融冰装置投入运行，线路的负荷电流在经过 0.05s 的暂态过程后仍保持装置投入前的 3000kA，即不影响线路潮流，与此同时，被融冰子导线的运行电流攀升至 1398.6kA 的融冰电流，非融冰子导线的运行电流则相应下降。

因此可知：依据此控制策略调控各融冰装置，可以实现在不改变电力线路正常电力输送、不影响负荷电流的情况下，将被融冰段内非融冰子导线的

电流挪移到融冰子导线上，使各根子导线依次达到融冰电流值，逐次对各根子导线进行融冰。

4 结论

1) 本文提出的非接触耦合式融冰装置，通过单匝耦合变压器分布式卡合的工作方式，具有安装灵活便利、融冰线路改造成本低以及不停电运行的优势。

2) 本文提出的多融冰装置协调控制策略可实现融冰段对外等值阻抗保持不变的特性，从而保证了融冰过程中线路正常供电负荷电流不变。

3) 本文结合工程实例对融冰装置的输出电压、使用容量与融冰时间等重要参数进行了计算与配置：其子单元的输出电压约 80V、使用容量约为 110kV·A、单相导线融冰时间为 16.11min，说明了实际工作中本融冰装置的制造安装的可行性，进一步分析出装置容量的影响因素，为适应不同工作环境指明优化方向。

4) 本文基于 PSCAD/EMTDC 构建了含融冰子装置的四分裂导线单相线路仿真模型，通过监测融冰装置投入运行前后的线路电流，发现它能够使融冰子导线提升 86.48%至融冰电流，同时保持线路负荷电流不变，验证所提控制策略的正确性与有效性。

5) 本文以四分裂导线为对象介绍所提协调控制策略，对于其他分裂数的输电线路本控制策略仍适用。

参考文献

[1] 王勇, 苗虹, 莫思特, 等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 178-187.
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 178-187(in Chinese).

[2] CAÑIZARES C, NATHWANI J, KAMMEN D. Electricity for all: issues, challenges, and solutions for energy-disadvantaged communities [Scanning the Issue] [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(9): 1775-1779.

[3] 赵明曦, 贺博, 冯文韬, 等. 塔-线耦联因素对于覆冰载荷下高压输电塔-线结构体力学性能影响及分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7141-7148.
ZHAO Mingxi, HE Bo, FENG Wentao, et al. Influence

- of coupling factors on mechanical property of high voltage transmission tower-line structure under ice loading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7141-7148(in Chinese).
- [4] 郭伟, 安佳坤, 贺春光, 等. 计及冰灾影响的电力系统韧性评估与提升方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 116-122.
- GUO Wei, AN Jiakun, HE Chunguang, et al. Resilience assessment and improvement method for power system considering the influences of ice disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2021, 33(8): 116-122(in Chinese).
- [5] 舒立春, 戚家浩, 胡琴, 等. 风机叶片电加热除冰及电阻丝布置方式试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3816-3822.
- SHU Lichun, QI Jiahao, HU Qin, et al. Experimental study on de-icing and layout of resistance wire by electrical heating for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3816-3822 (in Chinese).
- [6] 晏鸣宇, 何宇斌, 艾小猛, 等. 融冰计划与机组组合的协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1467-1474.
- YAN Mingyu, HE Yubin, AI Xiaomeng, et al. Coordinated strategy of de-icing outage scheduling and unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1467-1474 (in Chinese).
- [7] YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1314-1328.
- [8] 焦震, 杜鹏, 汪晓, 等. 500 kV 超高压输电线路负荷交流融冰研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 97-101, 115.
- JIAO Zhen, DU Peng, WANG Xiao, et al. Study on AC Ice melting of 500 kV EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2021, 33(2): 97-101, 115(in Chinese).
- [9] 张韶珍. 方式融冰在韶关电网的应用[J]. 中国新技术新产品, 2016(22): 77-78.
- ZHANG Shaoshen. Application of ice melting in Shaoguan Power Grid[J]. New Technology & New Products of China, 2016(22): 77-78(in Chinese).
- [10] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3349-3355.
- YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. Deicing method and simulation of phase-shifting transformer for on-load transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3349-3355(in Chinese).
- [11] CLOUTIER R, BERGERON A, BROCHU J. On-load network De-Icer specification for a large transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1947-1955.
- [12] 张亚杰, 刘新颜, 刘洪文, 等. 220kV 级单机 24 脉波融冰整流变压器[J]. 变压器, 2017, 54(11): 16-18.
- ZHANG Yajie, LIU Xinyan, LIU Hongwen, et al. 220kV 24 pulse rectifier transformer for melting ice[J]. Transformer, 2017, 54(11): 16-18(in Chinese).
- [13] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 四分裂导线运行电流分组融冰方法与现场试验[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 54-59.
- ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin, et al. De-icing method and field test of four-bundled conductor by loading operating current on grouped sub-conductors[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 54-59(in Chinese).
- [14] 侯雨伸, 王秀丽, 段杰, 等. 考虑系统风险的输电线路除冰优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6101-6108.
- HOU Yushen, WANG Xiuli, DUAN Jie, et al. Transmission lines de-icing optimal scheduling considering system risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6101-6108 (in Chinese).
- [15] PEDDAKAPU K, MOHAMED M R, SULAIMAN M H, et al. Performance analysis of distributed power flow controller with ultra-capacitor for regulating the frequency deviations in restructured power system[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101676.
- [16] TANG Aihong, SHAO Yunlu, XU Qiushi, et al. Study on control method of a distributed power flow controller [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(11): 1617-1623.
- [17] 唐爱红, 高梦露, 黄涌, 等. 协调分布式潮流控制器串并联变流器能量交换的等效模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 30-36.
- TANG Aihong, GAO Menglu, HUANG Yong, et al. Equivalent model of coordinating energy exchange for series and shunt converters in distributed power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 30-36(in Chinese).
- [18] TANG Aihong, LU Zhijian, YANG Huiyuan, et al.

Digital/analog simulation platform for distributed power flow controller based on ADPSS and dSPACE[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 181-189.

- [19] 唐爱红, 翟晓辉, 卢智键, 等. 一种适用于配电网的新分布式潮流控制器拓扑[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3400-3409.

TANG Aihong, ZHAI Xiaohui, LU Zhijian, et al. A novel topology of distributed power flow controller for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3400-3409(in Chinese).

- [20] TANG Aihong, SHAO Yunlu, HUANG Yong, et al. A new topology of the distributed power flow controller and its electromagnetic transient characteristics[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163: 280-287.

- [21] 谭艳军, 王剑, 朱远, 等. 架空线路电流融冰技术导则: T/CSEE 0061—2017[S]. 2018.

TAN Yanjun, WANG Jian, ZHU Yuan, et al. Technical

guidelines for overhead line current deicing: T/CSEE 0061—2017[S]. 2018(in Chinese).



唐爱红

在线出版日期: 2022-04-26。

收稿日期: 2022-01-25。

作者简介:

唐爱红(1969), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电网运行与控制、柔性交直流输电技术的研究工作, tah@whut.edu.cn;

杨熠(1999), 男, 硕士研究生, 主要从事柔性交直流输电技术的研究工作, yangyi_1874.apple@whut.edu.cn;

杨惠源(1991), 男, 博士研究生, 主要从事智能电网运行与控制、柔性交直流输电技术的研究工作, 13703740823@163.com。

(责任编辑 乔宝榆)