

输电线路直流融冰时间的计算和试验验证

范松海, 刘馨, 聂鸿宇, 刘睿
(四川电力科学研究院, 四川成都 610072)

摘要: 根据导线融冰的物理过程, 提出了椭圆形气隙-冰层界面移动融冰模型, 分析了融冰过程中冰层在重力作用下逐步下移过程, 并在人工气候室中对模型的计算结果进行了试验验证。结果表明, 在融冰过程中, 随着冰层的融化, 融冰水从空隙流失, 冰和导线之间将形成椭圆形的气隙; 融冰时间主要受电流密度、风速、环境温度以及冰厚等因素的影响。
关键词: 冰灾; 输电线路; 融冰电流密度; 融冰时间

Abstract: An ice-melting model of moving elliptic air-gap and ice-face is put forward. The stepwise moving-down process of the ice layer due to gravity during the ice-melting is analyzed. The simulation results are testified in the artificial climate chamber. The results show that an elliptic air-gap is formed and widened gradually along with the ice melting and the ice-melting water dropping out. The influencing factors for ice-melting time include current density, wind velocity, ambient temperature and ice thickness etc.

Key words: ice storm; transmission line; ice melting current density; ice-melting time

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0015-03

自上个世纪50年代电网冰灾频发以来, 很多专家、学者以及公司对输电线路融冰进行了专门研究, 建立了许多融冰时间的计算模型。归纳起来, 融冰模型可以大致分为两大类: 一是融冰静态模型。此类模型没有考虑到融冰过程中状态不断改变对融冰的影响, 把融冰过程等效成一个静止不变的过程, 以此为基础建立融冰模型^[1]。但是, 目前已有的融冰模型均没有考虑到融冰过程中热量动态交换过程, 因而计算结果与实际情况误差较大。

吸收了文献[1-5]的一些合理因素, 把融冰问题看成是一个移动界面问题(Stefan问题), 同时摒弃了文献[1-5]中与实际情况不符的一些假设条件, 因而得到了不同于文献[1-5]的融冰过程。例如, 文献[1-5]认为, 在融冰过程中, 逐渐扩大的冰层内表面始终是与导线外表面同心的圆。因为考虑了冰层因重力作用下移这一物理过程, 冰层内表面随冰层一起下移, 使其呈椭圆形状不断扩大。模型的计算结果与人工气候室中直流融冰试验的结果基本相符。

1 导线融冰模型及其计算过程

1.1 焦耳热融冰的物理数学模型

由于冰层重力矩的作用, 导线在覆冰过程中会发生扭转, 从而使冰层呈均匀的圆柱状。在融冰过程中, 融冰水经冰层空隙流失, 冰和导线之间形成气隙。大量试验结果表明, 当导线上的冰层呈均匀的圆柱形且厚度小于导线直径时, 气隙(包括导线)的截面形状接近于椭圆形, 如图1(a)所示。当导线足够长且覆冰均匀时, 导线沿轴向的传热可以忽略不计。因而, 通电导线的融冰模型可以简化为截面上的二维传热模型, 如图1(b)所示。利用焦耳热融冰的传热过程发生在以下5个区域: Θ_1 为导线钢芯; Θ_2 为导线铝层; Θ_3 为气隙; Θ_4 为冰层; Θ_5 为环境。5个区域由4个界面分开: 导线钢芯-导线铝层($\Theta_1-\Theta_2$)、导线-气隙($\Theta_2-\Theta_3$)、气隙-冰层($\Theta_3-\Theta_4$)、冰层-环境($\Theta_4-\Theta_5$)。

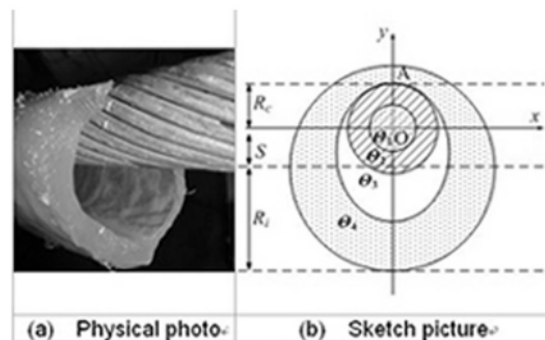


图1 融冰导线的横截面

热量由导线铝层(Θ2)经气隙(Θ3)传递至冰层(Θ4),冰层(Θ4)自内表面开始融化,融冰水经冰层空隙流失,在导线和冰层之间形成气隙(Θ3)。

短路融冰时间一般较短(0.5~3 h),电流焦耳热效应远大于阳光照射,可以忽略阳光照射的影响。融冰过程中,电流产生的焦耳热消耗于:①冰层外表面因对流和辐射产生的热损失;②冰融化需要吸收的潜热;③加热导线、冰层和空气间隙。

$$I^2 r_T - \pi(D_c + 2D_i)h(T_{io} - T_e) = \rho_i L_F \frac{dV_m}{dt} + \sum_{k=1}^4 \rho_{\Theta k} V_{\Theta k} C_{\Theta k} \frac{dT_{\Theta k}}{dt} \quad (1)$$

式中 r_T 为导线电阻率 Ω/m ; R_i 为冰层外表面圆半径 m ; h 为冰层外表面与环境热交换系数(包括对流传热和辐射散热)^[6], $W/(m^2 \cdot K)$; V_m 为冰融化的载面积(单位长体积) m ; $V_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的截面积(或单位长体积) m^2 ; $\rho_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的密度 kg/m^3 ; $C_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的比热容 $J/(kg \cdot ^\circ C)$; $T_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的温度 $^\circ C$; T_{io} 为冰层外表面温度 $^\circ C$ 。

在融冰过程中, $T_{\Theta k}$ ($k=1, 2, 3, 4$) 是不断变化的,为时间和空间的函数,即 $T_{\Theta k} = T_{\Theta k}(x, y, t)$ 。根据式(1),融冰时间的计算模型可以表示为

$$t = \frac{\int_{V_m} \rho_i L_F dV + \sum_{k=1}^4 \int_{\Theta k} \rho_{\Theta k} C_{\Theta k} T_{\Theta k}(x, y, t) dt dv}{I^2 r_T - \pi(D_c + 2D_i)h(T_{io} - T_e)} \quad (2)$$

对于式(2),如果假设融冰的体积 V_m 已知,且忽略导线、气隙、冰层因升温吸收的热量,即 $\sum_{k=1}^4 \int_{\Theta k} \rho_{\Theta k} C_{\Theta k} T_{\Theta k}(x, y, t) dt dv = 0$,则式(2)便为静态融冰模型。所以,由式(2)可知,静态模型是动态模型的简化。由于温度分布函数 $T_{\Theta k}(x, y, t)$ 随着融冰过程中冰层的向下位移、气隙厚度等状态参量的变化而变化,使得融冰动态模型很难像静态模型那样求得解析解。

1.2 融冰时间的计算

在融冰过程中,导线融冰的动态传热方程为^[3]

$$D_{T(x, y, t)} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{I^2 r_T}{\pi R_c^2} - \rho C_p \frac{dT}{dt} = 0 \quad (3)$$

式中 λ 为覆冰导线热传导率, $W/(m \cdot ^\circ C)$; ρ 为密度 kg/m^3 ; C_p 为比热容 $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

采用加权余量法对式(3)进行变分^[6]得

$$\frac{\partial J^D}{\partial T_l} = \iint_D \left[\lambda \left(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_n W_l + \rho C_p W_l \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dy - \oint_{\Gamma} W_l \lambda \frac{\partial T}{\partial n} ds \quad (l=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, W_l 为对应节点 l ($l=1, 2, \dots, n$) 的权函数,取三角形单位的线性形函数; $-\lambda \partial T / \partial n$ 表示法线方向上的热流密度, W/m^2 。对式(4)积分,同时代入 Galerkin 差分格式得^[6]

$$\begin{cases} \{T\}_{p+1} = \frac{\Delta t}{3} \{ [E] + \frac{2\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \\ \times [N]^{-1} (2\{P\}_{p+1} + \{P\}_p) \\ + \{ [E] + \frac{2\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \\ \times \{ [E] - \frac{\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \{T\}_p \end{cases} \quad (5)$$

式中, $[E]$ 为单位矩阵 $n \times n$; $[K]$ 为温度系数矩阵, $n \times n$; $[N]$ 为升温系数矩阵 $n \times n$; $\{P\}_p$ 为常数项向量 $n \times 1$,与热源和边界条件有关; $\{T\}_p = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为 p 时刻节点温度向量 $n \times 1$ 。

1.3 仿真分析

根据式(5),采用商业软件 COMSOL3.4 进行计算,可得导线融冰过程中截面温度分布如图2所示。

①由图2(a)可知,当导线表面温度 $< 0^\circ C$ 时,冰层不会融化。这段时间产生的焦耳热主要用于使导线和冰层升温。②导线温度随着融冰时间的增加而增加。由于冰层的不断融化,冰层在重力作用下下移,导线两侧和下侧出现气隙。由于气隙的热阻很大,使有气隙的地方冰层融化变慢。导线上侧和冰层接触紧密,所以,导线上侧的融冰速度不会变慢。所以,气隙-冰层(Gap-Ice)呈椭圆形发展,直至冰层脱落时刻。

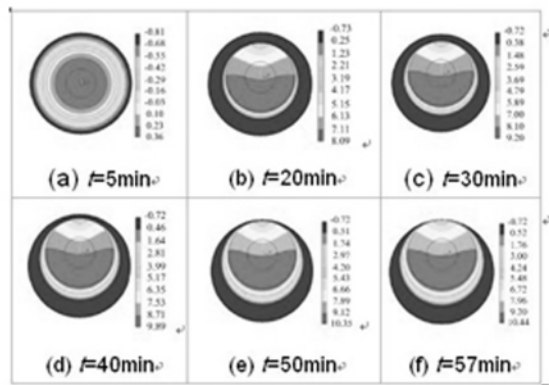


图2 融冰过程的仿真

2 试验验证

在人工气候室对以上分析计算进行了试验验证。按照图2的融冰条件,在人工气候室中进行融冰试验,得到如图3所示的融冰过程。图4则绘出了气隙增长的计算值和试验值的比较。

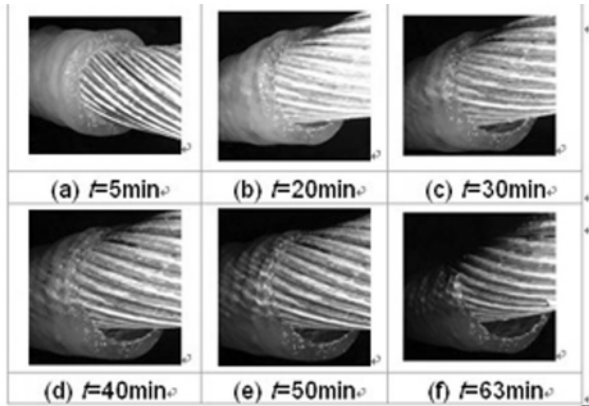


图3 覆冰导线融冰过程中

(1) 图3的试验结果和图2的仿真结果基本相符。

(2) 椭圆形气隙短轴和长轴的增长的试验值与仿真结果基本一致。由图4可知,随着融冰时间的增加,椭圆形气隙短轴 a 的增加逐步趋于饱和,增长速度随着融冰时间的增加逐步变慢,而长轴 b 的增长随着融冰时间的增加反而有增大的趋势。

3 结论

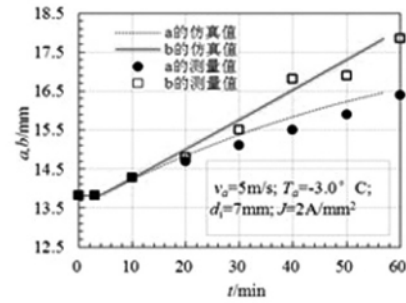
(1) 导线融冰过程中,随着冰层的融化,冰和导线之间将形成逐步增大的椭圆形气隙,气隙的高热阻使融冰过程中导线表面温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 在风速、环境温度以及冰厚一定时,导线融冰时间由电流密度决定。融冰电流密度必须大于临界融冰电流密度,冰层才会融化。融冰电流密度越大,融冰时间越小。

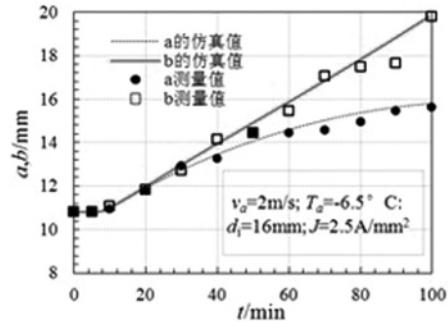
(3) 电流密度、冰厚和环境温度一定时,风速对融冰时间有明显的影 响,风速越大,融冰时间越长。当风速大于临界风速时,冰层将不会融化。不同电流密度所对应的临界风速不同,电流密度越大,临界风速也越大。

(4) 电流密度、冰厚和风速一定时,环境温度对融冰时间有明显的影 响,环境温度越低,融冰时间越长。当环境温度低于临界环境温度时,冰层将不会融化。不同的电流密度对应的临界环境温度不同,电流密度越大,临界环境温度越低。

(5) 导线上覆冰的厚度越厚,融冰时间越长。



(a) LGJ-400/35 导线



(b) LGJ-240/30 导线

图4 空气间隙增长过程

参考文献

- [1] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [2] Z. PETER. Modeling and Simulation of the Ice Melting Process on a Current - Carrying Conductor [D]. Universitédu Québec, 2006.
- [3] S. Y. Sadov, P. N. Shivakumar, D. Firsov, S. H. Lui, R. Thulasiram. Mathematical Model of Ice Melting on Transmission Lines[J]. J Math Model Algor, 2007, 6 (1): 273 - 286.
- [4] M. Huneault, C. Langheit, R. S. Arnaud, J. Benny, J. Audet, J. C. Richard. 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.
- [5] M. Huneault, C. Langheit, J. Caron. 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.
- [6] 秦妍, 李维仲. 利用移动网格技术模拟冰融化过程中的传热问题[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3): 213 - 218.
- [7] J. V. C. Vargas, A. Bejan, A. Dobrovicescu. The Melting of an Ice Shell on a Heated Horizontal Cylinder [J]. Transactions of the ASME. Journal of Heat Transfer, 1994, 116(3): 702 - 708.

(收稿日期: 2013 - 02 - 10)