

江西省电网直流融冰计算研究

陈 智

(江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 简述了江西电网开展直流融冰研究的目的及意义, 建立了直流融冰临界电流计算模型, 分析了线径、冰厚、风速及环境温度对临界融冰电流的影响, 并根据江西电网 110 kV 及以上输电线路参数进行仿真计算, 得出江西电网典型 110 kV、220 kV 及全省网 500 kV 输电线路融冰电流、功率选择方案。

关键词: 直流融冰; 临界电流; 输电线路; 影响; 功率

The research of DC anti-icing for Jiangxi grid

CHEN Zhi

(Jiangxi Province Electric Power Test Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The paper outlines the significance and the objective of carrying out DC anti-icing for the Jiangxi Power Grid and establishes the calculation model of DC anti-icing critical current and anti-icing time model. In accordance with the parameters of Jiangxi power transmission line above 110kV, it calculates the critical current and the anti-icing time of the typical 110kV, 220kV and 500kV transmission line of Jiangxi Power Grid.

Key words: DC anti-icing; critical current; transmission line; infection; power

中图分类号: TM744 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)02-0072-03

0 引言

2008年1月中旬至2月初的冰雪灾害是江西电网最严重的一次自然灾害, 持续的雨雪冰冻天气造成大范围故障跳闸、导线舞动、覆冰闪络及倒塔断线等事故, 使江西电网面临前所未有的严峻形势, 防冰除冰研究刻不容缓。在目前国内外应用比较成熟的除冰方法中, 采用交流短路电流融冰是较为有效和可行的方法。但交流线路电抗的存在, 使超高压线路的实际融冰功率只有变压器视在功率 1/10~1/20, 因此, 在实施交流短路电流融冰时往往存在融冰电源容量远远不足的问题。通过大量的实践经验的总结采用直流融冰是一种切实可行、经济有效地防止冰灾事故发生的技术方法和措施^[1]。开展直流融冰电流和融冰时间与各影响参数关系的研究是合理设计直流融冰装置、因地制宜实施融冰方法的技术基础和必要保证, 对于今后防止发生类似今年的大面积冰灾事故具有非常重要的工程应用价值和社会意义。

1 直流融冰临界电流计算模型研究

1.1 导线表面热平衡分析

为了得到导线表面热平衡方程的具体形式, 需作如下简化和假设^[2-3]: 1) 导线是外径为 D_c 的水平放置的圆柱体, 且不考虑绞线对导线表面的影响; 2) 导线通过电流时发热均匀, 且忽略导线的内热阻, 认为导线温度均匀一致, 无通过导线的导热; 3) 含有过冷却液滴的湿空气从无限远处匀速流向导线; 4) 由于导线覆冰过程十分缓慢, 故在进行传热分析时, 可将导线覆冰过程视为准平衡过程。基于以上简化和假设, 导线覆冰时的表面热平衡方程如式(1)所示:

$$Q_J = Q_C + Q_E + Q_W + Q_S \quad (1)$$

式中: Q_J 为导线电流产生的焦耳热流密度; Q_C 为导线表面和空气间的对流换热密度; Q_E 为导线表面因水分蒸发而产生的潜热损失; Q_W 为将过冷却水滴加热到表面温度所产生的显热损失; Q_S 为导线与外界环境之间的辐射换热损失。(以上各项单位均为 $J/m^2 \cdot s$)

1.2 直流融冰临界电流模型

方程(1)中的各项热流密度可由式(2)~(8)计算^[2-3]：

(a) 焦耳热流密度(Q_J)

$$Q_J = \frac{\mu I^2}{\pi D_c} \quad (2)$$

式中： μ 为单位长度导线的直流电阻(Ω/m)； I 为导线电流(A)； D_c 为导线外径(m)。

(b) 对流换热密度(Q_C)

$$Q_C = h(t_s - t) \quad (3)$$

式中： h 为空气与导线间的对流换热系数。

$$h = \frac{\lambda_a Nu}{D_c} \quad (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

式中： λ_a 为空气导热系数($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)； Nu 为努塞尔系数； t_s 、 t 分别为导线表面温度和空气温度(K)。

(c) 蒸发潜热(Q_E)

$$Q_E = \frac{2}{\pi} E v_a w_E L_V \quad (4)$$

式中： E 为液滴总体收集系数； v_a 为空气速度(m/s)； L_V 为水的气化潜热， $L_V=2.26 \times 10^3$ (kJ/kg)； w_E 为导线表面蒸发的过冷却液滴含量。

$$w_E = 0.622 \times \pi \times h \cdot \frac{e_{ts} - e_t}{2E v_a c_a} \quad (5)$$

其中： P 为标准大气压， $P=1.01325 \times 10^5$ (Pa)； e_{ts} 为在 $t_s^\circ\text{C}$ 时，导线表面的饱和蒸汽压； e_t 为在 $t^\circ\text{C}$ 时，湿空气的饱和蒸汽压； c_a 为空气的定压比热容， $c_a=1.006$ (kJ/kg·K)。

饱和蒸汽压的计算采用LOWE公式^[4]：

$$e_t = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 + a_6 T^6 \quad (6)$$

式中： T 单位(K)； e_t 单位(mb)； $a_0 \sim a_6$ 为多项式系数，见表1。

表1 LOWE公式系数

Tab.1 Coefficient of the LOWE formula

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
6.985e3	-1.889e2	2.133	-1.289e-2	4.394e-5	-8.024e-8	6.137e-11

(d) 辐射换热(Q_S)

在不同文献中，辐射换热 Q_S 的计算公式略有不同。刘和云等计算该项热流密度时，采用如下公式：

$$Q_S = 4\varepsilon\sigma t^3(t_s - t) \quad (7)$$

式中： ε 为导线表面黑度(新线0.23~0.43，旧线0.9)； σ 为Stefan-Boltzmann常数， $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

(e) 升温显热(Q_w)

$$Q_w = \frac{2}{\pi} E v_a L W C c_w (t_s - t) \quad (8)$$

式中： LWC 为湿空气含湿量(g/m^3)； c_w 为水的定压比热容， $c_w=4.18$ (kJ/kg·K)。

(f) 液滴撞击动能及空气动力热能

导线覆冰时参与其表面传热过程的液滴质量流包括 Q_w 、 Q_E 及进入控制体的液滴质量流所携带的动能项。同时，当空气流过导线时会与导线表面发生摩擦而产生热量，这种热量与空气速度的平方成正比，即热量将随空气速度的增大而呈指数增加，而式(1)中也没有体现这一热流量。所以，为了在导线覆冰条件下，使其表面热平衡方程更准确地反映实际情况，需要考虑上述两项热流项，即 Q_K 、 Q_V ^[5-6]。

将上述各式代入式(1)中，即可得到临界电流 I_c 的表达式：

$$I = \left(\frac{\pi D_c}{\mu} \right)^{0.5} [Q_C + Q_E + Q_w + Q_S - (Q_V + Q_K)]^{0.5} \quad (9)$$

由式(9)可以看出，临界电流值主要取决于外部气象条件和导线本身的物性参数。一般来说，线路一旦铺设，导线型号基本不会改变，所以只要知道覆冰时导线所处的气象条件，即可确定临界电流值。

2 直流临界融冰电流的影响因素研究

文章分别模拟了线型、冰厚、温度、风速对临界融冰电流的影响，如图1~4所示。在相同冰厚、环境温度及风速下，随着线径的增粗，由于导线直流电阻的减小，所需的导线临界融冰电流成比例增加。在相同线径、环境温度及风速下，覆冰厚度越厚导线所需的临界融冰电流有所增加，但增加幅度不大，主要原因在于导线表面热平衡吸、散热与冰厚关系不大。由于风速及环境温度对导线表面吸、散热关系较大，在相同线径、冰厚及环境温度下，风速对导线临界融冰电流影响较大，风速越快导线所需的临界融冰电流越大。在相同线径、冰厚及风速下，环境温度对导线临界融冰电流影响较大，环境温度越低导线所需的临界融冰电流越大。

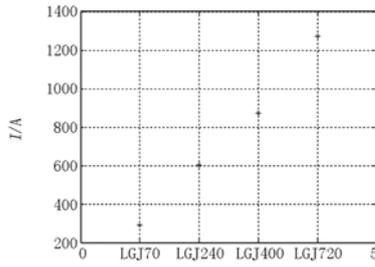


图 1 线型对临界融冰电流的影响

Fig.1 Influence of conductors for the anti-icing critical current

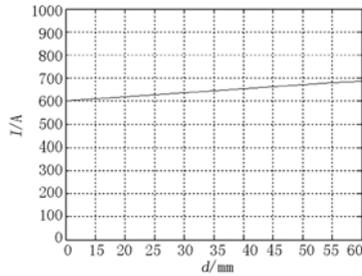


图 2 覆冰厚度对 LGJ240 线型临界融冰电流的影响

Fig.2 Influence of the ice thickness for the LGJ240 conductor anti-icing critical current

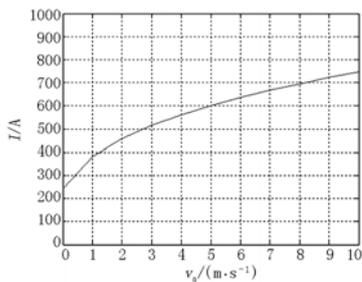


图 3 风速对 LGJ240 线型临界融冰电流的影响

Fig.3 Influence of wind speed for the LGJ240 conductor anti-icing critical current

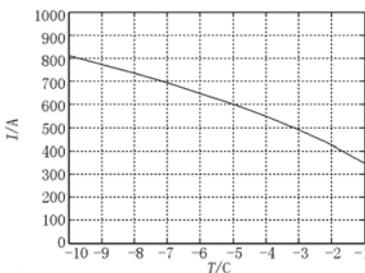


图 4 环境温度对 LGJ240 线型临界融冰电流的影响

Fig.4 Influence of the temperature for the LGJ240 conductor anti-icing critical current

3 江西省电网 110 kV、220 kV、500 kV 典型输电线路直流融冰计算结果

采用两相串联方式进行融冰,江西电网 110 kV 典型线路型号为 LGJ-240/40,此型号导线 10~60 km 所需的临界融冰电流(临界融冰电流条件是:温度 -5°C,风速 5 m/s,覆冰厚度为 10 mm)为 600 A,临界融冰电源容量为 0.87~5.2 MW。220 kV 典型线路为 LGJ-2×240/40,此型号导线所需的临界融冰电流为 1 196 A,60 km 220 kV 线路最小融冰电源容量为 10.4 MW。江西省网 500 kV 输电线路典型线型为 LGJ-4×400/35,100 km 所需的临界融冰电流为 3 515 A,最小融冰电源容量为 43.292 MW。

参考文献

- [1] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J].高电压技术,2004,30(1):6-9.
YUAN Ji-he,JIANG Xing-liang,YI Hui,et al.The Present Study on Conductor Icing of Transmission Lines[J].High Voltage Engineering,2004,30(1):6-9.
- [2] 刘和云.架空导线覆冰与脱冰机理研究(博士学位论文)[D].武汉:华中科技大学,2001.
LIU He-yun.Heat Transfer Analysis on Wire Icing and the Current Preventing from Icing,Doctoral Dissertation[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2001.
- [3] 刘和云,周迪,付俊萍,等.防止导线覆冰临界电流的传热研究[J].中国电力,2001,34(3):42-44.
LIU He-yun,ZHOU Di,FU Jun-ping,et al.Heat Transfer Investigation on Critical Current to Prevent Wires from Icing[J].Electric Power,2001,34(3):42-44.
- [4] Lowe P R. An Approximating Polynomial for the Computation of Saturation Vapor Pressure[J]. J Appl Meteor, 1997,16:100-103.
- [5] Lozowski E P, Stallabrass J R, Hearty P F. The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I:A Simulation Model[J]. J Climate Appl Meteor, 1983,22(12): 2053-2062.
- [6] Seban R A. The Influence of Free Stream Turbulence on the Local Heat Transfer from Cylinders[J]. J Heat Transfer, 1960, 82:101-107.

收稿日期:2009-02-10; 修回日期:2009-03-21

作者简介:

陈智(1983-),男,硕士,研究方向为外绝缘、防污及雷电屏蔽研究。E-mail: littlecz830122@163.com