

DOI: 10.7667/PSPC180181

# 基于电磁-热耦合场的输电线路高频激励融冰分析与计算

袁肖雷<sup>1</sup>, 周羽生<sup>1</sup>, 王永安<sup>1</sup>, 熊强<sup>1</sup>, 王贤军<sup>1</sup>, 马晓红<sup>2</sup>, 代洲<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;  
2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 覆冰事故是影响架空输电线路安全运行的重要因素。根据架空输电线路高频激励融冰的原理分析, 建立了输电线路电磁-温度场二维有限元分析模型, 确定耦合场的边界条件, 求解得到输电线路内部磁场分布情况。将得到的焦耳热和介质热作为热源直接转化到热场模型中计算分析, 并采用有限元 ANSYS 软件仿真求解出覆冰输电线路温度随施加激励时间的分布情况。此外, 基于此模型通过仿真分析得出不同的外界因素对高频激励融冰时间的影响规律。该研究成果为高频激励融冰技术应用于输电线路融冰提供一定的参考价值。

**关键词:** 输电线路; 高频激励融冰; 耦合场; ANSYS 软件; 高频激励融冰时间

## Analysis and calculation of high-frequency excitation de-icing for transmission lines based on electromagnetic and thermal coupling field

YUAN Xiaolei<sup>1</sup>, ZHOU Yusheng<sup>1</sup>, WANG Yongan<sup>1</sup>, XIONG Qiang<sup>1</sup>, WANG Xianjun<sup>1</sup>, MA Xiaohong<sup>2</sup>, DAI Zhou<sup>2</sup>  
(1. College of Electrical Engineering and Information, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guiyang 550000, China)

**Abstract:** Ice accident is the important factor affecting the safe operation of transmission lines. According to the principle of high-frequency excitation de-icing of overhead transmission lines, a 2D finite element model considering the coupling of electromagnetic field and thermal field of transmission lines is established. Based on the corresponding coupling field boundary conditions, magnetic field and temperature field distributions of transmission lines are obtained and the Joule's heat and Medium's heat, as heat sources, calculated in thermal field analysis is coupled with temperature field. The finite element ANSYS software method is applied to calculate the distribution of the temperature of ice-covered transmission lines with the applied excitation time. Moreover, the influence of different external factors on the time of ice-melting with high-frequency excitation is investigated based on this simulation model. The research results provide a certain reference value for the application of high-frequency excitation deicing technology in transmission lines.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307009).

**Key words:** transmission lines; high-frequency excitation de-icing; coupling field; ANSYS software; high-frequency excitation de-icing time

## 0 引言

输电线路覆冰给世界各国电网安全运行造成了严重的影响<sup>[1]</sup>。美国、加拿大、俄罗斯等国家都曾发生过严重的冰灾事故。2008年初, 我国南方地区因气温低, 发生大范围冰灾, 造成多个电压等级共计 36 740 条输电线路、2018 座变电站、8381 基杆塔停运<sup>[2-6]</sup>。2012年初, 我国南方电网公司的输电

线路严重覆冰, 其中广西和贵州两地的多条输电线路因覆冰出现连续跳闸事故<sup>[7]</sup>。2013年12月末, 四川省西昌市输电线路因覆冰严重, 导致 2 条 500 kV 线路地线断线<sup>[8-9]</sup>。2014年3月, 四川电网 500 kV 输电线路因覆冰在半小时内出现多次跳闸<sup>[10]</sup>。

目前为止, 国内外学者提出了许多防冰和融冰方法, 大致可分为 4 种<sup>[10-15]</sup>: (1) 热力除冰; (2) 机械除冰; (3) 自然除冰; (4) 其他方法。但就目前工程实际应用来看, 采用最多是热力除冰法。热力除冰法包括<sup>[7]</sup>直流短路融冰法、交流短路融冰法、分裂导线循环融冰法、高频高压融冰, 其中直流和交

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51307009); 贵州电网防冰减灾重点实验室研究项目资助(GZ2015-2-0055)

流短路融冰法得到广泛应用,但这种融冰方法需要输电线路停运进行融冰。美国 Dartmouth 学院的 Charles R S 等,主要从集肤效应和介质极化的角度出发,提出了输电线路高频(8~200 kHz)激励融冰的方法<sup>[16]</sup>。由于受到电力电子开关器件频率的限制,国内外对高频融冰的研究极少,并都停留在可行性的分析阶段。

近几年来,随着大功率电力电子器件的发展,为高频融冰技术的应用提供了发展前景,许多专家和学者对高频融冰开展了研究。文献[17]通过 ANSYS 软件仿真得出输电导线温度场分布情况,但是未考虑输电导线电阻率随温度的变化。实际上,在高频激励下输电导线温度场分布的热源主要包括导线电阻损耗和介质(冰)损耗,而电阻损耗与导线的电阻率密切相关,电阻率同导线温度密切相关,由此可见,输电线路高频激励融冰涉及到电磁场和热场之间的耦合过程,为此建立输电线路电磁-热耦合场更加符合实际的运行情况。本文首先分析了输电线路高频激励融冰的基本原理,建立了输电线路二维有限元模型,确定模型的边界条件,得到输电导线高频激励融冰的温度场,研究了不同的外界因素对高频激励融冰时间的影响。

## 1 高频激励融冰法原理

高频激励融冰法是利用在高频下输电导线的集肤效应产生的焦耳热和覆冰层极化后的有损介质发热来进行融冰。

### 1.1 高频集肤效应

当有周期性变化的交流电通过输电导线时,在相对强大的磁场作用下,使得输电导线电流主要集中在输电导线的表面,称为集肤效应,频率越高,电流的集肤效应越深。电流集肤效应深度  $d$  的计算方法<sup>[17]</sup>为

$$d = \rho \frac{503}{\sqrt{f \mu \delta}} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  表示物体的电阻率;  $f$  表示电流的频率, Hz;  $\mu$  表示物体的相对磁导率;  $\delta$  表示相对电导率。

高频激励下不仅使电流集中在导线表面,而且也使导线单位长度的电阻增大。在一定温度下,可由式(7)一式(9)求得一定频率下的电阻为<sup>[18-20]</sup>

$$R_f = \frac{\gamma_f L}{S} \quad (2)$$

式中:  $R_f$  为电源频率  $f$  下的电阻,  $\Omega$ ;  $\gamma_f$  为电源频率下的电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $S$  为导线的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为导线的长度,  $\text{m}$ 。

## 1.2 冰层介质发热原理

输电线路施加高频激励时,覆冰层被置于交变电场中,冰层作为电介质被反复极化,将电场中的电能转化为热能。

高频电场中的电介质,单位体积吸取的电功率为<sup>[17]</sup>

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

将式(3)改为热量公式为<sup>[17]</sup>

$$H = 1.33fE^2 \varepsilon_r \tan \delta \times 10^{-13} (\text{W}/\text{cm}^3) \quad (4)$$

式中:  $\tan \delta$  表示介质损耗角;  $f$  表示高频电场频率, Hz;  $E$  表示电场强度,  $\text{V}/\text{m}$ ;  $\varepsilon_r$  表示电介质的相对介电常数。从式(4)可以看出,介质损耗越大,输电线路覆冰层的热效率就越好。

## 2 电磁-热耦合有限元模型

已有关于输电线路高频激励融冰温度场模拟中作了较多的假设,如导线电阻率不变,但在实际中输电线路电阻率是随温度升高而降低的,导致计算不准确。为此,本文提出了一种电磁-热耦合场的计算方法,将电磁分析的结果作为热源施加到热场中,并考虑电阻随温度变化的情况以及两个物理场之间的相互影响,形成了一种更符合实际的输电线路高频激励融冰数值计算方法。

### 2.1 输电线路物理模型

输电线路的覆冰模型受环境因素影响大,在各种覆冰类型中,雨淞类型的覆冰对输电线路的危害最大,并且符合我国南方地区导线覆冰情况。故本文选择导线覆冰形状为均匀圆柱形雨淞覆冰模型。为了便于分析,以单导线为例,假设导线长度为无限长。覆冰导线的物理参数如图 1 所示。

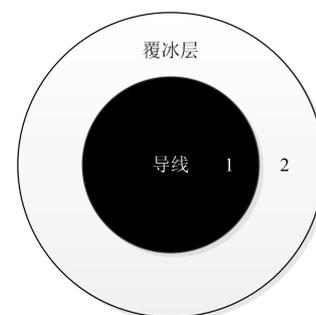


图 1 覆冰模型

Fig. 1 Icing model

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 电磁场数学模型

依据麦克斯韦方程,引入矢量磁位  $A$ , 得到控制方程的向量形式为<sup>[18-21]</sup>

$$(\nabla \cdot \nabla) \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_s + j\omega\mu\gamma \mathbf{A} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为磁导率;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $\gamma$  为电导率;  $\mathbf{J}_s$  为外加电流密度;  $\omega$  为角频率。

在仿真分析时, 施加在输电导线覆冰外表面的矢量磁位  $\mathbf{A}=0$ 。

输电导体电阻率与频率、温度之间的关系为<sup>[22]</sup>

$$\gamma_f = (1 + y_s) \gamma_0 \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \gamma_{20} (1 + \alpha_{20} (t_a - 20)) \quad (7)$$

$$y_s = \frac{(8\pi f \times 10^{-7} / \gamma_0)^2}{192 + 0.8(8\pi f \times 10^{-7} / \gamma_0)^2} \quad (8)$$

式中:  $y_s$  为集肤效应系数;  $t_a$  为导线表面的温度;  $\gamma_0$  为  $t_a$  下的直流电阻率;  $\gamma_{20}$  为 20 °C 下的直流电阻率;  $\alpha_{20}$  为随温度变化的温度系数。

### 2.2.2 温度场数学模型

覆冰导线高频激励融冰过程中区域  $j(j=1, 2)$  内满足式(9)所示的二维瞬态热传导微分方程<sup>[21]</sup>。

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + Q_j \quad (9)$$

式中:  $\lambda_j$  为区域  $j$  热传导率;  $Q_j$  为区域  $j$  的热源 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), 区域 1 的外表面为焦耳热源, 区域 2 为介质损耗产生的热源。覆冰导线的边界条件, 边界  $\Gamma_{12}$  为连续的边界条件, 边界  $\Gamma_2$  为三类边界条件<sup>[21]</sup>。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = h(T_{\Gamma_2} - T_a) \quad 0 < \theta \leq 2\pi \quad (10)$$

式中:  $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2}$  为边界  $\Gamma_2$  法线方向的热流密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $T_{\Gamma_2}$  为  $\Gamma_2$  上的温度;  $T_a$  为环境温度, °C;  $h$  为覆冰层外表面与空气热交换系数 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ )。

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 覆冰输电导线表面的辐射散热热边界为<sup>[21]</sup>

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma_0 \varepsilon (T_f^4 - T_a^4) \quad (11)$$

式中:  $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8}$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_f$  为输电导线表面温度, °C;  $\varepsilon$  为表面发射率。

### 2.3 电磁-热耦合场计算分析

覆冰输电线路施加高频激励过程中, 覆冰融化的热量主要来源于导线产生的焦耳热和冰层中介质损失热。根据控制方程可知, 温度场计算需要输电线路热源, 即输电线路单位体积生热率  $Q_1$  和  $Q_2$ ,  $Q_1$  和  $Q_2$  可以通过式(3)、式(12)和式(13)计算得到。

$$\mu \mathbf{J} = \nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{A} \quad (12)$$

$$\sigma Q_2 = |\mathbf{J}|^2 \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{J}$  为源电流密度及涡流电流密度的总电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ 。

本文采用的计算方法可以实现覆冰输电导线电磁-热场耦合计算, 计算流程如图 2 所示。

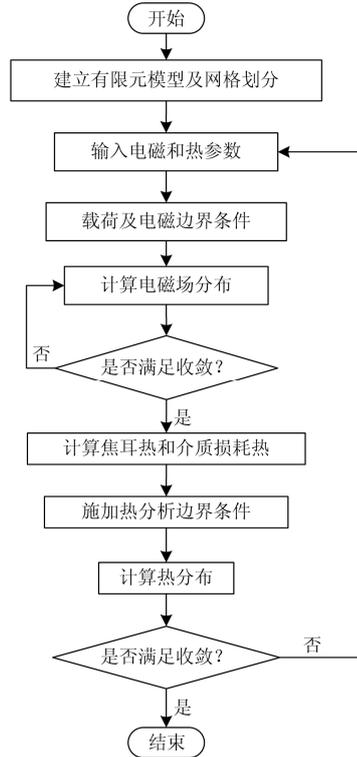


图 2 电磁-热耦合模型的计算方法流程图

Fig. 2 Flow chart of calculation method for electromagnetic thermal coupling model

首先建立电磁-热耦合场输电线路覆冰模型。根据输电导线和覆冰层的电磁参数计算电磁场分布是否收敛, 当满足收敛精度计算结束。再输入导线和覆冰的热参数, 并转化到热场分析中, 输入热场的边界条件, 计算电磁-热场的温度, 当热分布满足设置的精度时结束求解热场, 从而得到耦合场的温度分布图。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数设计

根据我国高压输电线路的主要架构体系, 我国输电线路主要以 110~220 kV 电压等级为主, 故其安全运行尤为重要。通过建立覆冰输电线路二维电磁-热耦合模型, 以 220 kV 电压等级为例, 对输电线路施加高频激励融冰温度场进行数值分析, 导线型号为 LGJ-400/50, 其相关参数如表 1—表 3 所示。

表 1 覆冰模型电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of icing model

材料	电导率/(S/m)	相对介电常数	半径/mm
导线	$3 \times 10^7$	1	13.5
覆冰	0.01	3	10

表 2 覆冰模型热参数

Table 2 Thermal parameters of icing model

材料	导热系数/(W/m·K)	比热容/(J/kg·°C)	密度/(kg/m³)
铝	237	951	2 689
冰	2.26	2 100	900
空气	0.026	1 007	1.293

表 3 覆冰环境相关参数

Table 3 Parameters related to icing environment

参数	数值
空气温度/°C	-5
换热系数/(W/m·K)	80
辐射系数/(W/m·K)	0.9
吸热系数/(W/m·K)	0.9
风速/(m/s)	10

3.2 仿真结果

高频激励电源参数设置为 18 kV、40 kHz。

假设导线的初始温度为-1 °C，根据贵州电力科学研究院提供的 2016 年 12 月及 2017 年 1 月的风速和温度统计数据，通过统计分析得出贵州地区这两个月的最大风速为 10 m/s，最低温度为-5 °C。

从图 3 中可以看出，磁感线主要集中在导线的外表面和覆冰层，这就为有损介质(冰)提供反复被极化的条件，进而产生高频情况下融冰所需的热量。

覆冰厚度为 10 mm 的输电线路(LGJ-400/50)温度随高频融冰时间变化的情况如图 4 所示。仿真结果表明，随着施加激励时间的增长，覆冰外表面的温度也逐渐升高。当施加激励为 1 000 s 时，覆冰外表

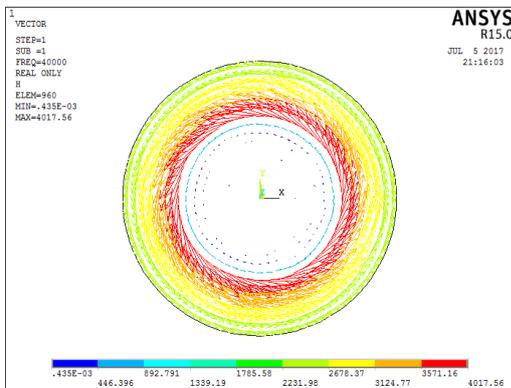
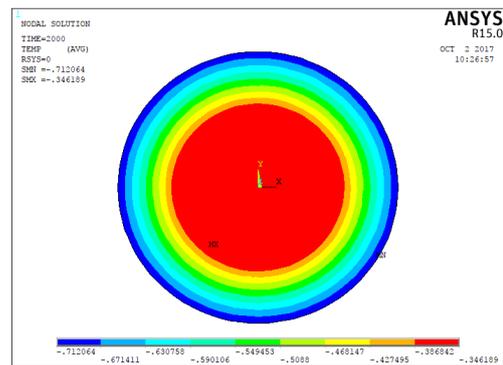


图 3 磁感应线分布图

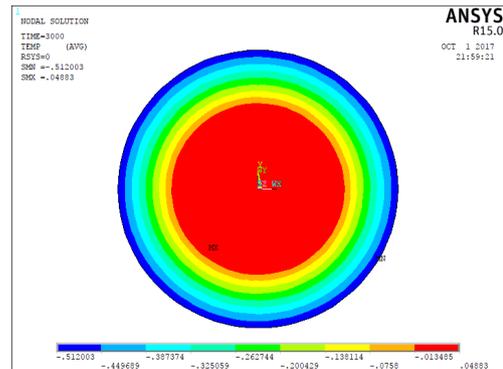
Fig. 3 Magnetic induction line distribution



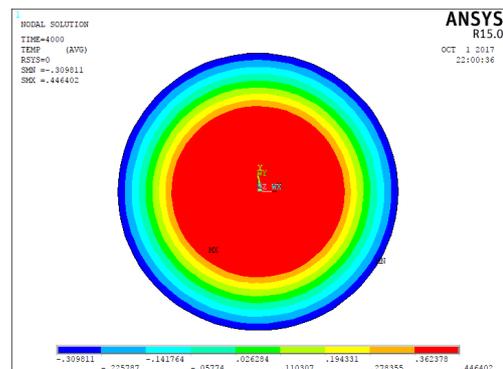
(a) 1 000 s 温度场分析云图



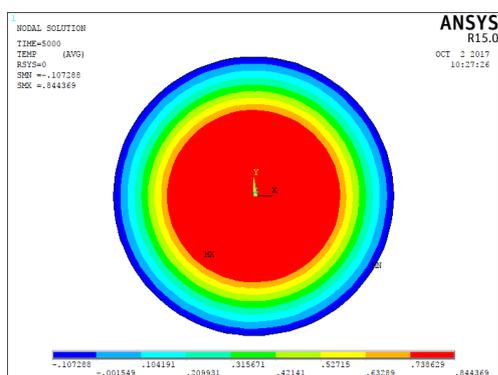
(b) 2 000 s 温度场分析云图



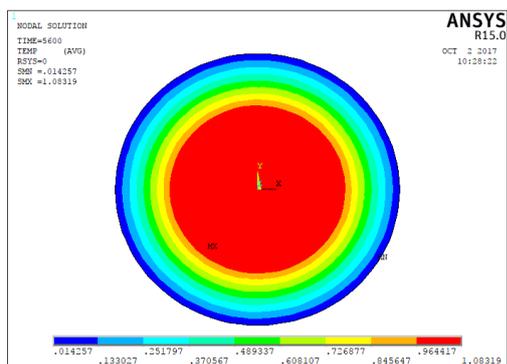
(c) 3 000 s 温度场分析云图



(d) 4 000 s 温度场分析云图



(e) 5 000 s 温度场分析云图



(f) 5 600 s 温度场分析云图

图 4 10 mm 覆冰温度分布云图

Fig. 4 Nephogram of icing temperature distribution of 10 mm

面的温度为 $-0.898\ 349\ ^\circ\text{C}$ ；当施加激励时间为 $2\ 000\ \text{s}$ 时，覆冰外表面的温度为 $-0.712\ 064\ ^\circ\text{C}$ ；当施加激励时间为 $3\ 000\ \text{s}$ 时，覆冰外表面的温度为 $-0.512\ 003\ ^\circ\text{C}$ ；当施加激励时间为 $4\ 000\ \text{s}$ 时，覆冰外表面的温度为 $-0.309\ 811\ ^\circ\text{C}$ ；当施加激励时间为 $5\ 000\ \text{s}$ 时，覆冰外表面的温度为 $-0.107\ 288\ ^\circ\text{C}$ ；当施加激励时间为 $5\ 600\ \text{s}$ 时，覆冰外表面的温度达到 $0.014\ 257\ ^\circ\text{C}$ ，此时覆冰可实现融化。

#### 4 高频激励融冰时间与影响因素分析

高频激励融冰时间受边界条件的影晌程度大。边界条件主要有覆冰厚度、环境温度、风速等。研究不同的边界条件对高频激励融冰在实际工程中的应用具有重大意义。本文就覆冰厚度、环境温度、风速对高频激励融冰时间的变化情况进行仿真分析，规定覆冰外表面的温度 $t_i$ 不大于 $0.2\ ^\circ\text{C}$ 时表明已经融化。

##### 4.1 覆冰厚度对高频激励融冰时间的影晌

由图5可知，当导线覆冰厚度为 $10\ \text{mm}$ 、 $15\ \text{mm}$ 、 $20\ \text{mm}$ 、 $25\ \text{mm}$ 时，高频融冰时间分别为 $5\ 800\ \text{s}$ 、 $5\ 900\ \text{s}$ 、 $6\ 200\ \text{s}$ 、 $6\ 700\ \text{s}$ ，高频融冰时间随覆冰厚度增加而增大，近似于线性增长。

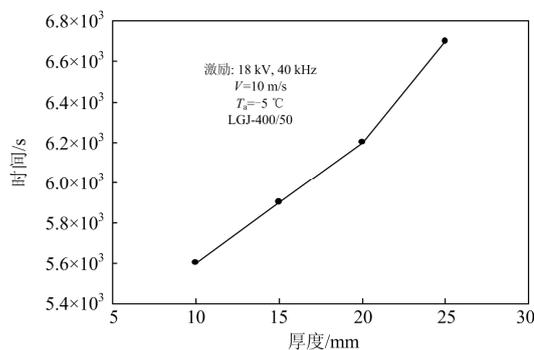


图 5 不同覆冰厚度的融冰时间

Fig. 5 Ice melting time of different ice coating thickness

##### 4.2 环境温度对高频激励融冰时间的影晌

选取 LGJ-400/50 型导线，冰层厚度设置为 $10\ \text{mm}$ ，研究环境温度与高频融冰时间的关系如图6所示。融冰时间随环境温度的降低而增大。当环境温度降低时，覆冰层与环境之间的热交换增加，向环境中辐射和对流的热量增加，导致高频融冰时间增加。

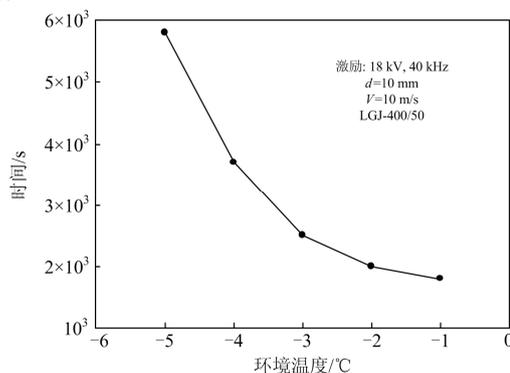


图 6 环境温度与融冰时间关系

Fig. 6 Relationship between ambient temperature and ice melting time

##### 4.3 风速对高频激励融冰时间的影晌

当覆冰厚度与环境温度相同时，设风速分别为 $4\ \text{m/s}$ 、 $6\ \text{m/s}$ 、 $8\ \text{m/s}$ 、 $10\ \text{m/s}$ ，仿真结果如图7所示。

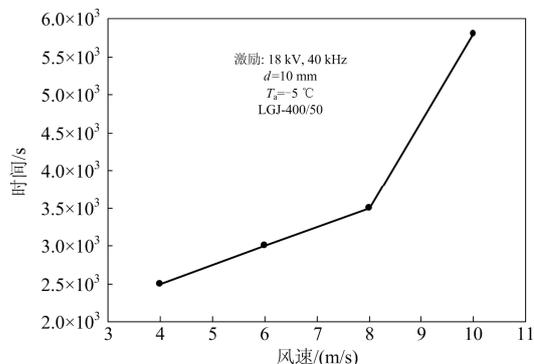


图 7 不同风速的融冰时间

Fig. 7 Ice melting time at different wind speeds

由图 7 可知, 风速越大导线融冰的时间越长。风速在低风阶段 4~8 m/s 时, 融冰时间增长缓慢; 但在高风阶段 8~10 m/s 时, 融冰时间增长较大, 这表明大风速对输电导线融冰时间的影响很大。

## 5 结论

建立了一种接近于实际覆冰输电线路电磁-热耦合场模型, 应用有限元软件 ANSYS 进行了数值模拟, 分析了不同环境因素对高频激励融冰时间的影响规律, 结果表明:

(1) 高频激励融冰时间随覆冰厚度的增加而增长, 两者之间近似于线性关系。

(2) 环境温度对高频高压融冰时间有很大的影响, 融冰时间随环境温度的降低而增长。

(3) 风速对高频激励融冰的影响有明显的作用, 融冰时间随着风速的增大而变长。当风速大于 8 m/s 时, 风速越大对高频高压融冰时间影响越大。在实际应用中, 选择合理的风速时机进行融冰, 可有效地缩短融冰时间。

## 参考文献

- [1] 程广通. 输电线路覆冰厚度监测技术研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
CHENG Guangtong. Research and application on the technology of the icing-thickness monitoring of transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [2] 麻赛军. 输电线路覆冰远程监测与信息处理[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
MA Saijun. Remote monitoring and information processing for icing of transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [3] 张松海, 施心陵, 李鹏, 等. 基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 57-61.  
ZHANG Songhai, SHI Xinling, LI Peng, et al. Identification and modeling of the power transmission line icing based on dynamic date of tension and angle[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 57-61.
- [4] 蒋兴良, 兰强, 毕茂强. 导线临界防冰电流及其影响因素分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1225-1232.  
JIANG Xingliang, LAN Qiang, BI Maoqiang. Analysis on critical anti-icing current of conductor and its impacting factors[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1225-1232.
- [5] 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.
- [6] 周羽生, 陈佩瑶, 高小刚, 等. 基于高频高压激励法的输电线路融冰方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 1-4, 10.  
ZHOU Yusheng, CHEN Peiyao, GAO Xiaogang, et al. Research on transmission line de-icing method based on high-frequency and high-voltage excitation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6): 1-4, 10.
- [7] 毕茂强. 分裂导线电流转移循环融冰试验与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.  
BI Maoqiang. Experiment and method of melting ice in current transfer cycle of split conductor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [8] 刘国特, 郝艳捧, 阳林, 等. 基于改进 Messinger 覆冰模型导线防冰临界电流计算及其影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 176-183.  
LIU Guote, HAO Yanpeng, YANG Lin, et al. Calculation and influencing factors analysis of conductor anti-icing critical current based on improved Messinger icing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 176-183.
- [9] 荆群伟, 周羽生, 刘亮, 等. 基于工频谐振的输电线路融冰方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(4): 1-6.  
JING Qunwei, ZHOU Yusheng, LIU Liang, et al. Research on frequency resonant deicing method for transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(4): 1-6.
- [10] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等. 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 116-121.  
FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [11] 张暎, 何青, 蓝澜, 等. 高压输电线路热力融冰影响因素的分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊 1): 449-455.  
ZHANG Jian, HE Qing, LAN Lan, et al. Analysis of influencing factors of thermal de-icing high-voltage transmission line[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(S1): 449-455.
- [12] CHURCHILL S W, CHU H H S. Correlating equations for laminar and tubulent free convection from a horizontal cylinder[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1975, 18: 1049-1953.
- [13] HUNEALT M. A dynamic programming methodology to develop de-icing strategies during ice storms by

- channeling load currents in transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.
- [14] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
- LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [15] 王燕, 杜志叶, 阮江军. 高压架空输电线路覆冰情况下风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 84-90.
- WANG Yan, DU Zhiye, RUAN Jiangjun. Reliability risk evaluation for the high voltage overhead transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 84-90.
- [16] MCCURDY J D, SULLIVAN C R, PETRENKO V F. Using dielectric losses to de-ice power transmission lines with 100 kHz high-voltage excitation[C] // Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, 36th IAS Annual Meeting, September 30-October 4, 2001, Chicago, IL, USA: 2515-2519.
- [17] 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.
- [18] 刘赞, 俞集辉, 程鹏. 基于电磁-热耦合场的架空输电线路载流量分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 28-34.
- LIU Yun, YU Jihui, CHENG Peng. Analysis and calculation on the ampacity of overhead transmission lines based on electromagnetic-thermal coupling fields[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 28-34.
- [19] 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.
- [20] 王燕, 皇甫成, 杜志叶, 等. 覆冰情况下输电线路有限元计算及其结构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 99-106.
- WANG Yan, HUANGFU Cheng, DU Zhiye, et al. Finite element calculation and structural optimization method for the high voltage transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 99-106.
- [21] 杨安琪, 龚庆武. 基于 BOTDR 测温技术的架空线路动态增容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 16-21.
- YANG Anqi, GONG Qingwu. Dynamic capacity-increase of overhead line based on BOTDR temperature monitoring technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 16-21.
- [22] 舒立春, 罗保松, 蒋兴良, 等. 智能循环电流融冰方法及其临界融冰电流研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 26-34.
- SHU Lichun, LUO Baosong, JIANG Xingliang, et al. Intelligent cycled current ice melting and its critical ice-melting current study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 26-34.

收稿日期: 2018-02-13; 修回日期: 2018-06-28

作者简介:

袁肖雷(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电网安全与融冰防灾技术; E-mail: 835304732@qq.com

周羽生(1965—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为电网安全与融冰防灾技术、电力系统继电保护与配电网自动化等; E-mail: zysd10193@sina.com

王永安(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电网安全与融冰防灾技术。E-mail: 1042357886@qq.com

(编辑 许威)