

# 特高压同塔双回输电线路自然功率研究

黎景辉<sup>1</sup>, 郭琳霞<sup>2</sup>, 龚有军<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

2. 广东电网有限责任公司 教育培训评价中心, 广州 510520)

**摘要:** 提出“广义单回输电线路”的思路, 将同塔双回输电线路的同名相视为一相。以此为基础分析计算了相序排列方式、导线分裂间距、导线分裂数及导线截面等对特高压同塔双回交流输电线路自然功率的影响并提出了导线分裂间距的优化建议。该方法也可扩展到任意多回的情况。

**关键词:** 特高压; 同塔双回; 自然功率; 相序; 导线分裂间距; 分裂数; 导线直径

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8687(2016)02-0053-05

## Research on the Surge Impedance Load of UHV Double Circuit Transmission Lines on the Same Tower

LI Jinghui<sup>1</sup>, GUO Linxia<sup>2</sup>, GONG Youjun<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Education, Training and Evaluation Centre of GPCC, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** In this paper, we bring out the idea of “generalized single circuit transmission line”——Treating two phases which have the same electric degrees as one phase. On the basis of this idea, the relationship between the Surge Impedance Load of UHVAC transmission line and phase arrangement, Sub-conductor Bundle Spacing, Sub-conductor Number, Sub-conductor section was calculated and analyzed. The optimization of Sub-conductor Bundle Spacing was also suggested in this passage. Also, this method could be expanded to the situation of multi-circuits on one tower.

**Key words:** UHV; double circuit transmission on the same tower; surge impedance load; phase arrangement; sub-conductor bundle spacing; sub-conductor number; sub-conductor diameter

自然功率是指当线路产生的感性无功与容性无功数值相等时, 线路传输的功率<sup>[1]</sup>。自然功率是表征输电线路输送能力的一个重要参数<sup>[2]</sup>。

根据电磁场原理, 线路输送的功率实际上是以电磁波的形式传播<sup>[3]</sup>。对于同塔双回输电线路而言, 相序排列方式的不同必然影响到导线周围空间电场、磁场的分布, 因而会影响到自然功率。目前, 只有少量文献对同塔双回交流输电线路的自然功率计算方法进行了阐述<sup>[4]</sup>, 部分方法不能反映一回线路对另一回线路的影响。

为简化计算, 本文引入“广义单回输电线路”的

概念, 即将交流同塔双回线路的同名相视为同一相导线, 以此为基础可将双回路甚至多回路的自然功率计算归结为单回路计算, 进而分析计算交流特高压同塔双回路的自然功率。

## 1 计算方法

### 1.1 参数计算

计算输电线路自然功率的关键在于计算线路的阻抗参数及导纳参数。

目前, 输电线路的参数计算均将输电导线视为相互平行的多导体。以此为基础, J. R. Carson 在上世纪 20 年代就推出了完整的数学表达式<sup>[5]</sup>, 但是该数学表达式为含有复数的无穷积分, 不易求得。因此, 学者 A. Deri 与 A. Semlyen 采用复深度法对其进行了简化。对于一般的架空输电线路, 简

化方法带来的计算误差可以忽略<sup>[6]</sup>。因此, 本文采用复深度法计算平行多导体系统的阻抗参数。

复穿透深度计算公式见式(1)。

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}} \quad (1)$$

式中:  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  为角频率, 314;  $\mu_0$  为真空磁导率,  $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ;  $\sigma$  为大地电导率,  $\text{S/m}$ 。

导体  $k$  的自阻抗计算公式见式(2)。

$$Z_{kk} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + P)}{r_k} \quad (2)$$

式中:  $h_k$  为导线  $k$  的平均对地高度,  $\text{m}$ ;  $r_k$  为导线  $k$  的半径,  $\text{m}$ ;  $P$  为复穿透深度;  $\pi$  为圆周率。

导线  $k$  与导线  $m$  之间的互阻抗计算公式见式(3)。

$$Z_{km} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_k + h_m + 2P)^2 + d_{km}^2}}{\sqrt{(h_k - h_m)^2 + d_{km}^2}} \quad (3)$$

式中:  $h_k$ 、 $P$  及  $\pi$  的意义同上;  $h_m$  为导线  $m$  的平均对地高度,  $\text{m}$ ;  $d_{km}$  为导线  $k$  与导线  $m$  之间的水平距离,  $\text{m}$ 。

输电线路的电容矩阵可根据电位系数矩阵求逆获得。

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{C}$  为电容矩阵,  $\mathbf{P}$  为电位系数矩阵。

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{h_k}{r_k} \quad (5)$$

$$P_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{km}}{R_{km}} \quad (6)$$

式中:  $h_k$ 、 $r_k$ 、 $\pi$  的意义同前述;  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $D_{km}$  第  $k$  根导线与第  $m$  根导线在大地中的镜像的距离,  $\text{m}$ ;  $R_{km}$  第  $k$  根导线与第  $m$  根导线的距离,  $\text{m}$ 。

$$D_{km} = \sqrt{d_{km}^2 + (h_k + h_m)^2} \quad (7)$$

$$R_{km} = \sqrt{d_{km}^2 + (h_k - h_m)^2} \quad (8)$$

## 1.2 等效矩阵计算

为了方便等效矩阵的计算, 本文假设交流同塔双回输电线路中同名相导线的电压与电流完全相同。在此假设的基础上, 同塔双回输电线路的同名相可以视作广义的一相, 同塔双回输电线路也可视为广义的单回输电线路。通过求解广义单回输电线路的自然功率即可求得同塔双回输电线路的自然功率。

对于单回输电线路, 通过计算得到平行多导体的阻抗矩阵之后, 如果存在地线, 可以将矩阵分块:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{LL} \\ \mathbf{U}_{TT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{LL} & \mathbf{Z}_{LT} \\ \mathbf{Z}_{TL} & \mathbf{Z}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{LL} \\ \mathbf{I}_{TT} \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于地线, 有  $\mathbf{U}_{TT} = 0$ , 则有:

$$\mathbf{U}_{LL} = (\mathbf{Z}_{LL} - \mathbf{Z}_{LT}\mathbf{Z}_{TT}^{-1}\mathbf{Z}_{TL})\mathbf{I}_{LL} \quad (10)$$

则消去地线以后的等效阻抗参数矩阵为  $\mathbf{Z}_{LL} - \mathbf{Z}_{LT}\mathbf{Z}_{TT}^{-1}\mathbf{Z}_{TL}$ , 得到导线的阻抗参数矩阵以后, 将矩阵按相别分块。对于分裂导线, 每相各子导线的电压均相等, 则有:

$$U_1 = \dots = U_n = U_A \quad (11)$$

$$U_{n+1} = \dots = U_{2n} = U_B \quad (12)$$

$$U_{2n+1} = \dots = U_{3n} = U_C \quad (13)$$

又有各分裂导线的电流值相加等于相导线的电流值, 故有:

$$I_1 + I_2 \dots + I_n = I_A \quad (14)$$

$$I_{n+1} + I_{n+2} \dots + I_{2n} = I_B \quad (15)$$

$$I_{2n+1} + I_{2n+2} \dots + I_{3n} = I_C \quad (16)$$

将  $I_1$ 、 $I_{n+1}$ 、 $I_{2n+1}$  用  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  表示并进行变换, 则可以得到类似上式的分块矩阵。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_L \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (17)$$

经过矩阵消去之后即可得到等效的  $3 \times 3$  矩阵  $\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_4^{-1}\mathbf{Z}_3$ 。

对于电位系数矩阵, 由于有  $\mathbf{U} = \mathbf{P}\mathbf{Q}$ , 将式变化为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{LL} \\ \mathbf{U}_{TT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{LL} & \mathbf{P}_{LT} \\ \mathbf{P}_{TL} & \mathbf{P}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{LL} \\ \mathbf{Q}_{TT} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其余原理同阻抗矩阵的变化原理, 可得到等效电位系数矩阵, 对其进行求逆即可得到等效电容矩阵。

## 1.3 自然功率计算

根据上述计算方法, 可得到关于同塔双回输电线路的等效  $3 \times 3$  阻抗矩阵及导纳矩阵。分别取两个矩阵的虚部, 即可得到输电线路的等效  $3 \times 3$  电感矩阵及电容矩阵。将电抗矩阵及电纳矩阵进行如下变化, 即可得到线路的序参数矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$L_{sym} = A^{-1} \cdot L \cdot A \quad (20)$$

$$C_{sym} = A^{-1} \cdot C \cdot A \quad (21)$$

式中:  $A$  为转换矩阵;  $a$  为转换因子,  $a = -0.5 + j0.866$ ;  $j$  为虚数单位,  $j^2 = -1$ ;  $L$  为相电感矩阵, H/km;  $L_{sym}$  为序电感矩阵, H/km;  $C$  为相电容矩阵, F/km;  $C_{sym}$  为序电容矩阵, F/km。

波阻抗可如下表示:

$$Z_{\lambda} = \sqrt{L_{+}/C_{+}} \quad (22)$$

式中:  $Z_{\lambda}$  为波阻抗,  $\Omega$ ;  $L_{+}$  为线路单位长度正序电感, H/km;  $C_{+}$  为线路单位长度正序电容, F/km。

根据上式计算得到的波阻抗, 采用下式即可得到输电线路的自然功率。

$$P_{\lambda} = U^2/Z_{\lambda} \quad (23)$$

式中:  $U$  为线路额定电压, 本文取 1 000 kV;  $P_{\lambda}$  为线路自然功率, MW。

## 2 特高压同塔双回线路自然功率计算分析

### 2.1 线路参数

表 1 给出了交流特高压同塔双回输电线路的塔头示意图及导地线的挂点坐标。导线结构采用  $8 \times \text{LGJ-630/45}$ , 分裂间距 450 mm, 导线弧垂 20 m, 最小对地高度 21 m; 地线为两根 JLB20A-185。

表 1 导地线挂点坐标

Table 1 Coordinate of Phase Conductor and Ground Wire m

左侧上导线挂点	(-17.9, 76.96)
左侧中导线挂点	(-20, 55.06)
左侧下导线挂点	(-19, 33.86)
右侧上导线挂点	(17.9, 76.96)
右侧中导线挂点	(20, 55.06)
右侧下导线挂点	(19, 33.86)
左地线挂点	(-23.1, 92.86)
右地线挂点	(23.1, 92.86)

注: 纵坐标为导地线的平均对地高度。

### 2.2 相序排列方式的影响

#### 2.2.1 自然功率计算

理论上讲, 在确定将同塔双回路的两个回路左右布置后, 双回路的相序排列方式仍有 36 种。将自然功率相同的相序排列方式合并归类, 可以得到表 2 所示的五种相序排列方式。

计算了线路在表 2 所示相序排列方式下的自然

功率, 见表 3。从计算结果可知, 同塔双回输电线路在逆相序排列方式下最高, 达到了 8 786 MW。相比于自然功率最低的同相序排列方式高出 640 MW, 相当于两条 220 kV 单回输电线路的自然功率。

表 2 相序排列方式示意图

Table 2 Diagram of Phase Arrangement

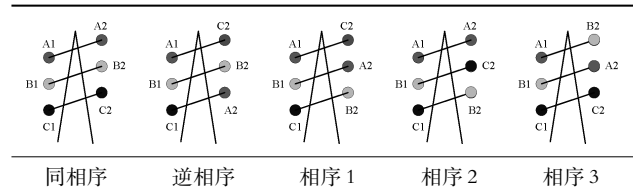


表 3 不同相序排列方式下的自然功率

Table 3 SIL of Different Phase Arrangement

相序	波阻抗/ $\Omega$	自然功率/MW	相对关系/%
同相序	122.8	8 146	+0.00
逆相序	113.8	8 786	+7.86
相序 1	114.5	8 732	+7.19
相序 2	119.4	8 376	+2.82
相序 3	118.5	8 437	+3.57

#### 2.2.2 计算方法验证

按照电磁场理论, 电力线路传输的能量可以看成是电场与磁场以“场”的形式在空间沿导线走向传播。因此, 线路的能量传输实际上并不是在导体内部, 而是在导线周围的空间内。在垂直于线路走向的平面内, 单位时间、单位面积内流过的能量可用波印亭矢量表示:

$$S = E \times H \quad (24)$$

式中:  $S$  为波印亭矢量;  $E$  为电场强度;  $H$  为磁场强度。

由于工频电磁波的波长为 3 000 km, 因此输电线路附近区域均属于近场范围。在该范围内, 导线周围空间的电场只和电压有关, 导线周围的磁场只和电流有关。因此, 当电压一定时, 导线表面场强高的相序排列方式的自然功率也高, 见图 1。

#### 2.3 分裂间距的影响

图 2 分析了分裂间距对自然功率的影响。根据计算结果, 分裂间距每增加 25 mm, 自然功率增加约 110 MW, 且增加趋势趋缓。这是因为分裂间距的增加减少了线路的电感, 增大了线路的等效对地电容, 因此降低了线路的特征阻抗, 提高了自然功率。

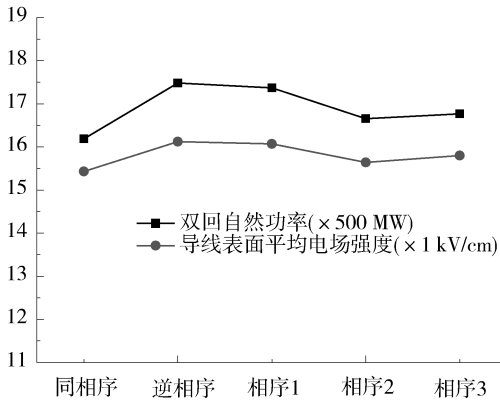


图1 自然功率与导线表面平均电场强度的关系

Fig. 1 Relationship Between SIL and Average Electricity Gradient on Conductors' Surface

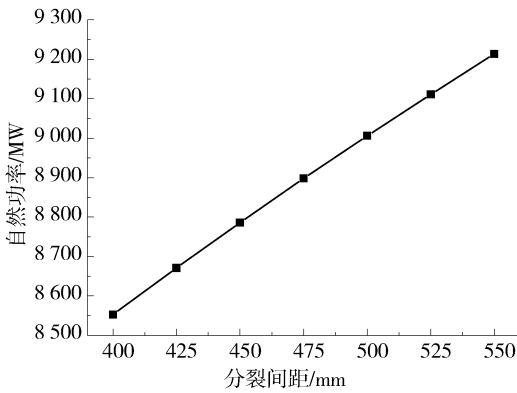


图2 分裂间距的与自然功率的关系

Fig. 2 Relationship Between SIL and Sub-conductor Bundle Spacing

## 2.4 导线分裂数的影响

图3分析了导线分裂数对自然功率的影响。从计算结果可知,随着分裂数的增加,自然功率增加,分裂数每增加1根,线路的自然功率增加约350 MW且增加趋势趋缓。

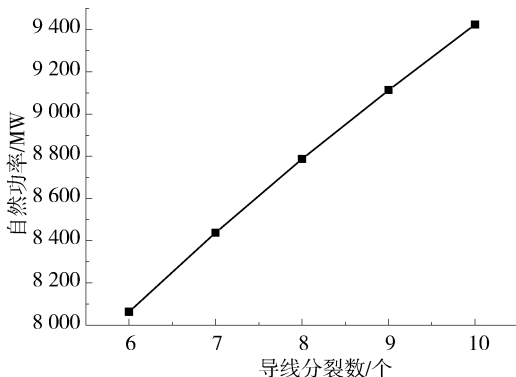


图3 导线分裂数与自然功率的关系

Fig 3 Relation Hip Between SIL and the Sub-conductor Number

同样的道理,导线分裂数增加后,线路的电感减小,电容增大,从而导致自然功率增加。虽然分裂数增加可以起到增加自然功率的效果,但是由于其涉及到的投资额增加很大,因此在工程设计中不应因为自然功率的原因而增加导线分裂数。

## 2.5 导线截面的影响

图4分析了导线截面对自然功率的影响。可知,由于导线截面对线路电感及电容的影响均很小,因此,随着导线截面的增加,线路的自然功率增加十分缓慢。加上导线截面增加将大幅度增加线路的工程投资,因此在工程设计中不应因为自然功率的原因而增加导线截面。

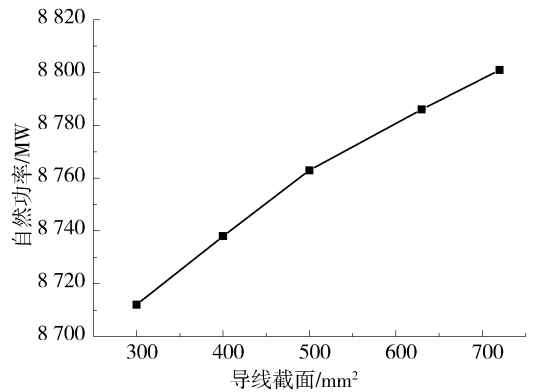


图4 导线截面与自然功率的关系

Fig. 4 Relation Hip Between SIL and the Conductor Section

## 2.6 提高自然功率技术手段分析

如第2.1节至第2.4节的分析,提高线路自然功率且相对较为经济的技术手段是优化线路的相序排列方式及增加分裂间距。在交流特高压线路的设计中,从防止雷击双回同时跳闸、降低线下的工频电场及工频磁场<sup>[7]</sup>、改善线路的不平衡度<sup>[8]</sup>等角度考虑,线路的相序一般采用逆相序,即可提高线路自然功率的相序排列方式。另外,分裂间距对线路电气及机械性能的影响也较为复杂。提高分裂间距,虽然可以增加线路的自然功率、降低次档距振荡的风险,但是也会使得导线表面电场强度增加,加大线路的电晕损失。以某地区为例,气象台站记录每年的晴天、雨天、雪天、雾凇天的小时数为7372 h、1042 h、182 h、164 h<sup>[9]</sup>,年降雨量为1000 mm。考虑导线发热对气象条件的修正<sup>[10]</sup>,每年的晴天、雨天、雪天、雾凇天的小时数为7860 h、702 h、182 h、16 h。根据表1的导地线位置及参数,采用逆相序排列方式,计算得到分裂间距对

电晕损失的影响,见图5。可见,随着导线分裂数增加,电晕损失加速增加。线路导线分裂间距每增加25 mm,电晕损失增加1.00~1.68 kW/km不等。由于交流输电线路的电晕损失与导线分裂数、子导线截面、天气分布、海拔高度等因素密切相关,因此是否通过增加导线分裂间距而增加线路自然功率需根据工程具体情况具体分析。若侧重点在于提高线路自然功率且线路的电晕损失增加较小,可以适当加大分裂间距;若自然功率对线路输送能力不起控制作用且分裂间距对电晕损失的影响较大,则可以适当缩小分裂间距,提高线路运行的经济性。

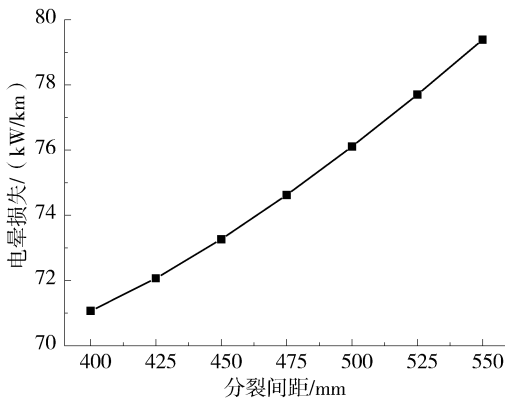


图5 分裂间距的与电晕损失的关系

Fig. 5 Relationship Between Corona-Loss and Sub-conductor Bundle Spacing

### 3 结论

本文基于“广义单回输电线路”的概念,对特高压同塔双回交流输电线路的自然功率进行了理论与计算,得到相关结论如下:

1) 逆相序的自然功率最高,同相序的自然功率最低,前者的自然功率较后者要提高约7.9%。

2) 分裂间距每增加25 mm,线路自然功率增大103~118 MW。增加线路分裂间距对线路一次投资影响较小,但是会增加线路的电晕损失,考虑到线路的长度较长,年累积的电晕损失仍相对可观。因此,需根据工程实际情况及设计侧重点在提高线路的输送能力与降低运行费用间取得合理的平衡。

3) 增加导线分裂数可大幅度增加线路自然功率而导线截面对自然功率基本无影响。由于增加导线分裂数及加大导线截面将加大增加线路的一次投资,因此不建议通过这两个技术手段增加同塔双回线路的自然功率。

#### 参考文献:

- [1] CARSON W T. 电力系统电压稳定 [M]. 王伟胜译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 阿历克山德罗夫. 超高压送电线路的设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 马信山, 张济士, 王平. 电磁场基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 吴维韩, 张榴芳. 电力系统过电压数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [5] CARSON J R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return [J]. Bell System Technical Journal, 1926(5): 539-554.
- [6] DERI A, TEVAN G, SENLYEN A, et al. A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return [J]. IEEE Transactions on Apparatuses and Systems, 1981, 100(8): 3686-3693.
- [7] 黄道春, 阮江军, 文武, 等. 特高压交流输电线路电磁环境研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(1): 6-11.  
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on Electromagnetic Environment of UHV AC Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 6-11.
- [8] 汪晶毅, 李志泰, 曹祥麟, 等. 1 000 kV 交流同塔双回线路电气不平衡度的研究 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(S1): 108-112.  
WANG Jingyi, LI Zhitai, CAO Xianglin, et al. Research on Electric Unbalance Degree of 1 000 kV AC Double-circuit on the Same Tower [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(S1): 108-112.
- [9] 刘文勋, 赵全江, 张翊, 等. 1 000 kV 特高压交流输电线路电晕损耗估算方法 [J]. 电力建设, 2011, 32(10): 27-29.  
LIU Wenxun, ZHAO Quanjiang, ZHANG Hu, et al. Study on the Corona Loss Estimate Under the 1 000 kV UHVAC Transmission Line [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(10): 27-29.
- [10] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.

(责任编辑 高春萌)