

特高压输电线分裂导线表面电场及起晕分析

黄宏佩¹, 李永明¹, 徐禄文², 冯凌², 李刚², 张剑³, 郑春旭¹

(1. 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;

2. 重庆市电力科学试验研究院, 重庆 401123; 3. 四川绵阳电业局, 绵阳 621000)

摘要: 输电导线起晕的重要判别条件是导线表面电场强度是否达到临界值。为研究分裂导线表面电晕分布情况, 根据单相八分裂导线起晕电压试验值, 先运用模拟电荷法计算了1 000 kV特高压八分裂子导线表面每个匹配点的电场强度值, 然后与用经验公式计算出的临界场强对比, 找出子导线表面的电晕分布区域, 并计算出了该域内的起晕点个数、起晕角度、占导线表面比等数据以及子导线半径、导线高度对起晕分布的影响。分析计算表明: 每根子导线在表面有限范围内起晕, 且占整个导线表面积的30%~40%; 对地高度越高子导线表面起晕范围越大, 子导线半径对起晕范围也有一定影响。通过研究工作, 期望对分析导线的电晕损耗等问题提供有力的帮助。

关键词: 1 000 kV输电线; 模拟电荷法; 电晕; 分裂导线; 表面电场

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)12-0001-05

Analysis on Electric Field Intensity and Onset Corona Zone on the Split Conductor Surface of UHV Transmission Line

HUANG Hong-pei¹, LI Yong-ming¹, XU Lu-wen², FENG Ling², LI Gang²,
ZHANG Jian³, ZHENG Chun-xu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Electric Power Test & Research Institute, Chongqing 401123, China;

3. Mianyang Power Supply Office, Mianyang 621000, China)

Abstract: The onset corona criterion of transmission line is that the electric field intensity on conductor surface exceeds a certain critical value. In this paper, in order to study distribution of corona zones on split conductor surface, the charge simulation method is employed to calculate the electric field intensity of each matching point on the surface of a 1 000 kV UHV single-phase 8-split conductor according to the relative experimental value of onset corona voltage. The onset corona zone distribution on the conductor surface is obtained by comparing the calculated electric field intensity values with the ones from empirical formula. Furthermore, the number of onset corona points, the angle of onset corona zone, as well as the influences of conductor's radius and height on the distribution of onset corona zones, are achieved. The results show that onset corona zones account for 30%~40% of whole conductor surface; the higher the conductor height, the larger the onset corona zone; the radius of split conductor also influences the area of onset corona zone. This study may facilitate the analysis of corona loss in transmission line.

Key words: 1 000 kV transmission line; charge simulation method; corona; split conductor; surface electric field

收稿日期: 2012-04-05; 修回日期: 2012-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907075); 重庆大学研究生科技创新基金项目(CDJXS11150019)。

Project Supported by Notional Natural Science Foundation of China (50907075), Graduate Innovation and Creativity Funds of Chongqing University (CDJXS11150019).

0 引言

建设特高压电网是满足中国持续增长的电力需求、提高电能传输效率的重要途径和保证^[1]。在特高压输电线路设计中,导线的规格往往由电晕性能决定。而电晕是带电导体附近空间出现的强电场使空气发生电离的一种特殊气体放电现象。当输电线路导线表面的电场强度超过空气的击穿强度时,导线表面将出现电晕放电。输电线表面场强和表面最大场强是决定电晕程度的最主要的因素^[2]。过高的电场强度会带来严重的电晕,产生电晕损耗和无线电干扰及可听噪音^[3-5]。导线表面电场强度的计算直接关系到线路造价、经济运行和周围环境的影响程度,是输电部门所关心的主要问题之一^[6-9]。

目前工程中用于计算分裂导线表面电场强度的方法主要有马克特—门格尔法^[10]、逐步镜像法^[10-12]和模拟电荷法^[12-16]等。国内外很多学者只是运用以上方法计算导线表面电场值,但对导线表面具体什么位置达到起晕临界场强,即起晕分布区域鲜有分析。

笔者基于模拟电荷法,在导线内侧、外侧分别设置模拟电荷和匹配电荷,求解出分裂子导线表面每个匹配点的电场强度值和电荷量,并找出其最大值、最小值,将电场强度值与用经验公式计算出的临界场强对比,计算出该域内的起晕点个数、起晕角度、占导线表面空间比等数据,从而找出子导线表面达到起晕电场的具体区域,并进一步讨论了子导线半径和导线对地高度对子导线表面起晕分布的影响。

1 计算方法

1.1 起晕场强计算经验公式法

在工程中,通常用皮克公式来计算输电线路导线表面的起晕场强。根据皮克公式^[17],导线表面起晕场强有效值为

$$E_c = 21.4\delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{\delta R}}\right) \quad (1)$$

式(1)中: R 为圆柱型导线半径; δ 为空气相对密度,标准情况下的空气密度为1; m_1 为导线表面状态系数,为0.8~1; m_2 为气象系数,为0.8~1。

在计算时,考虑在标准大气压和天气晴朗的情况下,且导线是表面干净的。取 $\delta=1, m_1=0.966^{[18]}, m_2=1$ 。

1.2 模拟电荷法及计算模型

模拟电荷法是电场数值计算的一种重要方法。它基于电磁场的唯一性定理,将导体表面连续分布的自由电荷或介质分界面上连续分布的束缚电荷

用一组离散化的模拟电荷来等效代替,然后利用叠加原理将离散模拟电荷在空间中产生的场量叠加起来,从而得到原连续分布电荷所产生的空间电场分布。

为了计算的精确性和能更好地看出子导线表面电场强度随角度的变化关系,现分别在每根子导线表面($R=15\text{ mm}$)和距子导线中心 $0.7R$ 处各设置90个匹配点和模拟点,用模拟电荷法计算导线表面一周90点的电场值。计算时,取大地为零电位。

8分裂LGJ-500导线横断面的电荷模拟点和匹配点设置示意图见图1,取导线高度为22 m,分裂间距为400 mm,子导线半径为15 mm。子导线3的模拟点和匹配点设置图见图2。

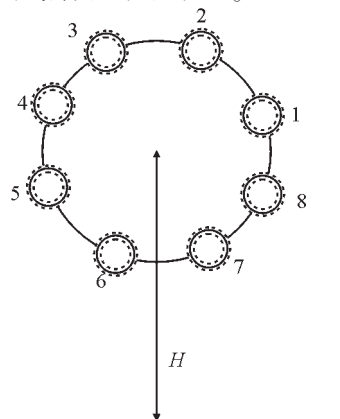


图1 分裂导线模拟电荷、匹配点示意图

Fig. 1 Simulation charges and matching points flow of bundle conductors

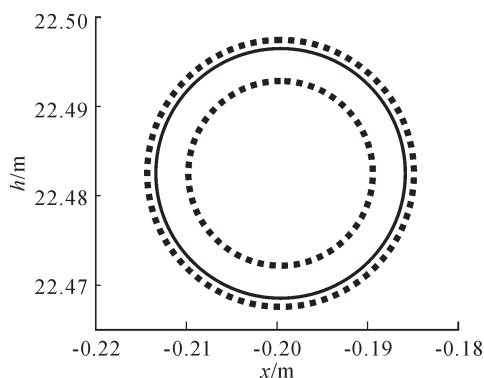


图2 子导线横断面上模拟电荷和匹配点示意图

Fig. 2 Simulation charges and matching points flow of sub-conductors

2 仿真计算及结果分析

2.1 仿真计算

基于以上模型,引用文[19]中单相8×LGJ-500导线全线起晕电压值(1 344 kV),运用模拟电荷法依次计算出8根分裂导线表面90个点的电场值 E_i 和

电荷量 Q_i , 绘制成导线表面场强和电荷量随角度的变化曲线见图 3、4。其角度以导线水平方向为零度, 逆时针旋转。

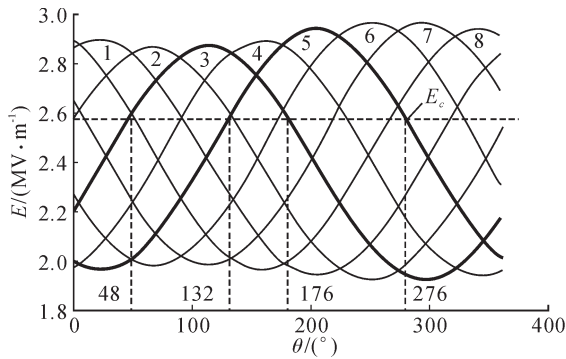


图 3 各分裂子导线表面起晕分布

Fig. 3 Distribution of corona zone on the bundle conductors surface

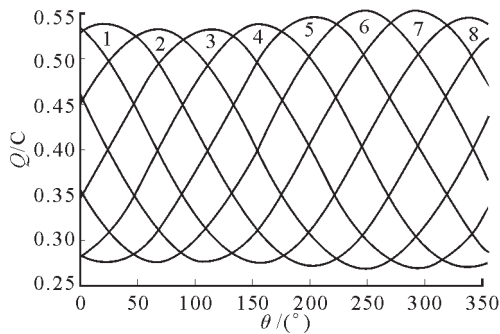


图 4 各分裂子导线表面电荷量随角度变化值

Fig. 4 Surface charge distribution curves of bundle conductors

2.2 结果分析

从图 3、4 可知: ①每根子导线表面电场和电荷量在导线表面 360°空间成正弦规律变化, 这与工程手册^[20]中子导线表面电场强度按电场强度平均值 $\bar{E}$ 为基准以正弦规律变化相吻合; ②子导线位置不同, 电场强度和电荷量幅值也有不同; ③电场强度和电

荷量变化曲线非常相似, 这是由于电场强度大小是由电荷量多少决定; ④只有部分表面场强达到临界起晕场强 E_c , 即每根子导线只有部分表面起晕。如图 3 中, 3 号子导线只在 48°到 176°的范围内起晕, 而 5 号子导线则在 132°到 276°的范围内起晕。

根据前面计算的导线表面每个匹配点的电场值 E_i 和电荷量 Q_i , 找出最大场强 $E_{\max}$ 、最小场强 $E_{\min}$ 、最大电荷量 $Q_{\max}$ 、最小电荷量 $Q_{\min}$ 及在导线表面对应的位置。把 $E_i (1 \leq i \leq 90)$ 依次和临界起晕场强 E_c 比较, 若 $E_i \geq E_c$ 则该点达到起晕场强, 认为该点起晕, 否则该点不起晕。从而算出起晕点个数, 并且根据起晕点的位置计算出起晕角度和起晕范围, 最后算出起晕范围占整个导线表面的比例, 具体结果见表 1。

分析表 1 数据可知:

1) 子导线 1 和 4, 2 和 3, 5 和 8, 6 和 7 这 4 组导线表面的 $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 、 $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 、 N_i 、 $\Delta\theta/360$ 两两基本相同, 这是由于分裂导线的对称性决定的。但是由于各组子导线对地高度不同, 因而对地电容和导线间电容也不相同, 使得每组子导线电荷量不同, 从而促使各组导线上各匹配点电场强度以及起晕点占整个导线表面的比例也就不相同。其中子导线 6、7 各项数据均最大, 子导线 5、8 次之, 子导线 1、4 再次之, 子导线 2、3 的各项数据均最小。

2) 对比各子导线最大电场强度点位置 $\theta_{E_{\max}, Q_{\max}}$ 和导线中心与各子导线中心连心线角度 ϕ , 可以看出二者基本一致, 即最大电场强度点大致出现在连心线与导线外侧交点处, 而 $\theta_{E_{\max}, Q_{\max}}$ 和最小电场强度点角度 $\theta_{E_{\min}, Q_{\min}}$ 正好相差 180°, 即最小电场强度点出现在连心线与导线内侧交点处。这是由于子导线单相传输, 子导线间的电荷相互排斥, 从而使各子导线电荷和电场强度分布不均匀。

表 1 子导线表面各项数据对比

Tab. 1 Comparison of every kind of data on the sub-conductors

子导线编号	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_{\max}/(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	2 897.33	2 868.99	2 869.00	2 897.19	2 938.92	2 968.79	2 968.89	2 938.81
$Q_{\max}/\text{C}$	0.539 75	0.532 91	0.532 78	0.539 75	0.546 68	0.551 91	0.551 94	0.546 66
$E_{\min}/(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	1 936.93	1 921.11	1 921.20	1 937.18	1 960.13	1 976.53	1 976.63	1 960.02
$Q_{\min}/\text{C}$	0.270 68	0.269 74	0.269 71	0.271 62	0.274 59	0.276 76	0.276 76	0.309 221
N_i	35	33	33	35	37	39	39	37
$\theta_{E_{\max}, Q_{\max}}/(\circ)$	20	68	112	160	204	248	292	336
$\phi/(\circ)$	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5
$\theta_{E_{\min}, Q_{\min}}/(\circ)$	200	248	292	340	24	68	112	156
$\theta/(\circ)$	-48~88	4~132	48~176	72~228	132~276	172~324	-144~8	-96~48
$\Delta\theta/(\circ)$	136	128	128	136	144	152	152	144
$(\Delta\theta/360)/\%$	37.8	35.6	35.6	37.8	40.0	42.2	42.2	40.0

3)对比起晕角度 θ 和连心线角度 ϕ 可以看出 $\phi \approx \theta/2$,说明子导线起晕点位置主要是在和连心线成对称分布的外表面上,画出导线起晕角度分布示意图见图5。其中黑色实心部分为子导线表面起晕部分。

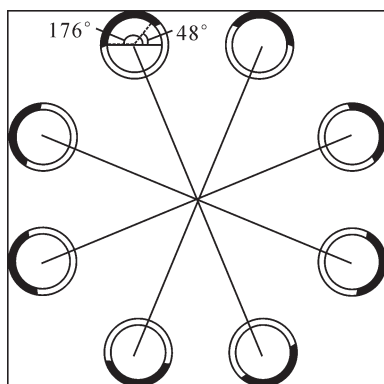


图5 子导线表面起晕分布示意图

Fig. 5 Distribution of corona zone on the bundle conductors surface flow

3 线路参数变化对子导线起晕范围的影响

导线型号的选择和布置方式直接影响到导线表面场强,导线表面场强又直接决定子导线表面的起晕范围,因此研究导线型号的选择和布置方式十分重要。下面以一条单相特高压交流输电线路为例,通过从实验数据出发的计算来讨论子导线半径、线路高度对导线表面起晕范围的影响,其他线路参数的影响由于没有实验数据的支撑故文中暂不讨论。

3.1 子导线半径对起晕范围的影响

表2为利用文[21]中不同子导线半径的8分裂导线起晕电压实验数据计算出的子导线表面的起晕区域占整个导线的比例情况,计算时导线的分裂间距400 mm,导线对地高度22 m。考虑子导线的对称性,表2中只列出了1、3、5、7这4根子导线的比例情况。

表2 不同子导线半径时的 $\Delta\theta/360$

Tab. 2 $\Delta\theta/360$ of different conductor radius

子导线型号	LGJ-400	LGJ-500	LGJ-630
1号子导线($\Delta\theta/360$)/%	34.4	37.8	34.4
3号子导线($\Delta\theta/360$)/%	32.2	35.6	33.3
5号子导线($\Delta\theta/360$)/%	36.7	40.0	37.8
7号子导线($\Delta\theta/360$)/%	37.8	42.2	40.0

从表2可以看到,不同半径的子导线起晕区域占整个导线表面的比例基本都在30%~40%左右,但半径不同所占比例还略有差别。LGJ-500每根子导线的起晕比例略大,而LGJ-400、LGJ-630稍小。这是因为LGJ-500子导线起晕场强较之其他两类分裂导线的起晕场强居中,而根据实验数据所计算出

的子导线表面场强相对较大。

3.2 对地高度对子导线起晕范围的影响

首先利用文[19]中不同对地高度8分裂导线起晕电压公式: $u_{h-8}=535.7+37.3h$ kV,计算导线高度为17.5、19、20.5、22 m时,导线的起晕电压,从而求出子导线的起晕场强和子导线表面的起晕区域占整个导线的比例,见表3。

表3 不同对地高度时的 $\Delta\theta/360$

Tab. 3 $\Delta\theta/360$ of different phase height

项目	参数			
对地高度/m	17.5	19.0	20.5	22.0
计算电压/kV	1 189	1 244	1 300	1 356
1号子导线($\Delta\theta/360$)/%	25.6	28.9	34.4	37.8
3号子导线($\Delta\theta/360$)/%	22.2	27.8	32.2	35.6
5号子导线($\Delta\theta/360$)/%	28.9	32.2	37.8	40.0
7号子导线($\Delta\theta/360$)/%	31.1	33.3	38.9	42.2

从表3可以看到,随着导线对地高度从低到高,各子导线起晕区域逐渐增大。1号子导线表面起晕区域占整个导线的比例从17.5 m时的25.6%增加到22 m时的37.8%,增加了12.2%;其余各子导线也增加了12%左右。这是由于在子导线表面起晕场强不变的情况下,随着导线高度升高,起晕电压实验值升高,使得子导线表面的场强升高,从而达到起晕场强的点数增加,即起晕区域增大。

4 结论

1)模拟电荷法计算出的子导线表面电场分布和电荷量分布在导线表面成正弦变化,但其幅值略有不同,符合工程实际。

2)导线在同一对地高度,子导线位置不同,各组子导线各项数据并不相同,子导线位置越高表面场强、电荷量、起晕范围等各项数据越小,子导线位置越低各项数据越大;同一水平高度的两根子导线的各项数据都基本相等。

3)每根子导线表面在有限范围内场强达到临界场强,其起晕位置主要是在分裂导线中心与子导线中心连心线成对称分布的外表面上,且大概占整个导线表面的30%~40%,因此在计算电晕损耗时可以考虑这个范围的损耗。

4)子导线半径对起晕范围有一定影响,但不明显;导线对地高度对子导线表面起晕范围影响较大,对地高度越高子导线表面起晕范围越大。

参考文献:

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.

- [2] MARUVADA P S. Corona performance of high-voltage transmission lines[M]. UK: Research Studies Press, 2000.
- [3] 吴敬儒, 徐永喜. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.
WU Jing-ru, XU Yong-xi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4.
- [4] 周文俊, 阮江军, 邬雄. 特高压输电线路对电视信号接收的影响研究[J]. 中国电机工程报, 2001, 21(4): 83-87.
ZHOU Wen-jun, RUAN Jiang-jun, WU Xiong. Television interference from very high voltage transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 83-87.
- [5] 中村秋夫, 冈本浩, 曹祥麟. 东京电力公司的特高压输电技术应用现状[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 1-5.
AKIO N, HIROSHI O, CAO Xiang-lin. Introduction to 1 000 kV transmission technologies conducted by Tokyo Electric Power Company[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 1-5.
- [6] 国际大电网会议第 36.01 工作组. 输电线产生的电场和磁场[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [7] DESIDERI D, GUARNIERI M, POLI E. MV line electric field evaluation near a concrete pole[J]. IEEE Trans. on Magnetism, 2004, 40(2): 718-721.
- [8] 谈克雄, 薛家麟. 高压静电场数值计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [9] 罗真海, 陈勉, 陈维江, 等. 110 kV、220 kV 架空输电线路复合绝缘子并联间隙防雷保护研究[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 41-47.
LUO Zhen-hai, CHEN Mian, CHEN Wei-jiang, et al. Study on shunt gap lightning protection for 110 kV and 220 kV composite insulators[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 41-47.
- [10] 栗福衍. 高电压输电的环境保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [11] MORRIS R M, MARUVADA P S. Conductor surface voltage gradients on bipolar HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(6): 1934-1945.
- [12] ABDEL-SALAM M, EL-MOHANDES M T, EL-KISHKY H. Electric field around parallel DC and multi-phase AC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(6): 1145-1152.
- [13] SINGER H, STEINBIGLER H, WEISS P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(5): 1660-1668.
- [14] ABOU-SEADA M S, NASSAR E. Calculation of the potential gradient of twin-cylindrical bipolar conductors with various geometrical parameters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(4): 1822-1829.
- [15] ABOU - SEADA M S, NASSAR E. Digital computer calculation of the potential and its gradient of a twin cylindrical conductor[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1802-1814.
- [16] HAN Bao-liang, WEI Jia-ding, XU Yi-jun. The error evaluation of the electric field strength in the charge simulation method[C]//Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Tokyo: [s.n.], 1991: 933-937.
- [17] 杨保初, 刘晓波, 戴玉松. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [18] 张弦. 500 kV 线路电晕条件选择导线截面[J]. 云南电力技术, 2000, 28(1): 8-9.
ZHANG Xian. 500 kV transmission line corona conditions the wire cross section[J]. Yunnan Electric Power, 2000, 28(1): 8-9.
- [19] 万启发, 陈勇, 谢梁, 等. 特高压交流输电工程的电晕试验[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 14-16.
WAN Qi-fa, CHEN Yong, XIE Liang, et al. Corona experiment of apparatus in the UHV AC power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 14-16.
- [20] 能源部东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [21] 万启发, 陈勇, 谷莉莉, 等. 特高压交流输电工程导线截面及分裂形式研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 432-437.
WAN Qi-fa, CHEN Yong, GU Li-li, et al. Research on section and split way of conductors for UHV AC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 432-437.

黄宏佩(1986—), 男, 硕士, 主要从事电磁场数值计算方法及其应用、电磁兼容方面研究。

~~~~~  
**欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!**