

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.014

中压输电线路 1 kHz 高频融冰优化分析

潘一帆, 周羽生, 周文晴, 刘应杰, 黄肖琪
(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要: 中压输电线路冬季覆冰范围广, 由于线路长度较短, 采用直流和工频交流融冰困难, 导致断线、倒杆和冰闪跳闸事故频发。本文提出在中压输电线路采用 1 kHz 高频融冰的方法, 分析了不同高频融冰接线方式、线路分布参数以及无功补偿对融冰效果的影响及其可行性。以 LGJ-240/30 导线为例, 在频率 1 kHz 电流 762 A 作用下, 融冰仿真实验结果表明, 对于较短线路, 在线路长度不超过 36.3 km 时, 融冰时间受分布参数的影响产生的差值小于 1%, 可以忽略不计; 结合 10 kV 线路绝缘耐压水平, 采用频率 1 kHz 的交流融冰适合于供电半径小于 5 km 的短线路, 且应采用三相短路的融冰接线方式和分段串联电容补偿措施, 可满足线路绝缘水平, 有效降低融冰电压和融冰电源的容量。

关键词: 高频激励融冰; 中压输电线路; 介质损耗; 电流趋肤效应; 无功补偿

Optimization Analysis of 1 kHz High Frequency De-icing for Medium Voltage Transmission Lines

PAN Yifan, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, LIU Yingjie, HUANG Xiaoqi

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: Medium voltage transmission lines have a wide ice-coating range in winter which, due to the short length of line, is difficult to use DC and power frequency AC for de-icing and leads to frequent occurrence of such faults as line breakage, ruined tower and tripping because of ice flash. In this paper, the 1 kHz high frequency de-icing method is proposed. The influence and feasibility of different high frequency de-icing wiring methods, the line distribution parameters and the reactive power compensation are analyzed. The LGJ-240/30 wire is taken as an example, under the action of current at 762 A and the frequency at 1 kHz, the de-icing simulation experimental results show that in case of length of wire is no more than 36.3 km, the difference of the de-icing time influenced by the distribution parameters is less than 1% and can be ignored; In combination with the insulation withstanding level of line at 10 kV, the AC de-icing with the frequency at 1 kHz is suitable for the short line with power supply radials less than 5 km. The use of the de-icing wiring method of three phase short circuit and the segmented series capacitive compensation measures can meet the insulation requirement of line, which can reduce effectively the capacity of de-icing voltage and power.

Keywords: high-frequency excitation de-icing; medium voltage transmission lines; dielectric loss; current skin effect; reactive power compensation

0 引言

中压 10 kV 配电网应用广泛^[1], 据统计, 通过中压配电网向用户供给的电能占总供电的 70%~80%。在 10 kV 输电线路中, 导线的主要选择有 JKLYJ (铝芯交联聚乙烯绝缘架空电路) 和 LGJ (铜芯铝绞线)。在多树木或金属灰尘污染较高的老工业区、盐雾地区、雷电较多地区和台风灾害的地

区等, 通常使用 JKLYJ 来确保输电线路传输的安全性和可靠性, 其余大多情况考虑到经济效益, 基本上以 LGJ 为主^[2-3]。根据国家电网公司企业标准《配电网技术导则》的要求, 10 kV 配电网的供电半径一般在 3~15 km。由于线路较短, 导线电阻较小, 采用现有直流或工频交流融冰方法, 所需融冰电流很大。在我国南方地区, 冬季配电网覆冰范围广, 融冰困难, 导致线路断线、倒杆、冰闪跳闸事故频发。因

收稿日期: 2023-11-08

此探索新型配电网融冰方法具有重要意义。

目前配电网防冰技术主要有机械除冰法、电热融冰法、化学涂层防冰等,其中电热融冰法得到广泛运用^[4]。电热融冰分为直流短路融冰法、工频交流短路融冰法和高频融冰。由于高频电流具有趋肤效应的特性,从而使导线等效电阻增大,而且覆冰在高频电场的作用下产生介质热损耗,因此采用高频融冰方法具有热效率高的优越性。近年来,随着电力电子技术的发展,有关高频融冰的研究取得了一定的进步^[5-10],文献[10]研究了一种大功率高频融冰电源,电源采用AC-DC-AC及级联方法。文献[11]提出了一种基于LC振荡放电的电压方波可获得所需的高频融冰电流波形。

针对中压输电线路长度较短,现有直流和工频交流融冰困难的问题,提出在中压输电线路采用高频融冰方法。通过对融冰接线方式、导线分布参数和无功补偿对融冰效果的影响进行仿真实验,得到采用两相串联短路融冰的接线方式所需融冰时间最短;导线在45 km时融冰首末位置融冰时间差距在5%,导线长度小于36.3 km时,首末位置融冰时间差距约为1%,故在距离更短时,对时间的影响可以忽略不计;在融冰电流有效值相同的条件下,采用无功补偿可有效减少融冰时间、提高融冰效果。

1 高频融冰原理

1.1 趋肤效应

在导体内通入高频交流电或者在交变电磁场下,电流会在导体内部产生趋肤效应。趋肤效应中的趋肤深度 δ 为^[12]

$$\delta = \sqrt{\frac{2k}{\omega\mu\gamma}} \quad (1)$$

式中: δ 为趋肤深度,mm; k 为电导率温度系数; ω 为角频率,rad/s; μ 为导体磁导率,H/m; γ 为导体电导率,S/m。在趋肤效应的作用下,导线的阻抗呈现出表面阻抗现象,当导体半径 r_w 远大于 δ 时(由材质的衰减常数而定,一般为5倍),表面阻抗 Z_0 计算公式为

$$Z_0 = \frac{l}{2\pi r_w \delta \gamma} + j \frac{l}{2\pi r_w \delta \gamma} \quad (2)$$

式中: l 为导线长度; γ 为导线电导率。在 r_w 未达到 δ 5倍以上时,表面阻抗 Z^* 的公式为

$$Z^* = \frac{l}{[\pi r_w^2 - \pi(r_w - \delta)^2]\gamma} + j \frac{l}{[\pi r_w^2 - \pi(r_w - \delta)^2]} \quad (3)$$

1.2 介质损耗热

冰是一种电介质,在高频电场的影响下,覆冰

在极化作用下产生极化损耗,其电功率 P 公式为^[13]

$$P = 0.566/E^2 \varepsilon_r \tan \varphi_r \times 10^{-12} \text{ (W/cm}^3\text{)} \quad (4)$$

产生热量 Q 公式为

$$Q = 1.33f/E^2 \varepsilon_r \tan \varphi_r \times 10^{-13} \text{ (W/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

式中: φ_r 为覆冰冰层的介质损耗角; f 为高频融冰电源所施加的电场频率,Hz; E 为高频电源所施加的电场强度,V/m; ε_r 为覆冰冰层的相对介电常数。

1.3 高频融冰热平衡原理

基于热平衡原理的融冰时间计算模型^[14],融冰时间 t 为

$$t = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{(I_0^2 - I_c^2)R_0} \quad (6)$$

式中: R_0 为导线的等效融冰电阻, Ω ; I_0 为融冰电源提供的融冰电流,A; I_c 为临界融冰电流,A; Q_1 为冰从温度 T_0 提升到融点零度所需要的热量,J; Q_2 为零度冰变成零度水所吸收的热量,J; Q_3 为融冰过程中尚未融化的冰所吸取的热量,J; Q_4 为加热过程中导线所吸取的热量,J; Q_5 为加热过程中与空气热平衡散发的热量,J。

各热量计算公式为

$$Q_1 = C_i \rho_i A_m (0 - T_0) \quad (7)$$

$$Q_2 = \rho_i L_f A_m \quad (8)$$

$$Q_3 = C_i \rho_i A_i (0.5T_0 - T_i) \quad (9)$$

$$Q_4 = [C_{Al} \rho_{Al} A_{Al} + C_{Cu} \rho_{Cu} A_{Cu}] (0 - T_i) \quad (10)$$

$$Q_5 = 2\pi r_s [\varepsilon_{ra} \sigma_{ra} (T_0 + 273.15)^4 - (T_i + 273.15)^4] + h_i (T_0 - T_i) \quad (11)$$

式中: C_i 、 C_{Al} 、 C_{Cu} 分别为水、铝和铜的比热容,J/(kg·K); ρ_i 、 ρ_{Al} 、 ρ_{Cu} 分别为水、铝和铜的密度,kg/m³。 A_m 为覆冰的体积,m³; r_s 为覆冰导线的总半径,m; L_f 为冰的相变潜热,335 kJ/kg; T_i 为环境温度; ε_{ra} 的数值为0.8,为覆冰表面辐射系数; σ_{ra} 为辐射常数 5.67×10^{-8} W/(m²·°C); h_i 为环境与外冰层的热交换系数,公式为

$$h_i = \frac{\lambda_a (N_{u1} + N_{u2})}{2r_s} + 4\varepsilon_{ra} \sigma_{ra} (T_i + 273.15)^3 \quad (12)$$

$$N_{u1} = B(G_r P_r)^b \quad (13)$$

$$N_{u2} = CR_e^n P_r^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$P_r = \mu_a \frac{C_a}{\lambda_a} \quad (15)$$

$$G_r = \frac{g(T_0 - T_i) 8r_s^3}{v_a^2 [(T_0 + T_i)/2 + 273.15]} \quad (16)$$

$$R_e = \frac{2v_s \rho_a r_s}{\mu_a} \quad (17)$$

式中： λ_a 为空气导热系数； ν_a 为空气黏度系数； N_{u1} 和 N_{u2} 为覆冰导线的自然和强制对流 Nusselt 系数； G_r 、 P_r 、 R_e 分别为 Grashof 系数、Prandlt 系数和 Reynolds 系数； B 、 b 是在 G_r 系数决定下的参数条件，为 0.48 和 0.25； μ_a 为空气运动粘滞系数为 1.75×10^{-5} ， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ； g 为重力加速度， m/s ； C_a 为空气比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ； v_s 为环境的风速， m/s ； C 、 n 的取值与 Reynolds 系数有关，取值范围见表 1。

表1 C 、 n 取值范围

Table 1 C 、 n value taking range

R_e 范围	C	n
$40\leq R_e\leq 4\,000$	0.683	0.468
$4\,000\leq R_e\leq 40\,000$	0.193	0.618
$40\,000\leq R_e\leq 400\,000$	0.027	0.805

根据文献[15]，临界融冰电流 I_c 公式为

$$I_c=3.735\sqrt{\frac{-T_0}{R_0\ln(r_s/r_w)}}\tag{18}$$

式中： T_0 为融冰开始时覆冰的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R_0 为覆冰导线等效电阻， Ω ； r_s 为覆冰导线整体半径， m ； r_w 为覆冰导线中导线半径， m 。在整个融冰过程中，产生的总热量为焦耳热与介质损耗热之和，根据公式(5)产生的热量总和 Q_s 公式

$$Q_s=I_0^2R_0+1.33/E^2\varepsilon_f\pi(r_s^2-r_w^2)\tan\varphi\times10^{-7}\tag{19}$$

同时结合公式(7)–(11)和电热平衡原理，达到临界融冰时， Q_s 应该与融冰所需热量 Q_R 相等，即

$$Q_s=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5=Q_R\tag{20}$$

1.4 高频融冰与直流融冰的效果比较

对同一导线分别进行高频融冰和直流融冰。以 LGJ-240/30 为例，导线截面积为 275.96 mm^2 ，在气象参数(见表 2)的情况下，进行融冰时间计算。

表2 气象参数

Table 2 Meteorological parameters

参数	数值
冰的密度/ (kg/m^3)	900
空气黏度系数/ (m^2/s)	1.35×10^{-5}
空气导热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}))$	2.42×10^{-2}
冰的熔化热/ (J/kg)	3.35×10^5
覆冰厚度/ mm	10
气温/ $^{\circ}\text{C}$	-3
风速/ (m/s)	1
修正系数	1.1~1.2

导线的等效融冰电阻为 $0.107\,1\,\Omega/\text{km}$ ，计算得到，在当前环境下所需要的融冰热量 $Q_{\text{R1}}=1.520\,4\times10^{10}\text{ J}$ 。使用 1 kHz 融冰电源，通过高频融冰激励源

得到电流有效值为 682 A 的融冰电流。高频融冰时间 t_1 图见图 1。图 1 利用电磁热分析软件 ANSYS 仿真计算表明，因趋肤效应，热量从导线深度为 2.575 mm 位置散发，在时间 $t_1=2\,233.02\text{ s}$ 时，覆冰层最外层温度超过 0°C ，覆冰层完全融化，完成融冰。

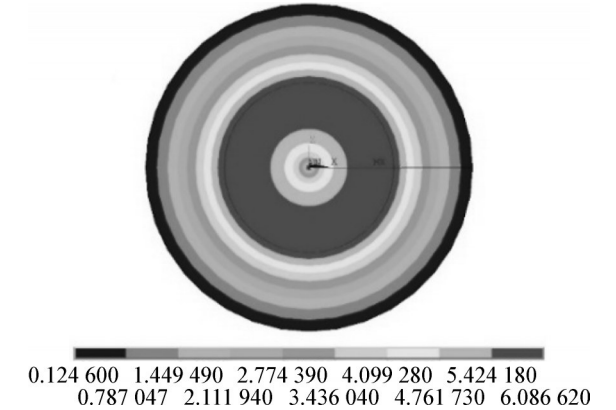


图1 高频融冰时间 t_1 图
Fig. 1 Diagram at high-frequency de-icing time t_1

如果采用直流融冰，直流融冰时间计算公式为^[16-17]

$$t=\frac{\int_v\rho_iL_f\text{d}V+\sum_{k=1}^4\int_{\theta_k}^{\theta_k'}\rho_{\theta_k}C_{\theta_k}T_{\theta_k}\text{d}t\text{d}v}{I_{\text{dc}}^2R_w-\pi r_sh_i(T_i-T_0)}\tag{21}$$

式中： v_m 为覆冰的体积， m^3 ； ρ_i 为覆冰的密度， kg/m^3 ； L_f 为冰的相变潜热， kJ/kg ； ρ_{θ_k} 为 θ_k 区域的密度， kg/m^3 ； C_{θ_k} 为 θ_k 区域的比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； T_{θ_k} 表示 θ_k 区域的起始温度， $^{\circ}\text{C}$ ； I_{dc} 为直流融冰电源的电流， A ； R_w 是导体电阻率， $\Omega\cdot\text{m}$ ； r_s 为覆冰导线总半径， m ； h_i 为环境热交换系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； T_i 为环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_0 是融冰起始温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

在同样的气候参数下，通入与高频电流有效值相同的直流电流。直流融冰时间 t_2 图见图 2。图 2 仿真计算表明在 $t_2=3\,636.13\text{ s}$ 时，覆冰层最外层温度超过 0°C ，覆冰层完全融化，融冰完成。

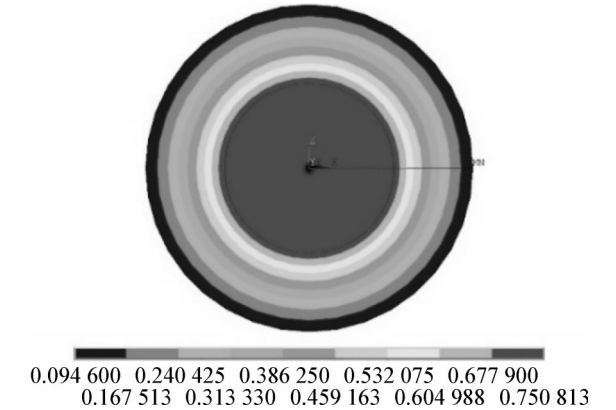


图2 直流融冰时间 t_2 图
Fig. 2 Diagram at DC de-icing time t_2

可见在相同参数条件下,融冰电流大小相近,高频融冰相较于直流融冰,能有效减少融冰时间近40%,即可有效减少电网因融冰而需的停电时间。

2 高频融冰接线方式与效果分析

10 kV 输电线路在市中心区域供电半径不宜超过 3 km,城镇区域与农村地区不宜超过 15 km,分别针对析 3 km 和 15 km 两种线路融冰情况进行分析。

2.1 融冰电源接入方式对融冰的影响

在短路融冰中,线路的接线方式分为三相短路方式和单相短路方式两种,融冰电源可以分为固定式和移动式两种,分别由变压器的低压侧或大功率发电机供电,通过高频融冰激励源产生所需要的高频融冰电流。针对融冰电源接入的位置,以及线路的融冰接线方式对融冰效果影响进行分析。

在中压输电线路中,输电导线长度相对较短,在误差较小的情况下可以将导线参数简化,对覆冰线路的参数模型进行简化^[18],建立覆冰线路等效参数模型见图 3。

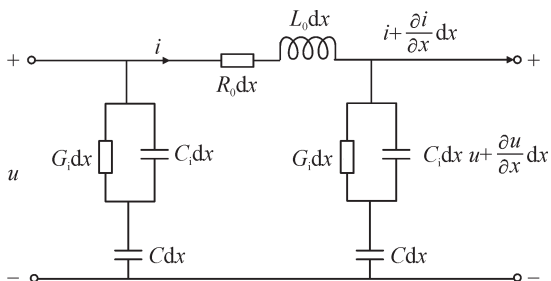


图3 覆冰线路等效参数模型

Fig. 3 Equivalent parameters model of ice-coating lines

图中: R_0 为导线的等效电阻, Ω ; L_0 为导线对地等效电感, H; G_i 为覆冰导线的等效电导, S; C_i 是导线表面对覆冰外表面的等效电容, F; C 是覆冰外表面对地等效电容, F。

参数计算公式为

$$C = 2\pi\epsilon_0 \left(\ln \frac{2h}{r_w + r_i} \right) \quad (22)$$

$$R_0 = [\gamma \pi r_i (2r_w - \delta)]^{-1} \quad (23)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_w} \quad (24)$$

$$G_i = 2\pi\epsilon_0 \epsilon_r \left(\ln \frac{r_w + r_i}{r_w} \right)^{-1} \tan \delta \quad (25)$$

$$C_i = 2\pi\epsilon_0 \epsilon_r \left(\ln \frac{r_w + r_i}{r_w} \right)^{-1} \quad (26)$$

式中: ϵ_0 为覆冰的静电力参数, $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$; r_w 为覆冰

导线中导线半径, m; r_i 为覆冰厚度, m; h 为覆冰导线对地面的垂直距离, m; γ 是输电导线的电导率, S/m; δ 为趋肤效应的趋肤深度, m; μ_0 为真空磁导率, H/m; ϵ_r 为覆冰的相对介电常数, F/m; $\tan \delta$ 为覆冰介质损耗角的正切值。

在工程运用中,高频融冰电源接入后,融冰回路构成的接线方式可分为 3 种:三相短路接线、两相串联短路接线、中段并联电源的三相串联接线。

三相短路接线方式如图 4 所示,在线路末端将三相短路连接,将线路首段两相进行并联(例 A、B 两相并联),再与第三相(例 C 相)进行串联融冰电源。

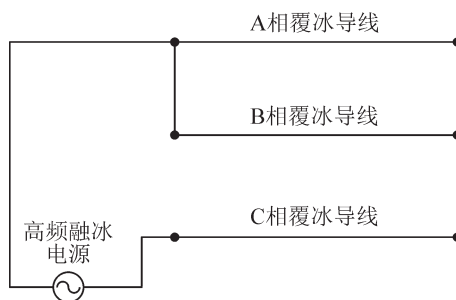


图4 三相短路融冰接线图

Fig. 4 Wiring diagram of three-phase short-circuit de-icing

在 A、B 相分流的情况下,若总电流太小,导致分流后的单相电流无法达到临界融冰电流,如增大融冰电流,则可能使得 C 相电流过载。线路总融冰时间将以 A、B 两相的融冰时间为参考值。

两相串联短路接线方式如图 5 所示,将两相进行串联短路连接构成融冰回路,在完成的其中两相融冰后,对第三相进行重复融冰操作。相较于三相短路融冰接线,在电源容量相同条件下,线路融冰的总时间为两次融冰时间之和。

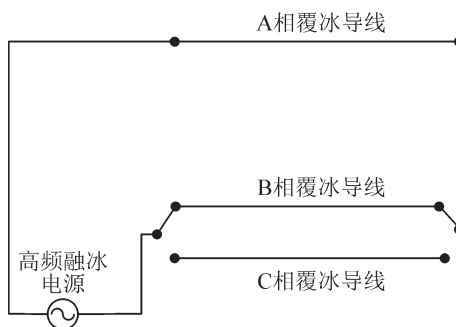


图5 两相串联短路融冰接线图

Fig. 5 Wiring diagram of two-phase series short-circuit de-icing

中段并联电源的接线方式如图 6 所示,将两相线路串联后在中端并联接入融冰电源,在融冰完成

后,在对另一相重复操作。此种方式因分流作用需增大融冰电流。

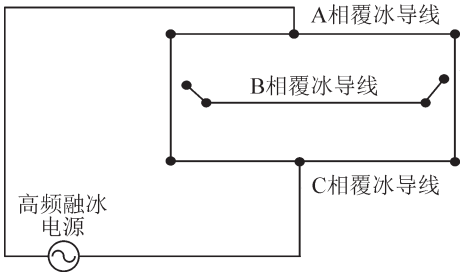


图6 中端并联融冰电源的融冰接线图
Fig. 6 De-icing wiring diagram of the middle parallel de-icing

以 LGJ-240/30 为例,导线截面积为 275.96 mm²,在气象参数为表 2 所示的条件下,导线的直流等效电阻为 0.107 1 Ω/km,使用 1 kHz 融冰电源,通入容量为 8 000 kVA 的高频融冰激励电源,由公式(6)计算得到上述 3 种融冰接线方式的所需融冰时间,见表 3。

表3 3种接线方式的融冰时间			
融冰接线方式	三相短路融冰	两相串联短路融冰	中段并联电源的融冰
融冰所需时间	4 046.73 s	2 598.5 s	2 653.21 s

通过 Ansys 分别对上述 3 种融冰方式进行仿真分析,结果见图 7-9。从图 7 可知,以三相短路接线方式融冰,覆冰线路在 4 046.73 s 时覆冰层最外层温度超过 0 度,覆冰完全融化;由图 8 可知,以两相串联短路接线方式融冰,覆冰线路在 2 598.5 s 时覆冰层最外层温度超过 0 度,覆冰完全融化;从图 9 可知,以中端并联融冰电源的方式融冰,覆冰线路在 2 653.21 s 时覆冰层最外层温度超过 0 度,覆冰完全融化。

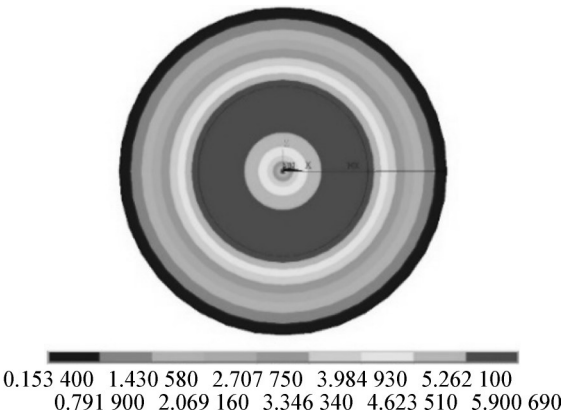


图7 三相短路融冰效果图
Fig. 7 Effect diagram of the three-phase short-circuit de-icing

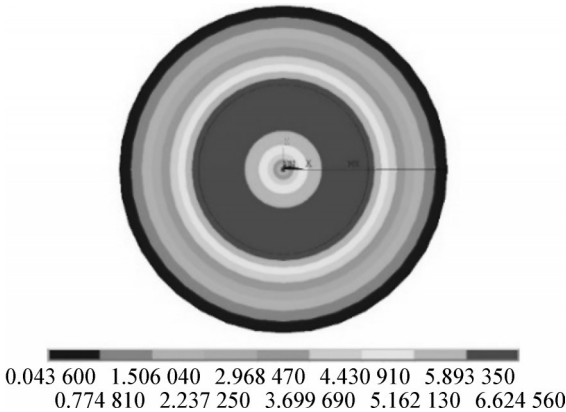


图8 两相串联短路融冰效果图
Fig. 8 Effect diagram of the two-phase series short-circuit de-icing

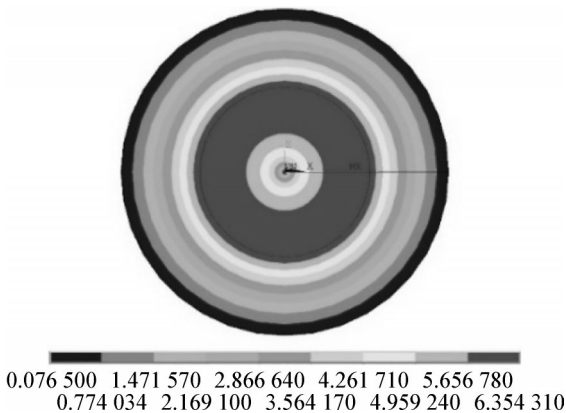


图9 中端接入融冰电源的三相串联短路融冰效果图
Fig. 9 Effect diagram of the three-phase series short-circuit de-icing with access of middle end to the de-icing power

可见两相串联短路融冰相较于三相短路融冰方式能显著缩短融冰时间 36%,高频融冰电源可由电站变压器供电,因此采用两相串联短路融冰方式时操作简单。中端并联融冰电源的融冰方式需要移动式电源,操作难度大,且对线路融冰时间影响较小。因此在中压配电网中,两相串联短路融冰接线方式为最优融冰接线方式。

2.2 线路首末端融冰时间的差异

图 3 的覆冰模型,采用了简化等效参数。对于实际覆冰线路,电磁参数沿线分布,在直流稳态的情况下,电容与电感不产生影响,分布参数问题可忽略不计^[19]。

但在交流状态下,尤其在高频下,分布参数问题不能忽略。在高频下,电磁波的工作波长 λ 公式为

$$\lambda = \frac{v}{f} = vT$$

(27)

式中: v 为波速, m/s; f 为工作频率, Hz; T 为周期, s。只有当覆冰导线的线长 $l \ll \lambda$ 时,可以把整条导线视为一个整体,否则需要对线路进行分布参数模型

研究。其中 v 取值为真空光速 3×10^8 m/s。当使用 1 kHz 的高频融冰电源时,工作波长 λ 为 300 km。对于中压输电线路,融冰线路构成的回路中,线路长度范围由 6 km 到 45 km。最长范围内属于 0.15 个波长内,可能产生的变化幅度见图 10。

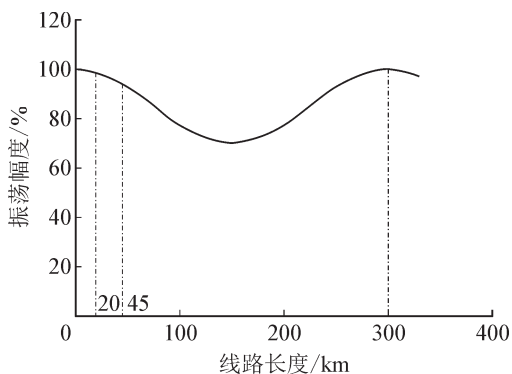


图 10 分布式参数模型的振荡幅度
Table 10 Oscillation amplitude of distributed parametric model

设高频融冰电源功率为 1 600 kW,功率因素为 0.9,对于沿线的电压和电流公式为

$$u(x, t) = \operatorname{Re}[\sqrt{2} U(x) e^{j\omega t}] \quad (28)$$

$$i(x, t) = \operatorname{Re}[\sqrt{2} I(x) e^{j\omega t}] \quad (29)$$

对函数进行简写,得常系数二阶线性微分方程为

$$\begin{cases} U = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ I = B_1 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x} \end{cases} \quad (30)$$

当已知传输线路始端电压 U_1 和电流 I_1 ,以始端作为计算距离的 x 的起点时,可以解得

$$\begin{cases} U = \frac{1}{2}(U_1 + Z_c I_1) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(U_1 - Z_c I_1) e^{\gamma x} \\ I = \frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{Z_c} + I_1\right) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{Z_c} - I_1\right) e^{\gamma x} \end{cases} \quad (31)$$

利用双曲线函数

$$\begin{cases} \cosh(\gamma x) = \frac{1}{2}(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) \\ \sinh(\gamma x) = \frac{1}{2}(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) \end{cases} \quad (32)$$

在中压输电线路的融冰过程中,因线路电感和电容的影响,接入融冰电源的始端电压 U_1 和电流 I_1 与末端电压 U 、末端电流 I 产生差值,对不同距离计算得到结果见图 11。

45 km 线路末端融冰效果衰减,线路首末端融冰时间差值约为 4.59%,因此在工程应用中整条线路完全融冰时间应长于集中参数理论计算时间 5%。导线长度为 36.3 km 时,首末位置融冰时间差距等于 1%,在距离更短,分布式参数模型对完全融

冰时间的影响将更小,可以忽略不计。

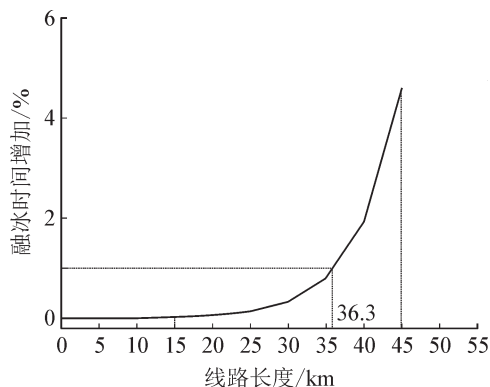


图 11 线路长度对融冰时间的影响
Table 11 Effect of length of line on de-icing time

3 高频融冰的无功补偿

采用高频融冰,线路电感和电容难免会产生无功损耗,因此无功补偿会对融冰效果产生影响。为了节约设备的容量、降低损耗,选择在高频融冰电源中接入无功补偿装置。

3.1 无功补偿对融冰时间的影响

无功补偿容量公式为^[20]

$$\begin{aligned} Q_B &= P_c (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \\ &= P_c \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \end{aligned} \quad (33)$$

式中: P_c 为电源有功功率, W; φ_1 和 φ_2 分别为补偿前后的功率因数角,设高频融冰电源的频率为 1 kHz,要求补偿后电源功率因数在 0.9~0.95, P_c 为 1 600 kW,则无功补偿容量为 1 584.8 kvar~3 416.049 kvar 之间。

选取 0.95 为预期补偿后的电源功率因数,在表 2 的气候条件下,采用无功补偿装置前后的融冰效果如图 12 和图 13 所示。

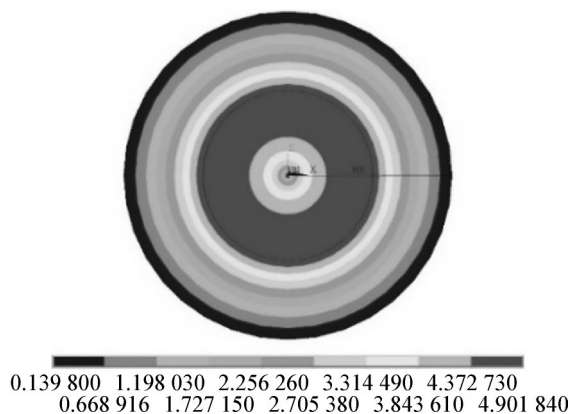


图 12 不接入无功补偿装置的融冰效果
Fig. 12 De-icing effect without access to reactive power compensation device

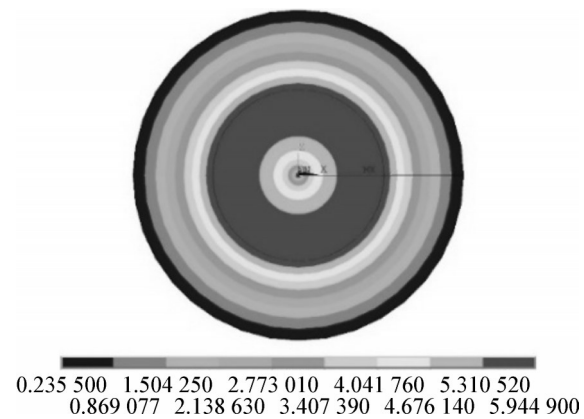


图13 接入无功补偿装置的融冰效果
Fig. 13 De-icing effect with access to reactive power compensation device

图 12 显示在不接入无功补偿装置的情况下，融冰时间为 3 537.58 s，图 13 显示在接入无功补偿装置的情况下，融冰时间为 2 404.15 s。可见同等条件下融冰时间减少约为 30%。

3.2 串联电容补偿对融冰电压的影响

在交流融冰的情况下，串联电容的容抗电压对线路感抗电压具有补偿作用，选择合适的补偿度，可以降低融冰电压，从而减少融冰电源容量。根据国家电网公司企业标准《配电网技术导则》(Q/GDW 10370-2016)对线路输电半径的要求，原则上规划 A+、A、B 类地区供电半径不超过 3 km，C 类不超过 5 km，D 类不超过 15 km，在考虑中压输电线路接入融冰电源需构成回路的情况下，对 LGJ-240 型导线，在 1 kHz 融冰电流为 762 A，由式 (22)–(26) 计算得到不同融冰接线方式和有无串联补偿电容情况下的融冰电源电压和容量，分别见表 4–5 所示。

表4 无补偿情况下电源电压与容量
Table 4 Power voltage and capacity without compensation

输电半径 (融冰线路长度)	两线串联短路融冰	三相短路融冰
3 km(6 km)	34.47 kV/	25.86 kV/
	26 269.2 kVA	19 706.2 kVA
5 km(10 km)	62.39 kV/	43.15 kV/
	47 547.5 kVA	32 878.5 kVA
10 km(20 km)	115.22 kV/	86.68 kV/
	87 798.0 kVA	66 053.1 kVA
15 km(30 km)	172.83 kV/	129.78 kV/
	131 699.9 kVA	98 891.0 kVA

补偿度对融冰电压的影响结果见图 14。可见，采用 90% 以上的补偿度，具有良好的降低线路融冰电压效果，有效降低融冰电源的容量。

表5 90% 补偿情况下电源电压与容量
Table 5 Voltage and capacity with 90% compensation

输电半径 (融冰线路长度)	两线串联 短路融冰	三相短路融冰
3 km(6 km)	3.53 kV/	2.65 kV/
	2 691.8 kVA	2 019.3 kVA
5 km(10 km)	6.37 kV/	4.42 kV/
	4 854.4 kVA	3 368.5 kVA
10 km(20 km)	11.81 kV/	8.88 kV/
	8 995.5 kVA	6 764.9 kVA
15 km(30 km)	17.70 kV/	13.29 kV/
	13 490.3 kVA	10 127.5 kVA

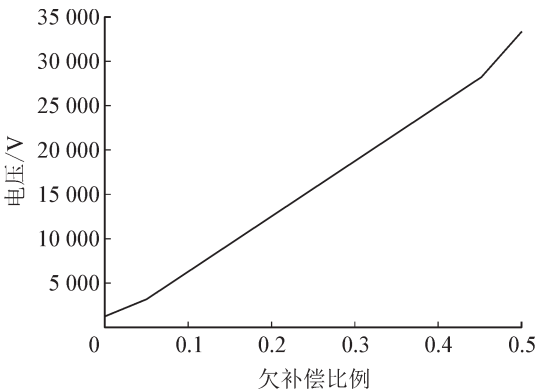


图14 电压与欠补偿关系图
Fig. 14 Relationship diagram between voltage and under compensation

LGJ-240 输电线路允许的工作电压最高为 11.5 kV，绝缘耐电为 28 kV。由表 4 和表 5 的计算结果表明，对于供电半径小于 5 km 的线路，采用三相短路融冰方式，且在电源端和在线路短路端串联电容进行分段补偿，可有效降低融冰电压及融冰电源容量，且满足线路绝缘水平。对于供电半径 15 km 的 D 类地区线路，应当降低融冰电流的频率。

4 结语

- 1)由于中压输电线路较短，在融冰电流大小相同的条件下，1 kHz 高频电流融冰比直流融冰具有显著融冰时间优势，且采用两相串联短路高频融冰接线方式具有操作简单，线路融冰时间最短的特点。
- 2)由于线路分布参数的影响，线路始端与末端的电压和电流产生差异，差异的幅度与频率有关。采用 1 kHz 高频交流融冰，当融冰线路长度小于 36.3 km 时，覆冰线路首末位置融冰时间差小于 1%，分布式参数对融冰时间的影响小。
- 3)受 10 kV 线路绝缘耐压水平限制，对于供电半径小于 5 km 的线路，采用三相短路融冰方式，且在电源端和在线路短路端串联电容进行分段补偿，可有效降低融冰电压及融冰电源容量，且满足线路

绝缘水平。对于供电半径15 km的D类地区线路,应当降低融冰电流的频率,其采用交流融冰的合适频率将在后续研究中做进一步分析。

参考文献

- [1] 杨文锋,王彬宇,程卓,等.城市中低压配电网降损规划决策方法[J].电网技术,2014,38(9):2598-2604.
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium- and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [2] 熊信银.电气工程概论[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 陈维江,蔡国雄.10 kV配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J].电网技术,2004,28(24):56-60.
CHEN Weijiang, CAI Guoxiong. Neutral grounding mode in 10 kV distribution network via peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60.
- [4] BAI Yunqing, ZHOU Kongjun, ZHENG Ke. The research of DC deicing technology in power line[C]//2006 International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2006: 1-7.
- [5] 巢亚锋,岳一石,王成,等.输电线路融冰、除冰技术研究综述[J].高压电器,2016,52(11):1-9.
CHAO Yafeng, YUE Yishi, WANG Cheng, et al. De-icing techniques for ice-covered transmission lines: a review[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 1-9.
- [6] 刘顺新,罗浩东,邓小磊.架空输电线路除冰技术分析[J].高压电器,2011,47(3):72-76.
LIU Shunxin, LUO Haodong, DENG Xiaolei. Analysis of deicing methods for overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 72-76.
- [7] 李再华,白晓民.电网覆冰防治方法和研究进展[J].电网技术,2008,32(4):7-13.
LI Zaihua, BAI Xiaomin. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [8] SULLIVAN C R, PETRENKO V F, MCCURDY J D, et al. Breaking the ice: de-icing power transmission lines with high-frequency, high-voltage excitation[J]. IEEE Industry Applications, 2003, 9(5): 49-54.
- [9] 李宁,周羽生.应用有限元法分析覆冰输电线路高频电源除冰方法[J].高压电器,2010,46(12):107-109.
LI Ning, ZHOU Yusheng. Analysis on transmission line icing elimination method by high frequency source[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 107-109.
- [10] 代洲,马晓红.输电线路高频融冰大功率激励电源设计与控制方法[J].南方电网技术,2018,12(5):30-36.
DAI Zhou, MA Xiaohong. Design and control solution to high-frequency de-icing large power excitation source for transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5): 30-36.
- [11] 何洋,周羽生,彭志勇,等.一种5 kHz逆变串联型高频激励融冰电源及其控制策略研究[J].电测与仪表,2020,57(18):97-102.
HE Yang, ZHOU Yusheng, PENG Zhiyong, et al. Research on a 5 kHz series inverter high-frequency excitation de-icing power supply and control strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 97-102.
- [12] 戈鲁,赫兹若格鲁 H. 电磁场与电磁波[M].周克定.译.北京:机械工业出版社,2000.
- [13] FLATSCHER M, NEUMAYER M, BRETTNERKLIEBER T, et al. Measurement of complex dielectric material properties of ice using electrical impedance spectroscopy[C]//2016 IEEE Sensors. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-3.
- [14] 朱永灿.架空输电线路覆冰生长模型及其关键参数研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [15] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].第4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [17] SADOV S Y, SHIVAKUMAR P N, FIRSOV D, et al. Mathematical model of ice melting on transmission lines[J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2007, 6(2): 273-286.
- [18] 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.
- [19] 邱关源.电路[M].第5版.北京:高等教育出版社,2006.
- [20] 于永源,杨绮雯.电力系统分析[M].第3版.北京:中国电力出版社,2007.

作者简介:

潘一帆(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电网安全与融冰防灾技术。E-mail:595459296@qq.com。

周羽生(1965—),男,教授,通信作者,主要研究方向为电网安全与融冰防灾技术、风电并网与配电网自动化、高温超导电力技术。

周文晴(1993—),女,博士研究生,主要研究方向为电网安全与5G应用技术等。

刘应杰(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为高温超导电力技术。

黄肖琪(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为新能源并网技术。