

9-14-2020

## Optimal frequency and voltage determination method of deicing power source for transmission lines

Tao HU

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

Ci TANG

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

Jie CAI

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

Zhaoliang LI

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

Lijun CHEN

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

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

HU, Tao; TANG, Ci; CAI, Jie; LI, Zhaoliang; and CHEN, Lijun (2020) "Optimal frequency and voltage determination method of deicing power source for transmission lines," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 21.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.021

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/21>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 输电线路附加融冰电源的最佳频率及电压确定方法

胡 涛, 汤 赐, 蔡 杰, 李昭良, 陈立君

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:**在输电线路中增设溶冰装置能有效提高电力系统安全稳定运行。在此背景下,首先基于均匀传输线理论,建立覆冰输电线路的等效电路和等效分布参数电路模型,给出输电线路附加融冰电源的最佳频率、电压确定方法;并以 110 kV 电压等级的输电线路为例,提供几个特定介质损耗角下最佳频率、电压的组合。最后借助 MATLAB/Simulink 仿真软件,分析频率、电压对沿线热功率、热功率均匀度、功率因数等的影响。研究表明,附加融冰电源的频率、电压对其融冰效果起到了决定性的作用;采用所提出的最佳频率、电压确定方法,不仅可以实现覆冰导线可靠、高效的融冰效果,而且还能降低电源对所需电力电子器件在开关频率、耐压等级等方面的要求。

**关 键 词:**交流融冰;高频激励融冰;介质损耗;集肤效应

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.021 中图分类号:TM752 文章编号:1673-9140(2020)03-0155-07

## Optimal frequency and voltage determination method of de-icing power source for transmission lines

HU Tao, TANG Ci, CAI Jie, LI Zhaoliang, CHEN Lijun

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

**Abstract:**Based on the theory of uniform transmission line, an equivalent circuit model and an equivalent distribution-parameter circuit model are established respectively for studying the de-icing process of transmission lines. The determining method for the optimal frequency and voltage of the de-icing power supply is then given. A transmission line with the rated voltage of 110 kV is adopted as an example. Combinations of frequency and voltage are obtained at several dielectric loss angles. Finally, the effects from the frequency and voltage on the thermal power and power factor along the transmission line are analyzed by utilizing MATLAB/Simulink. The research results show that both frequency and voltage of the de-icing power supply play a decisive role in de-icing process of transmission lines. The proposed method can not only realize reliable and efficient de-icing effects for ice-covered lines, but also reduce the requirements of the de-icing power supply on its power electronics selection in terms of switching frequency and withstand voltage level.

**Key words:** AC de-icing; high-frequency excitation de-icing; dielectric loss; skin effect

收稿日期:2018-03-30;修回日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金(51307009);湖南省自然科学基金(2017JJ2265);湖南省教育厅科学研究项目(14C0022)

通信作者:胡 涛(1992-),男,硕士,主要从事覆冰输电线路附加高频高压电源融冰技术研究;E-mail:1010643140@qq.com

输电线路的严重覆冰将造成倒杆(塔)断线、覆冰绝缘子串闪络等事故,影响电力系统的安全稳定运行。目前国内外的融冰方法大致可分为热力融冰法、机械除冰法、自然除冰法等<sup>[1]</sup>,其中热力融冰又分为直流短路融冰、交流短路融冰以及高频激励融冰<sup>[2-5]</sup>。文献[6]提出采用 60~100 kHz 的附加电源对输电线路进行在线融冰,认为在高频时,导线表面的冰层为一种有损电介质,通过反复极化使其自身产生介质损耗热,同时线路的集肤效应也将显著增强,等效增大了单位长度的电阻值<sup>[7]</sup>;并通过选择合适的频率,使得电压波腹处的介质损耗值热和电流波腹处的欧姆热大小相等,从而实现线路的均匀加热、融冰。文献[8]提出一种采用 18 kV、40 kHz 的附加高频高压激励融冰方法,但该方法只适用于某些特定的介质损耗角,且高达 18 kHz 的融冰频率也不利于附近通信设备的正常工作,而过高的电压等级还增加了附加电源的制造成本。为此,该文基于均匀传输线理论,建立覆冰输电线路的等效分布参数电路模型,并给出输电线路附加融冰电源的最佳频率、电压确定方法,针对覆冰的不同介质损耗角计算所得的最佳频率、电压组合较以往数值均有较大程度的降低,不仅可以实现覆冰导线可靠、高效的融冰效果,还有助于降低电源的研制成本。

## 1 覆冰输电线路的等效分布参数电路模型

为简化分析,可忽略融冰过程中相邻导线之间的交互影响,即只考虑单根输电线路与大地之间构成的回路<sup>[9]</sup>,此时可得线路模型如图 1 所示,图中  $r$  为导线半径,  $t$  为导线上的覆冰厚度,  $h$  为导线高度。

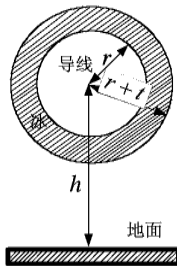


图 1 覆冰输电线路模型

Figure 1 Sketch of the iced power transmission line

为便于计算,现假定线路上冰层厚度均匀,故覆冰导线可看作是均匀传输线。由于融冰所需高频交流电的波长远小于电力系统中工频交流电的波长,因此,在分析高频交流电作用于覆冰导线时,集总参数的电路模型已经不再适用。为准确分析高频交流电在覆冰输电线路上的传输过程,此时应建立覆冰导线的分布参数电路模型,如图 2 所示。

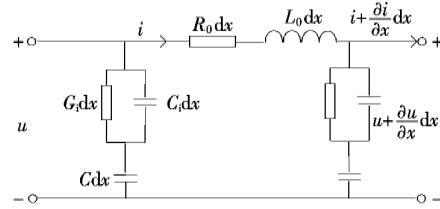


图 2 覆冰导线的等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of the iced power transmission line

图中,  $R_0$ 、 $L_0$  分别为导线的单位长度电阻、电感,  $G_i$  为冰层的单位长度电导,  $C_i$  以及  $C$  分别为导线表面对冰层外表面的单位长度电容以及冰层外表面对大地的单位长度电容。各参数的计算<sup>[9]</sup>:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{r+t}{r}} \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{1}{\sigma\pi d(2r-d)} \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (3)$$

$$G_i = \frac{2\pi\omega\epsilon_0\epsilon_r \tan \delta}{\ln \frac{r+t}{r}} \quad (4)$$

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r+t}{r}} \quad (5)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\sigma$  为导线电导率;  $d = \sqrt{\frac{2}{\pi f \mu \sigma}}$  为电磁波在线路导体中的透入深度(其中  $f$  是电磁波频率,  $\mu$  是导体的磁导率);  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\epsilon_r$  为冰层的相对介电常数;  $\tan \delta$  为介质损耗角  $\delta$  的正切值。

根据基本电路原理,可将图 2 中等效电路进一步变形为经典的均匀传输线分布参数电路模型,如图 3 所示,图中  $G_0$ 、 $C_0$  分别为

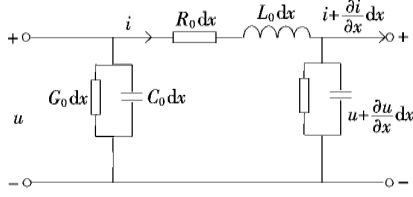


图 3 覆冰导线的等效分布参数电路

Figure 3 Equivalent distribution-parameter circuit of the iced power transmission line

$$G_0 = \frac{\omega C^2 C_i \tan \delta}{(C_i + C)^2 + (C_i \tan \delta)^2} \quad (6)$$

$$C_0 = C_i C \frac{C_i (1 + \tan \delta) + C}{(C_i + C)^2 + (C_i \tan \delta)^2} \quad (7)$$

根据均匀传输线理论,可获得覆冰导线在任一节点  $x$  处电压、电流方程的正弦稳态通解<sup>[10]</sup>,即

$$\begin{cases} \dot{U} = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ \dot{I} = \frac{A_1 e^{-\gamma x}}{Z_c} - \frac{A_2 e^{\gamma x}}{Z_c} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\gamma$  和  $Z_c$  分别为传播系数和波阻抗,其计算如式(9)所示,其中  $\omega$  为高频交流电的角频率。

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega L_0 G_0 + j\omega R_0 C_0} \\ Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \end{cases} \quad (9)$$

根据高频高压融冰的特点,可得边界条件<sup>[10]</sup>:

首端电压  $\dot{U}_1 = U_1$ , 末端电压  $\dot{U}_2 = 0$ 。将上述边界条件代入式(8),即可求得积分常数  $A_1, A_2$ , 其中  $l$  为覆冰导线的长度:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{-e^{2\gamma l}}{1 - e^{2\gamma l}} U_1 \\ A_2 = \frac{1}{1 - e^{2\gamma l}} U_1 \end{cases} \quad (10)$$

覆冰导线融冰所需的欧姆热  $P_{ohm}$  和介质损耗热  $P_{die}$  分别为

$$P_{ohm} = I_x^2 R \quad (11)$$

$$P_{die} = U_x^2 G_0 \quad (12)$$

式中  $I_x, U_x$  分别为任一节点  $x$  点处的电流、电压有效值,  $R$  为导线的单位长度电阻,  $G_0$  为均匀传输线模型的单位长度电导。

## 2 最佳融冰频率、电压的确定

附加融冰电源的频率、电压选择问题,不仅关系到覆冰导线的融冰效果<sup>[9]</sup>,而且还涉及到电源研制过程中所选用电力电子器件的开关频率、耐压等级等技术性能指标。

### 2.1 最佳融冰频率

冰层的介质损耗角  $\delta$  是对融冰效果影响最大的一个参数,其具体数值与温度、湿度、杂质等因素有关。当施加一定的高频融冰电压时,  $\delta$  的正切值在 0.01~1.00 之间<sup>[11-12]</sup>。

结合式(8)和式(10),并代入  $x=0$  (表征融冰电源安装位置)这一条件,即可求得线路的等效阻抗:

$$Z = Z_c \frac{e^{2\alpha l} (\cos(2\beta l) + j \sin(2\beta l)) - 1}{e^{2\alpha l} (\cos(2\beta l) + j \sin(2\beta l)) + 1} \quad (13)$$

式中  $\alpha, \beta$  分别为传播系数  $\gamma$  的实部、虚部。

在高频时,线路的波阻抗  $Z_c \approx \sqrt{L_0/C_0}$  表现为一个与频率无关的纯电阻<sup>[10]</sup>。为使融冰电源的功率因数尽可能高(理想情况下为 1)以提高利用率,须使线路的等效阻抗  $Z$  接近为一个纯电阻,因而有条件  $\sin(2\beta l) = 0$ 。此外,为使得电阻阻值尽可能低,根据阻抗的表达式,还应满足  $\cos(2\beta l) = 1$ , 此时线路的长度为半波长的整数倍。据此,可以获得满足上述条件的  $\beta$ , 即

$$\beta = \frac{k\pi}{2l} \quad (k \text{ 为偶数}) \quad (14)$$

为使得输电线路的介质损耗热和焦耳热叠加均匀,通过式(14)即可求得附加融冰电源的最小融冰频率:

$$f = \frac{k}{4l \sqrt{L_0 C_0}} \quad (k \text{ 为偶数}) \quad (15)$$

此时的频率即为融冰所需的最佳频率。当外界条件改变时,可对该频率进行微调以实现线路的均匀加热。

### 2.2 最佳融冰电压

通常输电线路保证 50 W/m 的热功率就可

融化 10 mm 厚度的覆冰<sup>[2]</sup>,这意味着只要保证线路上热功率的极小值点处大于 50 W/m,就能使得线路上每一处都实现融冰。因此,在后续计算覆冰导线最佳融冰电压时,该文均采用此标准作为限定条件,且均建立在合理的融冰频率(即满足式(15))的基础上。

将式(8)改写成时间的函数形式,可得:

$$\begin{cases} u = \sqrt{2}U^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \phi_+) + \\ \sqrt{2}U^- e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \phi_-) \\ i = \frac{\sqrt{2}U^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \phi_+ - \theta)}{|Z_c|} - \\ \frac{\sqrt{2}U^- e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \phi_- - \theta)}{|Z_c|} \end{cases} \quad (16)$$

式中  $U^+$ 、 $U^-$  分别为  $A_1$ 、 $A_2$  的幅值,  $\phi_+$ 、 $\phi_-$  则分别为其相角,表达式为

$$\begin{cases} U^+ = \frac{e^{2\alpha l} U_1}{e^{2\alpha l} - 1} \\ U^- = \frac{U_1}{e^{2\alpha l} - 1} \\ \phi_+ - \phi_- = 2\beta l - \pi \end{cases} \quad (17)$$

此时,欧姆热  $P_{ohm}$  和介质损耗热  $P_{die}$  分别为

$$P_{ohm} = I_{(x)}^2 R = \left( \frac{U^+ e^{-\alpha x}}{|Z_c|} \right)^2 R + \left( \frac{U^- e^{\alpha x}}{|Z_c|} \right)^2 R - 2R \frac{U^+ U^-}{|Z_c|} \cos(2\beta x + \phi_- - \phi_+) \quad (18)$$

$$P_{die} = U_{(x)}^2 G_0 = (U^+ e^{-\alpha x})^2 G_0 + (U^- e^{\alpha x})^2 G_0 + 2G_0 U^+ U^- \cos(2\beta x + \phi_- - \phi_+) \quad (19)$$

式中  $P_{ohm}$  和  $P_{die}$  均为一个单调递减的指数函数与一个单调递增的指数函数相加(通过微调频率可使得  $2R \frac{U^+ U^-}{|Z_c|} = 2G_0 U^+ U^-$ )。  $P_{ohm}$  与电流的平方成正比,而  $P_{die}$  则与电压的平方成正比,且两者之和呈略微下降的趋势,因此只需调整附加融冰电源的电压,使得覆冰导线末端的欧姆热和介质损耗热之和大于 50 W/m,即可融化 10 mm 厚的冰层<sup>[13-16]</sup>。

### 3 最佳融冰频率及电压选取示例与分析

该文现以 110 kV 电压等级的输电线路为例,取参数  $r=10$  mm、 $t=10$  mm、 $h=12$  mm、 $\sigma=3 \times 10^7$  s/m、 $\epsilon_r=3$ ,整条线路的长度  $l=50$  km。在保证整条输电线路有效融冰和沿线热功率均匀分布的前

提下,该文求得几个特定介质损耗角下最佳(最小)频率  $f$  和最佳(最低)电压  $U_1$  的组合,如表 1 所示。显然,随着介质损耗角  $\delta$  的增大,附加融冰电源的最佳频率、电压均呈下降的趋势。

表 1 不同介质损耗角下频率  $f$  和电压  $U_1$  的组合

Table 1 Combinations of frequency and voltage with different dielectric loss angles

冰层介质损耗角 正切值 $\tan \delta$	融冰频率 $f/\text{kHz}$	融冰电压 $U_1/\text{kV}$
0.07	63.95	14.0
0.10	32.00	12.0
0.30	5.80	10.0
0.50	2.90	6.8

#### 3.1 热功率、热功率均匀度、功率因数的分布

图 4 为  $\tan \delta=0.5$ 、 $f=2.9$  kHz、 $U_1=6.8$  kV 时沿线的热功率(欧姆热  $P_{ohm}$ 、介质损耗热  $P_{die}$ 、二者叠加后的总热功率  $P_{add}$ )分布图。从图中可以看出:①尽管整条输电线路的欧姆热和介质损耗热均分布得极不均匀,但二者的叠加效果  $P_{add}$  却相当平整;②  $P_{add}$  的最大值出现在电源处(即  $x=0$ ),为 54 W/m,最小值出现在线路的中点处,为 52 W/m;整条线路的热功率均匀度达到了 96.3%。

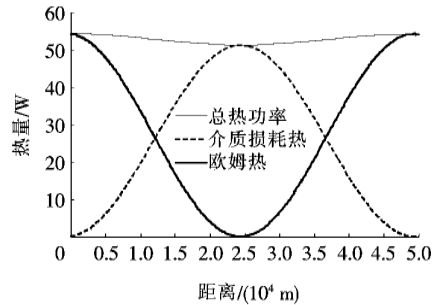


图 4  $\tan \delta=0.5$ 、 $f=2.9$  kHz、 $U_1=6.8$  kV 时沿线的热功率分布

Figure 4 Thermal distributions of power line with  $\tan \delta=0.5$ ,  $f=2.9$  kHz and  $U_1=6.8$  kV

图 5 为  $\tan \delta=0.5$ 、 $f=2.9$  kHz、 $U_1=6.8$  kV 时沿线的功率因数分布图。从图中可以看出:尽管整条输电线路的功率因数比较低(甚至在终点处接近为 0),但在电源处的功率因数却达到了 1。这意味着,此时的输入阻抗为纯电阻,附加融冰电源无需向外界提供无功能量,从而有效降低了电源的容量需求。

图 6 为  $\tan \delta=0.1$ 、 $f=32$  kHz、 $U_1=12$  kV 时沿线的热功率分布图。从图中可以看出:①  $P_{ohm}$  和

$P_{\text{die}}$  的分布依然很不均匀,但  $P_{\text{add}}$  却仍相当平整;  
②由于  $P_{\text{ohm}}$  和  $P_{\text{die}}$  均叠加了一个呈正弦分布的周期性函数,因此总热功率  $P_{\text{add}}$  略有波动;③沿线热功率的最大值出现在  $P_{\text{add}}$  的首个波峰处,为 57 W/m,最小值出现在  $P_{\text{add}}$  的最后一个波谷处,为 52 W/m,因此整条输电线路的热功率均匀度达到了 91.23%,能够实现线路的均匀融冰。

图 7 为  $\tan \delta=0.1$ 、 $f=32$  kHz、 $U_1=12$  kV 时

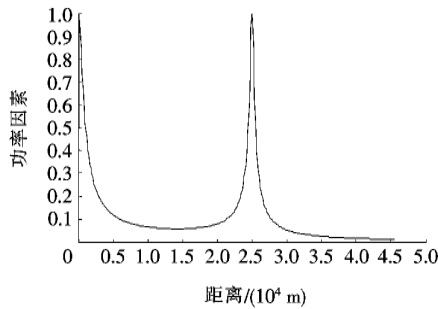


图 5  $\tan \delta=0.5$ 、 $f=2.9$  kHz、 $U_1=6.8$  kV 时沿线的功率因数分布

Figure 5 Power factor distributions of power line with  $\tan \delta=0.5$ ,  $f=2.9$  kHz and  $U_1=6.8$  kV

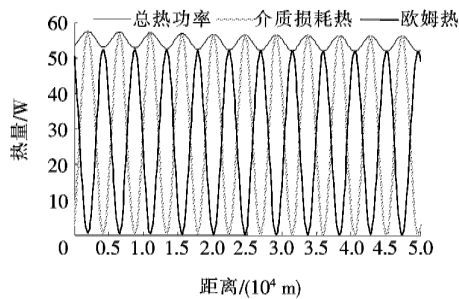


图 6  $\tan \delta=0.1$ 、 $f=32$  kHz、 $U_1=12$  kV 时沿线的热功率分布

Figure 6 Thermal distributions of power line with  $\tan \delta=0.1$ ,  $f=32$  kHz and  $U_1=12$  kV

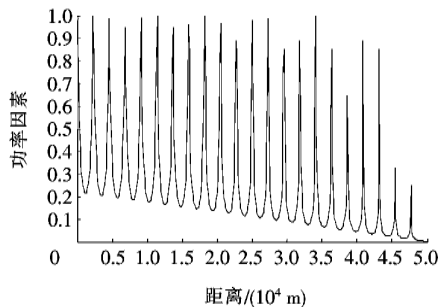


图 7  $\tan \delta=0.1$ 、 $f=32$  kHz、 $U_1=12$  kV 时沿线的功率因数分布

Figure 7 Power factor distributions of power line with  $\tan \delta=0.1$ ,  $f=32$  kHz and  $U_1=12$  kV

沿线的功率因数分布。从图中可以看出:电源处的功率因数仍为 1,表明附加融冰电源的利用率高。

### 3.2 频率、电压的敏感性

图 8 为  $\tan \delta=0.07$  时的频率敏感性分析,从图中可以看出:①最佳融冰频率为  $f=63.95$  kHz,此时总热功率  $P_{\text{add}}$  的均匀度为 89.66%,且线路末端最后一个波谷处的值为 52 W/m,如图 8(a)所示;②如图 8(b)、(c)所示,频率的微小变化对  $P_{\text{add}}$  的均匀度影响较小;当频率偏移最佳频率 50 Hz 时, $P_{\text{add}}$  的最小值小于 50 W/m,表明此时无法实现全线路范围有效融冰。

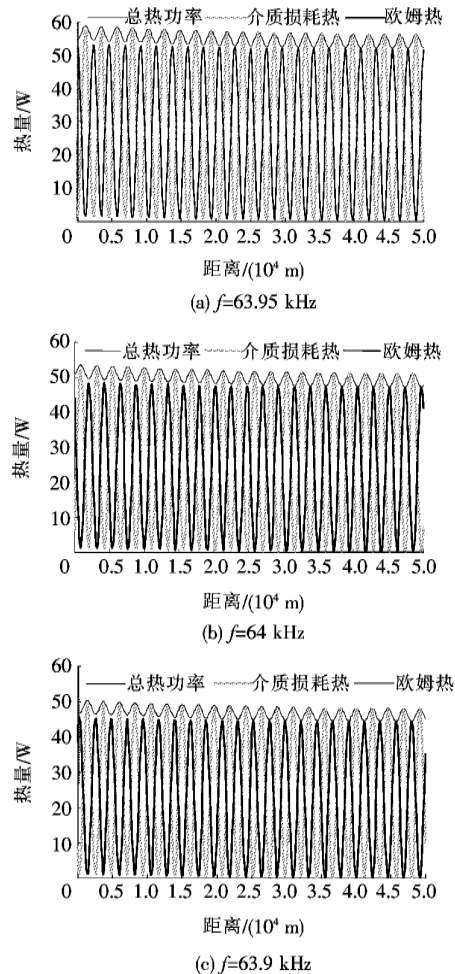


图 8  $\tan \delta=0.07$  时的频率敏感性分析

Figure 8 Frequency sensitivity analysis with  $\tan \delta=0.07$

图 9 为  $\tan \delta=0.07$  时的电压敏感性分析,从图中可以看出:①最佳融冰电压为  $U_1=14$  kV,此时总热功率  $P_{\text{add}}$  的均匀度为 89.66%,且线路末端最后一个波谷处的值为 52 W/m,如图 9(a)所示;②如

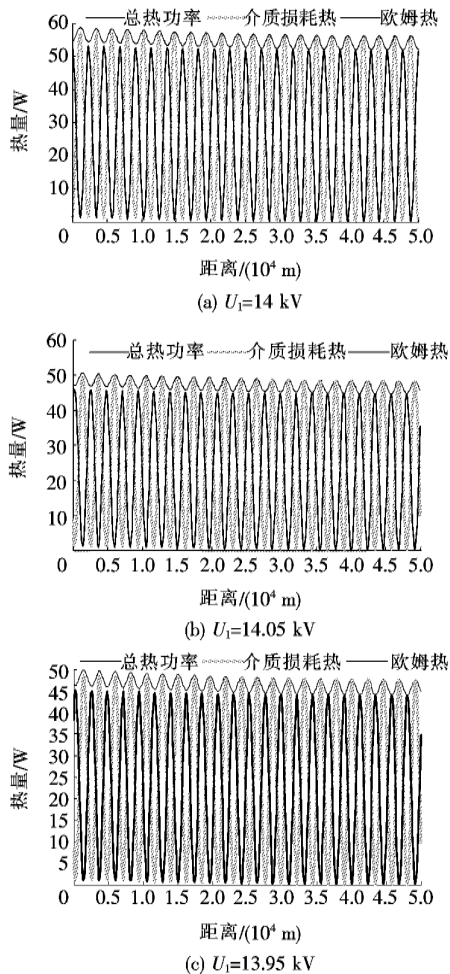


图 9  $\tan \delta = 0.07$  时的电压敏感性分析

Figure 9 Voltage sensitivity analysis with  $\tan \delta = 0.07$

图 9(b)、(c)所示,电压的微小变化对  $P_{\text{add}}$  的均匀度影响较小;当电压偏移最佳电压 50 V 时,整条线路的总热功率  $P_{\text{add}}$  均低于 50 W/m(最小值甚至只有 44.5 W/m),表明此时无法实现全线路范围有效融冰。

上述仿真结果表明,欧姆热同介质损耗热叠加后的总热功率对频率、电压的变化都非常敏感,因此需严格选择附加融冰电源的频率、电压组合。

## 4 结语

输电线路的最佳融冰频率应同时满足 2 个条件:①欧姆热和介质损耗热的幅值应尽可能相等,从而确保整条线路的总热功率均匀;②  $\beta = \frac{k\pi}{2l}$  ( $k$  为偶

数)使得线路的长度为半波长的整数倍,此时附加融冰电源的功率因数接近为 1。

确定最佳融冰频率之后,还需调整电源的电压幅值,使得总热功率的末端最后一个波谷处的幅值  $\geq 50$  W/m,这样才能实现整条线路范围的有效融冰。

采用该文提出的最佳频率、电压确定方法,不仅可以实现覆冰导线可靠、高效的融冰效果,而且还能降低电源对所需电力电子器件在开关频率、耐压等级等方面的要求。

## 参考文献:

- [1] 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+24.  
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+24.
- [2] 钟铨州,刘明光,张雪亮.高频交流与直流短路融冰比较研究[J].中国电力,2014,47(9):94-99.  
ZHONG Hongzhou, LIU Mingguang, ZHANG Xueliang. Comparative study on melting ice with high frequency AC and DC short circuit method[J]. Electric Power, 2014, 47(9):94-99.
- [3] 黄新波,刘家兵,蔡伟,等.电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J].电网技术,2008,32(4):23-28.  
HUANG Xinbo, LIU Jiabing, CAI Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(4):23-28.
- [4] 山霞,舒乃秋.关于架空输电线除冰措施的研究[J].高电压技术,2006,32(4):25-27.  
Shan Xia, Shu Naiqiu. Discussion on methods of deicing for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4):25-27.
- [5] 赵志英,龚春英,秦海鸥.高频变压器分布电容的影响因数分析[J].中国电机工程学报,2008,28(9):55-60.  
ZHAO Zhiying, GONG Chunying, QIN Haiou. Effect factor on stray capacitances in high frequency transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 55-60.
- [6] 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, Chicago, USA:IEEE, 2001.
- [7] 李宁,周羽生,邝江华,等. 输电线路除冰技术的研究[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10(3): 33-37.  
LI Ning, ZHOU Yusheng, KUANG Jianghua, et al. Research on de-icing methods for transmission lines[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2008, 10(3): 33-37.
- [8] 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]. Electro-magnetic Arrester, 2011(6): 1-4+10.
- [9] 焦重庆,齐磊,崔翔,等. 输电线路外施中频电源融冰技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 159-164.  
JIAO Chongqing, QI Lei, CUI Xiang, et al. Power line de-icing using medium frequency power source [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 159-164.
- [10] 邱关源,罗先觉. 电路[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [11] Matthias C P. Analytic determination of high-frequency propagation on ice-covered power lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(4): 695-703.
- [12] Petrenko V F, Whitworth R W. Physics of ice[M]. London, U. K. ; Oxford University Press, 1999.
- [13] 蒋兴良,范松海,胡建林,等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 111-116.  
JIANG Xingliang, FAN Songhai, HU Jianlin, et al. Analysis of critical ice-melting current for short-circuit DC trans-mission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 111-116.
- [14] 许赞,陈丽霞,陈翼龙,等. 基于拉格朗日数乘法的高频高压变压器分布电容优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 939-946.  
XU Yun, CHEN Lixia, CHEN Yilong, et al. Optimal design based on lagrange multiplier approach for parasitic capacitance of high frequency high voltage transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 939-946.
- [15] 滕予非,汤涌,周波,等. 基于高频电压突变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 72-78.  
TENG Yufei, TANG Yong, ZHOU Bo, et al. Monitoring scheme for UHVDC ground electrode line fault on the basis of high-frequency voltage varia [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 72-78.
- [16] 孔飞,张保会,甄威,等. 高压直流输电线路边界高频电压信号衰减特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 85-90.  
KONG Fei, ZHANG Baohui, ZHENG Wei et al. Analysis on high frequency voltage signal attenuation characteristic of HVDC transmission line boundary[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 85-90.