

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.221

覆冰地区分裂与扩径导线表面电场特性

马俊¹, 廖龙飞¹, 喻建波¹, 刘振华¹, 蒋兴良², 胡琴²

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401123; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 输电线路覆冰对电力系统安全运行具有严重威胁, 目前已经发展了多种防冰除冰方法, 但每种方法都有其局限性, 对于一些具有微气象、微地形特征的重覆冰地区尚未有较好的解决方法。文中考虑到扩径导线的特点和分裂导线输电线路的局限性, 根据波阻抗和自然功率将分裂导线等效为单导线, 并考虑电流的集肤效应, 得到了等效的单根扩径导线, 进而分析比较覆冰地区的分裂导线及其等效的单根扩径导线的表面电场特性。研究表明: 等效前后导线截面面积相同且波阻抗一致时, 扩径导线与分裂导线相比, 不仅显著降低了子导线根数和输电线路的覆冰荷载, 而且在扩径导线的半径等于分裂导线的等效单导线半径时, 扩径导线的表面最大电场强度小于分裂导线。因此, 在严重覆冰地区, 采用分裂导线等效半径的扩径导线具有非常好的表面电场特性, 且可显著降低冰风荷载, 提高抗冰强度。

关键词: 扩径导线; 分裂导线; 波阻抗; 表面电场

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)08-001-10

Surface electric field characteristics of bundle wire and expanded wire in icing area

MA Jun¹, LIAO Longfei¹, YU Jianbo¹, LIU Zhenhua¹, JIANG Xingliang², HU Qin²

(1. Institute of Economics and Technology of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The icing disaster of transmission line poses a serious threat to the safe operation of power systems. Currently, a variety of anti-icing and de-icing methods have been developed, but each method has its limitations. Particularly, serious icing areas with micro-climate and micro-topography characteristics lack effective solutions. This paper takes into account the characteristics of expanded conductors and the limitations of bundle conductor transmission lines. By considering wave impedance, natural power, and accounting for the skin effect of current, the split conductor is equivalently transformed into a single conductor, and the equivalent single expanded conductor is obtained. Subsequently, the surface electric field characteristics of the split conductor and its equivalent single expanded conductor in icing area are analyzed and compared. The findings reveal that when the

收稿日期: 2021-09-15 网络出版日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51637002); 国网重庆市电力公司科技资助项目(SGCQJY00JJS190061)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51637002), and State Grid Chongqing Electric Power Company Science and Technology Support Project (SGCQJY00JJS190061).

作者简介: 马俊(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输电线路设计及其管理工作, (E-mail) 19307088@qq.com。

通信作者: 胡琴, 男, 博士, 教授, (E-mail) huqin@cqu.edu.cn。

total conductor cross-sectional area of the conductor cross-section before and after the equivalent remains the same and the wave impedance is equal, the expanded conductor, compared to the bundle conductor, not only significantly reduces the number of sub-conductors and the icing load on the transmission line, but also the maximum electric field intensity on the surface of the expanded conductor is lower than that of the bundle conductor when the radius of the expanded wire is equal to the equivalent single wire radius of the bundle conductors. Therefore, in severely icing areas, the expanded wire with an equivalent radius to that of the bundle conductors exhibits excellent surface electric field characteristics, significantly reducing ice wind load and improving anti-icing capacity.

Keywords: expanded diameter conductor; bundle conductor; wave impedance; surface electric field

输电线路作为电能传输的主要途径,当其穿越寒冷与高湿地区时,遇到严重冰冻雨雪气候会导致覆冰现象的发生,覆冰严重时会影响电力系统的安全稳定运行,进而造成经济损失^[1]。如:1998年1~2月,加拿大和美国遭到历史上最严重的冻雨侵袭,导致数百万人停电一周以上,加拿大因停电冻死120余人,造成电网超过60亿美元的直接经济损失;2008年1~2月,中国南方发生影响13省的大面积覆冰灾害,导致电网直接遭受超过1000亿元人民币的巨大经济损失,2008年之后,中国虽然没有发生大面积冰灾,但区域性、微地形、微气象覆冰事故几乎是年年不断。据不完全统计显示,2009年冬季—2019年春季,在冰害、外力破坏、风害、雷击、鸟害和其他灾害等引起的电网故障中,覆冰灾害的占比接近40%。因此,冰冻雨雪灾害事故仍然是影响中国覆冰地区电网安全运行的最主要危害^[2-4]。

针对输电线路覆冰问题,国内外学者们开展了广泛的研究,提出了人工和机械除冰、憎水性涂料防冰、电流加热融冰、激光除冰、热水热气除冰、提高抗冰设计标准和停电直流融冰等各种技术^[5]。但上述技术因成熟度与应用范围受限的问题,目前仅交直流融冰技术在工程中获得广泛应用^[6],在一定程度上抑制了电网遭受大面积冰灾^[7]。

与直流融冰技术相比,交流融冰技术虽有较好的融冰效果,但所需的交流融冰电源远远大于直流融冰电源^[8],使得直流融冰技术获得了广泛应用。直流融冰技术在电网的实际应用中也存在一定的局限性^[9],如需要停电、融冰时间长、操作流程复杂、投入的人力成本高、装置昂贵、占地面积巨大等,并且目前的技术条件尚不能应用于特高压输电线路融冰。因此,为防止输电线路发生冰灾事故,满足电网对可靠性和安全性的要求,研究并开发一种可靠且经济可行的防除冰新方法和技术一直是国内外研究的热点之一。

采用扩径导线防冰的方式改变了目前采用各种主动防冰的思路,从研究方法上开辟了电网冰灾防治的新途径。因此,文中根据自然环境输电线路覆冰的形成机制和中国电网的输电线路覆冰具有“微地形、小气候”的特点,分析比较扩径导线与分裂导线覆冰的电场特性;研究提出采用扩径导线替代多分裂导线,通过减少分裂导线数量,以显著降低输电线路的总覆冰量;并且可改善输电线路的电场特性,提高导线表面利用率,降低杆塔的总体荷载。文中所得理论和研究结果可为电网防治覆冰灾害提供重要依据和数据参考。

1 扩径导线的特点及其应用

扩径导线是为应对大容量输电场景的需要,通过扩大导线外径、结构中空,以显著降低表面电场,进而替代传统分裂导线发展而来的一种新型导线。国际上广泛应用扩径导线且其历史较早,中国从2005年首次开发研制出适用于750 kV电压等级的扩径导线至今,扩径导线在各种特殊场景得到应用,并逐渐获得电力行业的认可^[10]。与分裂导线输电线路相比,单导线的扩径导线输电线路没有间隔棒,避免了分裂导线次档距震荡现象的发生,且其冰风荷载显著降低,具有显著的应用前景。特别是在微地形、小气候覆冰地区,采用扩径导线可显著降低输电线路的覆冰静荷载和冰风动荷载,显著提高输电线路的抗冰强度。因此,文中提出在局部严重覆冰的微地形、小气候线段,采用扩径导线替代分裂导线,可从根本上最大程度地防止电网冰灾事故的发生。

扩径导线可分为层间支撑型(图 1(a)~(f))和中间空心型^[11](图 1(g)和(h)),导线外径的扩大避免了集肤效应的发生,且具有较大载流截面,可显著降低导线表面场强、提高导线表面积利用系数,广泛应用于极端气候条件的特殊场景。扩径导线截面较大,通常采用单根,无须间隔棒,也不存在次档距震荡的问题;特殊情况下,输电线路也可采用分裂数较少的扩径导线。

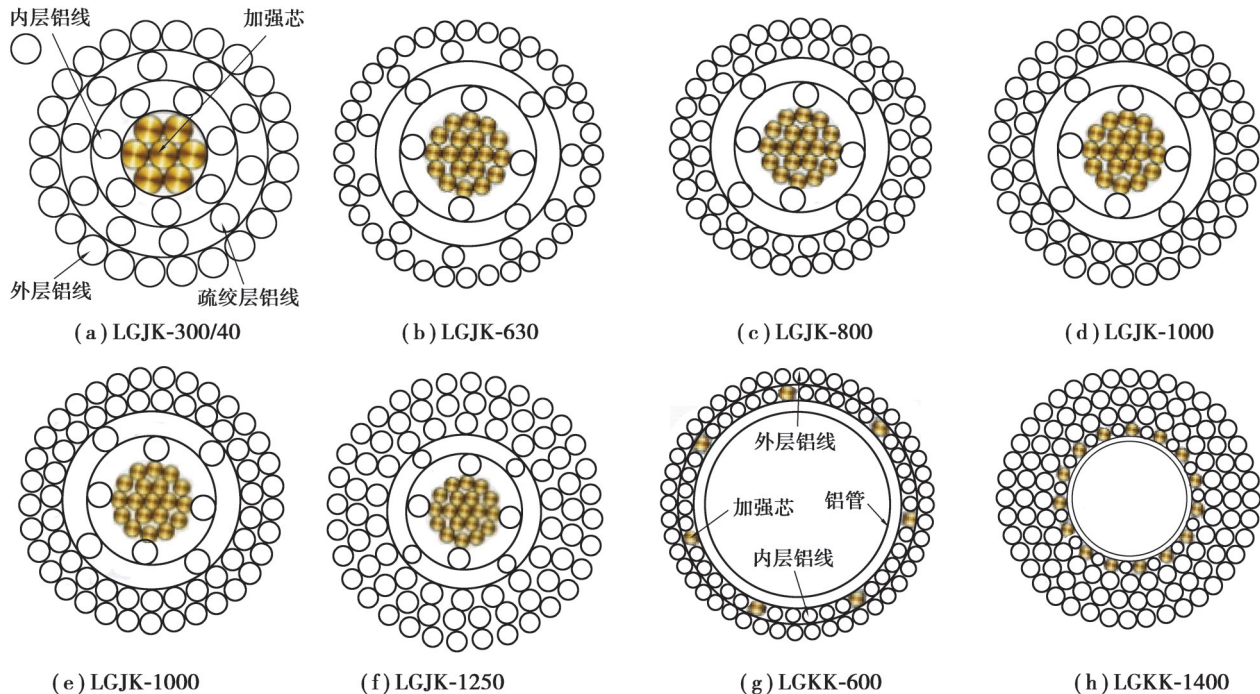


图 1 不同类型的扩径导线

Fig. 1 Different types of expanded diameter conductors

2 分裂导线与等效扩径导线

2.1 分裂导线输电线路的局限性

由于分裂导线具有降低导线表面电场、提高导线表面的利用率、优化电磁环境等突出优点,在高压、超高压和特高压输电线路得到广泛使用。中国输电线路电压等级与导线分裂数的对应关系如表 1 所示。需要说明的是,对于同一电压等级而言,紧凑型输电线路的分裂数更多,如电压等级为 500 kV 紧凑型线路一般采用六分裂的方式。

表 1 电压等级与导线分裂数对应关系

Table 1 Corresponding relationship between voltage level and conductor split number

电压等级/kV	110~220	500	750	1 000
导线分裂数	2	3 或 4	6	8

虽然分裂导线有显著的优越性,但也存在一定的局限性,即:

1) 分裂导线受到次档距振荡的限制,使得二分裂的高压和四分裂的超高压输电线路的最佳分裂间隔分别为 350~400 mm、400~450 mm,而且特高压输电线路的分裂间隔最高也不能超过 500 mm。由于这种限制,分裂导线输电线路并不能实现分裂导线的最佳分裂方式的目标。

2) 分裂导线输电线路采用间隔棒,对于覆冰地区的分裂导线输电线路而言,间隔棒将带来很多问题,如导线覆冰增长过程中发生导线扭转^[12],引起整个输电线路翻转,间隔棒在导线扭转和翻转过程中,必然磨损导线,随着运行年限的增加,覆冰地区输电线路存在断线和掉线的严重安全隐患。

3) 中国的超高压和特高压输电线路的导线一般采用水平布置的方式,其表面电磁特性的均匀性降低,导

线表面积的利用率降低,冰风机械荷载增大,微风振动显著。

2.2 分裂导线的等效单导线

考虑稳定性和防雷性能,输电线路采用水平布置的方式相较于三角形布置会更好,因而在高压输电线路中得到广泛使用。文中以水平布置的输电线路为例进行分析。

对于分裂半径为 r_p 、分裂间距为 d 、子导线半径为 r_0 、相间距离为 D_0 、离地高度为 H 的 n 分裂导线,可从对地电容和电感、波阻抗、自然功率等电磁参数上等效为单导线,如图2所示(以 $n=4$ 为例)。其中,分裂半径 r_p 是分裂子导线中心所组成的多边形外接圆半径。因此,等效单导线的半径 r_{eq} 可表示为^[13]:

$$r_{eq} = r_p \sqrt[n]{\frac{nr_0}{r_p}} \quad (1)$$

分裂间距 d 和分裂半径 r_p 之间满足:

$$r_p = \frac{d}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \quad (2)$$

同时,对于 n 分裂导线,考虑到次档距振荡的影响,其分裂间距 d 与子导线直径 $2r_0$ 之比需大于 $16^{[14]}$ 。因此,结合式(2),可计算得到 r_0 与 r_p 之间满足关系式:

$$\frac{r_0}{r_p} < \frac{\sin(\pi/n)}{16} \quad (3)$$

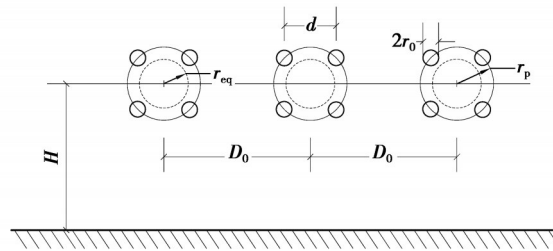


图2 四分裂导线交流输电线路及其等效半径

Fig. 2 Four bundle conductor AC transmission line and its equivalent radius

为得到与多分裂导线对应的等效单导线,须保证电感、电容、波阻抗和自然功率在等效前后一致。

2.2.1 对地电感和电容

根据电磁场基本原理,多分裂导线的等效单导线的电感和电容可表示为

$$\begin{cases} L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_{eq}}, \\ C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_{eq}}}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_0 为相导线的几何均距; μ_0 为真空中的导磁系数, $\mu_0=4\times 10^{-7}$ H/m; ϵ_0 为真空中的介电常数, $\epsilon_0=1/(36\times 10^9)$ F/m。

2.2.2 波阻抗

波阻抗为行波的电压与电流之比,而对于无损的多分裂导线输电线路,其等效单导线波阻抗 Z_λ 可表示为:

$$Z_\lambda = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \times \ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_{eq}} \quad (5)$$

2.2.3 自然功率

线路的自然功率 P_N 是当负荷阻抗为波阻抗时,该负荷所消耗的功率。如果负荷端电压为线路额定电压,则相应的自然功率以等效单导线的参数可表示为

$$P_N = \frac{U_N^2}{Z_\lambda} = \frac{U_N^2}{20 \ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_{\text{eq}}}}, \quad (6)$$

式中: P_N 为三相输送功率; U_N 为输电线路相电压。

由式(4)~(6)可知,分裂导线的自然功率、波阻抗取决于相导线之间的几何均距和等效单导线的半径。

2.3 分裂导线的等效扩径导线

实际应用的分裂导线通常为实心的钢芯铝绞线,当交变电流在导线中流通时,导线内部的电流分布不均,进而产生集肤效应,即电流集中在导线的表面,在工程上可用透入深度 Δ 表征集肤效应程度。即

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \quad (7)$$

式中: ω 为角频率; μ 为磁导率; γ 为电导率。

将铁和铝的相关参数带入式(7)可计算得到其透入深度、参数和计算结果的对应关系,如表 2 所示。

表 2 相关参数及对应计算结果

Table 2 Relevant parameters and corresponding calculation results			
材料	磁导率 $\mu / (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	电导率 $\gamma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	透入深度 Δ / mm
铁	$4\pi \times 10^{-3}$	1×10^7	0.225
铝	$4\pi \times 10^{-7}$	3.82×10^7	11.516

由表 2 可知,在透入深度方面,铝是铁的 51 倍,故可认为钢芯铝绞线在传输电能的过程中,钢芯不导电,电能全部经由铝绞线传输。而根据 2.2 节所述内容,可得到分裂导线的等效单导线。考虑到大直径的实心等效单导线重量大,进而增加杆塔静荷载。因此,结合钢芯铝绞线的集肤效应分析结果,可使等效单导线中间空置,得到具有与分裂导线相同的导电截面的单根扩径导线,并以图 2 为例进行示意,其对应的扩径导线如图 3 所示。需说明的是,图 3 中的白色圆环区域表示中间空置区,红色圆环区域表示导电截面。

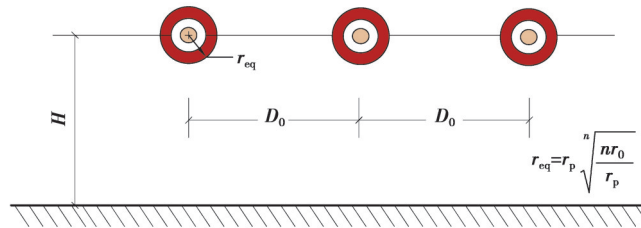


图 3 与图 2 对应的扩径导线水平布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of horizontal layout of expanded conductor corresponding to Fig. 2

当单根扩径导线的有效导电截面与原分裂导线相等时,可确保传输电流密度不发生变化,从而确保输电线路传输功率和电流的特性不变。因此,具有分裂导线等效半径的扩径导线与分裂导线的电磁特性完全相同,二者可相互替代。

3 分裂导线与等效扩径导线表面场强

相较于单根扩径导线,分裂导线的任意子导线表面电场强度不仅取决于自身所带电荷量,还受同一相的其他子导线所带电荷量的影响,电场强度沿圆周表面以正弦函数曲线变化。

分裂导线的基本特征是相导线由多根子导线组成,同一相的所有子导线的电位相同,各子导线所带的电荷极性相同。无论几何结构相同的各子导线排列是否规则,其所带电荷量 q_i 都遵循均匀分配的原则,即满足

$$q_i = q_0 / n, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

式中: q_0 为一相分裂导线等效为单导线所带的总电荷量; n 为导线分裂数。

在表面电场计算过程中,通常认为三相输电线路相间距离远大于分裂导线中子导线直径,故可以忽略相导线之间的相互影响;但考虑到同一相的各子导线的电场相互作用,表面电场不为恒定值;故根据静电场基本原理, n 分裂导线中每根子导线表面上的电场强度,可由该子导线自身的电荷 q_i 产生的场强与其他所有子导线的电荷在该导线表面(任意一点)产生的场强进行矢量叠加获得。而针对平行平面中的多导线系统,可将导线视为无限长的直线,故可不考虑与导线轴向方向的电场,只认为存在与导线表面垂直的电场分量。同时,由于各子导线所带的同性电荷相互排斥,使得沿子导线表面的电场分布不均匀。以水平轴为参考方向,任意布置的相分裂导线表面电场计算的示意图如图4所示。计及表面电场的均匀分布情况后,其他子导线的电荷在第 n 根子导线表面产生的附加电场为均匀分布时的2倍。因此,采取马克特-门格尔法,可得相分裂导线任意布置时的第 n 根子导线表面任意方向的电场强度(E_n)的通用计算表达式,即

$$E_n = \frac{1}{2\pi n \epsilon_0 r_0} \left[q_n - 2 \sum_{i=1}^{n-1} q_i \left(\frac{r_0}{d_{ni}} \right) \cos(\psi - \psi_{ni}) \right] = \frac{q_0}{2\pi n \epsilon_0} \left[\frac{1}{r_0} - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{d_{ni}} \right) \cos(\psi - \psi_{ni}) \right], \quad (9)$$

式中: ψ 为电场方向与参考方向所形成的角度; ψ_{ni} 为第 $(n-i)$ 根子导线轴心连线与参考方向所形成的角度; d_{ni} 为第 n 与 i 子导线之间的距离。

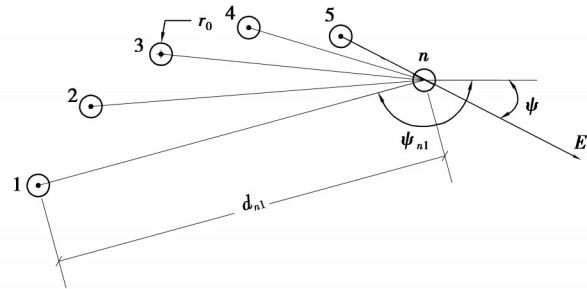


图4 相分裂导线任意布置的电场计算示意图

Fig. 4 Calculation diagram of electric field for arbitrary arrangement of phase split conductor

根据式(9)可计算任意布置的子导线表面电场分布:当子导线为 n 根且任意布置时,最大电场强度方向无法预测。实际上,中国超高压、特高压输电线路分裂导线基本上采用圆周形布置方式,故可根据式(9)得到分裂导线沿圆周布置的任意 n 根子导线在任意方向的电场强度的通用计算表达式,即

$$E_n = \frac{q_0}{2\pi n \epsilon_0 r_0} \left[1 + 2(n-1) \frac{r_0}{d} \sin \frac{\pi}{n} \cos \psi \right] = \frac{q_0}{2\pi n \epsilon_0 r_0} \left[1 + (n-1) \frac{r_0}{r_p} \cos \psi \right]. \quad (10)$$

因此,以半径为 r_0 的单导线表面电场强度可表示为:

$$E_\psi^{(1)} = \frac{q_0}{2\pi \epsilon_0 r_0}. \quad (11)$$

双分裂、三分裂和四分裂导线电场分布情况如图5所示。

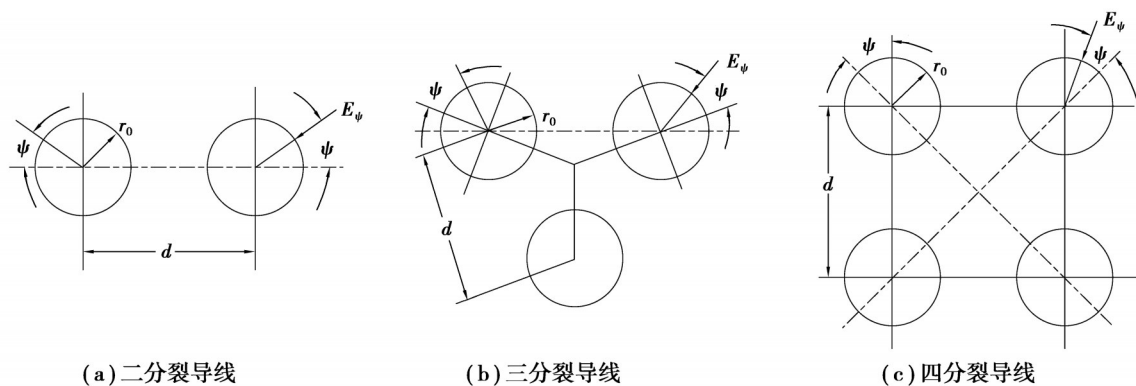


图5 2~4分裂导线中子导线表面电场的分布

Fig. 5 Distribution of electric field on neutron conductor surface of 2~4 split conductor

考虑到单导线及其等效扩径导线都为—个等势体,故在计算表面电场时可忽略导线内径对表面电场的影响,可认为单导线与其等效扩径导线的表面电场分布相同。因此,设 $q_0/2\pi\epsilon_0r_0 = E_{av}$,并由式(10)和式(1)可得如图 5 所示的分裂导线,以及六分裂和八分裂导线及其对应的等效扩径导线的表面电场分布表达式为

$$\begin{cases} E_{\psi}^{(2)} = E_{av} \left[1 + \frac{r_0}{r_p} \cos \psi \right], \\ E_{cq}^{(2)} = E_{av} \frac{1}{2^{1/2}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{1/2}; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} E_{\psi}^{(3)} = E_{av} \left[1 + \sqrt{3} \frac{2r_0}{d} \cos \psi \right], \\ E_{cq}^{(3)} = E_{av} \frac{1}{3^{1/3}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{2/3}; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_{\psi}^{(4)} = E_{av} \left[1 + \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{2r_0}{d} \cos \psi \right], \\ E_{cq}^{(4)} = E_{av} \frac{1}{4^{1/4}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{3/4}; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_{\psi}^{(6)} = E_{av} \left[1 + \frac{5r_0}{r_p} \cos \psi \right], \\ E_{cq}^{(6)} = E_{av} \frac{1}{6^{1/6}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{5/6}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} E_{\psi}^{(8)} = E_{av} \left[1 + \frac{7r_0}{r_p} \cos \psi \right], \\ E_{cq}^{(8)} = E_{av} \frac{1}{8^{1/8}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{7/8}。 \end{cases} \quad (16)$$

由式(11)~(16)可知,对于 n 分裂导线输电线路,将其等效为单根扩径导线后,且不考虑其他相导线的影响(影响很小,可以忽略),其表面场强分布均匀,可以通用式的形式表示,即:

$$E_{cq}^{(n)} = E_{av} \frac{1}{n^{1/n}} \left[\frac{r_0}{r_p} \right]^{(n-1)/n}。 \quad (17)$$

由式(12)~(16)可知,对于 n 分裂导线输电线路,其表面场强的最大值均为 $E_{av} = q_0/2\pi\epsilon_0r_0$ 。由于 $n \geq 2$ 且为整数,则有 $n^{1/n} > 1$; 而 $r_0 < r_p$, 则有 $(r_0/r_p)^{(n-1)/n} < 1$ 。因此,可得:

$$E_{cq}^{(n)} < E_{av}。 \quad (18)$$

由式(18)可知,对于 n 分裂导线,其表面场强的最大值均大于其等效的单根扩径导线的表面场强。因此,采用以半径与分裂导线等效半径相等的扩径导线可获得更佳的面电场特性和更低的电磁噪声。

4 结果分析

为确定等效的单根扩径导线的内径及外径,可根据式(1)并结合铝导线的横截面相等计算得到,以保证输电电流密度不变。在此,以 110、220、500 kV 交流输电线路的分裂导线为例,计算结果如表 3 所示。

表 3 常见分裂导线对应等效单根扩径导线参数

Table 3 Parameters of equivalent single expanded conductor corresponding to common split conductor

导线型号	单根扩径导线	
	外径/mm	内径/mm
2×JL/G1A-300/25	58.30	56.63
2×JL/G1A-400/35	65.70	63.70
4×LGJ-400/50	205.41	175.60

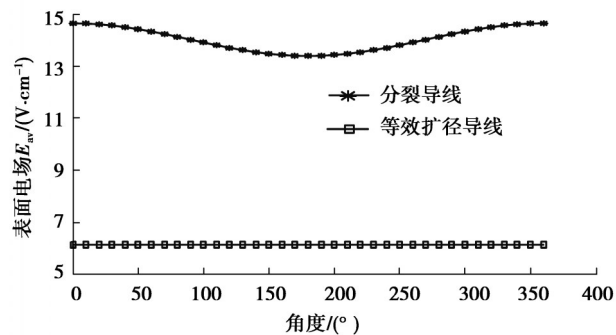
同时,根据2.2节所述的分裂导线等效为单导线的电磁参数计算方法,结合分裂导线架空参数和等效半径,可计算得到等效单导线的电磁参数。考虑到用于替代分裂导线的等效单根扩径导线的外径即为单导线外径,故扩径导线的电磁参数与等效单导线保持一致,也就是与分裂导线保持一致。在此,以4×LGJ-400/50为例,其等效单导线的电荷量由电位系数矩阵计算得到,电磁参数计算结果如表4所示。同理,可获得其余分裂导线的等效单导线结果。

表4 电磁参数计算结果

Table 4 Calculation results of electromagnetic parameters

等效半径 $r_{eq}/$ mm	对地电容 $L_0/$ (nH·m ⁻¹)	对地电感 $C_0/$ (pF·m ⁻¹)	波阻抗 Z_z/Ω	自然功率 $P_N/$ MW	中相电压最大时 所带电荷量/ ($\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	边相电压最大时 所带电荷量/ ($\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)
205.41	891	12.5	267.12	935.73	3.93	3.61

在表面电场方面,将式(3)代入至式(12)~(17)中,可获得表面电场强度计算结果,且分裂导线与其等效的单根扩径导线之间的定性关系相同,如图6所示。同时,该定量关系表明了式(18)的正确性。

图6 n 分裂导线与单根等效扩径导线表面电场定性关系Fig. 6 Qualitative relationship between surface electric field of n -split conductor

以4×LGJ-400/50为例,将相关参数代入式(14)中,计算得到的场强如表5和图7所示。需要注意的是,分裂导线的表面电场强度最大值出现在其对称轴中心轴线外侧的最远端,最小值出现在其对称轴中心轴线外侧的最近端,且在图6和图7中,每种分裂导线表面电场的初始角都是场强最大处,变化趋势关于横坐标180°对称;而等效的单根扩径导线的表面电场分布均匀,为恒定值。

表5 表面电场强度计算结果

Table 5 Calculation results of critical field intensity

导线类型	中相导线			边相导线		
	最大场强	最小场强	平均场强	最大场强	最小场强	平均场强
分裂导线	14.486	11.147	12.817	13.300	10.235	11.768
等效扩径导线	3.448			3.166		

同时,考虑覆冰情况的影响,将4×LGJ-400/50及与之对应的单根扩径导线置于重庆大学雪峰山野外科学观测研究站的自然覆冰环境下,得到其覆冰结果如表6所示。由表6可知,由于分裂导线的子导线直径小于等效的单根扩径导线,故而随着导线直径的增加,覆冰厚度将降低,覆冰量也显著降低。因此,覆冰地区采用扩径导线,不仅可以改善导线的表面电场特性,还可显著降低冰风荷载,提高抗冰强度^[9]。

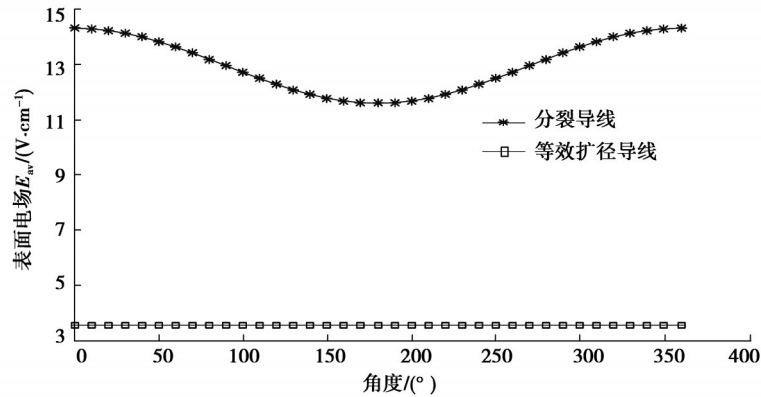


图 7 导线的中相表面电场强度

Fig. 7 Electric field intensity of the middle phase surface of the conductor

表 6 分裂导线及其对应的扩径导线覆冰结果

Table 6 Icing results of split conductor and its corresponding expanded conductor

导线类型 r_{eq}/mm	单根导线覆冰厚度/mm	导线单位长度覆冰量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
分裂导线	30.0	184.2
等效扩径导线	24.7	54.5

5 结束语

1) 依据电磁参数将分裂导线等效为单导线,并考虑电流的集肤效应,可获得半径与分裂导线等效单导线半径相等的扩径导线。在电磁特性上,输电线路波阻抗、单位长度电容和电感一致,有效导电截面相等,传输功率和电流特性不变。

2) 半径与分裂导线等效单导线半径相等的扩径导线具有表面均匀的电场特性,其表面电场强度小于分裂导线,且电场分布均匀,因而扩径导线的应用可改善输电线路的电场特性。

3) 扩径导线替代分裂导线具有优异的电场特性,以及低成本、高性能和高抗冰强度的防冰减灾效果,使其在重冰区具有巨大的应用潜力。然而扩径导线存在加工困难、成本较高、施工难度大、恢复性差、需要特制金具等问题,还需对该方法应用于实际防冰工程作进一步研究。

参考文献

- [1] 陆彬,高山,孙逊,等.不同直径下导线覆冰增长特性[J].高电压技术,2014,40(2):458-464.
Lu B, Gao S, Sun X, et al. Icing accretion characteristics of wires with different diameters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 458-464.(in Chinese)
- [2] 蒋兴良,易辉.输电线路覆冰及防护[M].北京:中国电力出版社,2002.
Jiang X L, Yi H. Transmission line icing and protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.(in Chinese)
- [3] 蒋兴良,舒立春,孙才新.电力系统污秽与覆冰绝缘[M].北京:中国电力出版社,2009.
Jiang X L, Shu L C, Sun C X. Power system pollution and icing insulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.(in Chinese)
- [4] 蒋兴良,张志劲,胡琴,等.再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J].高电压技术,2018,44(2):463-469.
Jiang X L, Zhang Z J, Hu Q, et al. Thinkings on the restrike of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469.(in Chinese)
- [5] 王勇,苗虹,莫思特,等.高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2020,48(18):178-187.
Wang Y, Miao H, Mo S T, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 178-187.(in Chinese)
- [6] 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 G S, Li X Y, Fu C, et al. Overview of de-icing technology for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 148-154.(in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Jiang X L, Fan S H, Zhang Z J, et al. Simulation and experimental investigation of DC ice-melting process on an iced conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 919-929.
- [9] 毕聪来, 蒋兴良, 韩兴波, 等. 采用扩径导线替代分裂导线的防冰方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2469-2477.
Bi C L, Jiang X L, Han X B, et al. Anti-icing method of using expanded diameter conductor to replace bundle conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2469-2477.(in Chinese)
- [10] 马钦国, 张宁刚, 江岳, 等. 750kV输电线路扩径导线工程应用深化研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 70-77.
Ma Q G, Zhang N G, Jiang Y, et al. An in-depth study on the engineering application of expanded-diameter conductors in 750 kV transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 70-77.(in Chinese)
- [11] 万建成, 刘臻, 孙宝东, 等. 扩径导线的分类与扩径方式的选择[J]. 电力建设, 2010, 31(6): 112-118.
Wan J C, Liu Z, Sun B D, et al. Classification and applicability of diameter-expanded conductor[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(6): 112-118.(in Chinese)
- [12] 蒋兴良, 侯乐东, 韩兴波, 等. 输电线路导线覆冰扭转特性的数值模拟[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1818-1826.
Jiang X L, Hou L D, Han X B, et al. Numerical simulation of torsion characteristics of transmission line conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1818-1826.(in Chinese)
- [13] 梁倩旖, 蓝磊, 何旺龄, 等. 基于有限元法的特高压电晕笼交流离子流场数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(9): 802-807.
Liang Q Y, Lan L, He W L, et al. Numerical analysis of AC ion flow field in corona cage based on finite element method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(9): 802-807.(in Chinese)
- [14] 贺建国, 朱普轩, 甘波, 等. 750kV输电线路子导线分裂间距合理取值研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 42-46.
He J G, Zhu P X, Gan B, et al. Study on rational choice of intra-bundle conductor spacing for 750 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 42-46.(in Chinese)

(编辑 詹燕平)