

文章编号:1671-6833(2011)02-0110-04

500 kV 同塔双回交流输电线路传输能量计算分析

李国栋¹, 褚旭², 汪泉弟², 刘芳¹

(1. 河南省焦作供电公司, 河南 焦作 454000; 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 400030)

摘要: 基于模拟电荷法、模拟电流法计算出导线周围空间的电场和磁场分布, 在此基础上计算出坡印亭矢量, 并得出导线周围坡印亭矢量的分布。从仿真结果中可以看到, 导线周围电磁能量密度较大。根据坡印亭矢量, 计算导线周围不同区域内导线的传输能量, 得到输电线路的有效能量传输通道和主要能量传输通道。同时, 通过改变导线的参数, 计算分析了其对能量传输的影响, 为高压输电线路的设计提供一定的参考。

关键词: 500 kV; 同塔双回; 电磁场; 坡印亭矢量; 能量传输

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A

0 引言

电磁场是一种特殊运动形态的物质, 电磁场具有能量, 赫兹实验证明了电磁场是能量的负荷者。坡印亭定理描述的是电磁场的能量守恒和转化定律, 其中的坡印亭矢量 S 表示在单位时间内通过垂直于能量传播方向的单位面积的电磁能量, 其方向就是电磁能量传播或流动的方向, 所以, 坡印亭矢量 S 也称为电磁能流密度。时变电磁场具有能量流动现象, 伴随着能量的传播, 形成电磁能流。但导体内部不能传输电磁能量, 电磁能量只能沿导体表面附近的空间传输, 进入导体的能量并不是用来传输能量, 而是导体消耗的能量^[1-3], 所以, 可以利用坡印亭矢量, 得到输电线路周围空间能量的分布及有效能量传输通道, 并优化输电线路, 计算能量传输效率和线路损耗等。

在目前的输电线路设计中, 导线的规格往往是由电晕性能决定的, 过高的电晕强度会带来严重的电晕, 并产生电晕损耗和无线电干扰以及可听噪声。评价输电线路设计方案是否合理的依据主要是安全性、环保性、易于维护性和寿命期内运行经济性等, 但是设计完工的输电线路的输电能力并不是很清楚。笔者从电磁能量传输的本质出发, 应用电磁场理论和数值分析方法, 分析了 500 kV 同塔双回交流输电线路的输电能力和其主要的输

电走廊, 为输电线路的优化设计提供一定的参考。

1 同塔双回交流输电线路计算模型

同塔双回 500 kV 三相架空输电线路采用四分裂导线, 分裂半径 $R' = 0.323$ m, 次分裂导线半径 $r = 0.0148$ m, 避雷线半径 $R'_l = 0.0054$ m, 以过两相的中垂线和地面构成坐标系, 如图 1 所示。

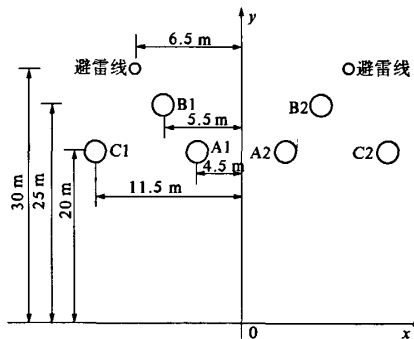


图1 500 kV 同塔双回输电线路结构示意图

Fig. 1 Configuration of 500 kV double circuit transmission lines in same tower

超高压输电线路为三相交流, 可以认为是正弦稳态线路。为便于分析, 对问题简化如下:

①由于输电线半径 $r \ll h$ (输电线架设高度), 可以认为超高压输电线建立的电磁场是准静电场, 并视为二维场; ②输电导线线径相同、无限长

收稿日期: 2009-09-12; 修订日期: 2010-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877081); 重庆市科技攻关计划资助项目(2007AC6019)

作者简介: 李国栋(1981-), 男, 河南焦作人, 工程师, 研究方向为电力系统运行调度, E-mail: liguodongcc@163.com.

并与大地平行(大地取平面),导线表面电位相等;③忽略杆塔及周边物体的影响和端部效应;④按照迭加原理计算同塔多回线路的电磁场^[4-5]。

2 导线周围电场、磁场和坡印亭矢量的计算

2.1 导线周围电场的计算

根据模拟电荷法基本理论,为提高计算的精度,在每一根次分裂导线和避雷线上距其中心0.6倍半径处均匀设置若干个模拟电荷,由模拟电荷方程组可以求出模拟电荷值 $[Q]$ ^[6-7]:

$$[P][Q] = [\varphi] \quad (1)$$

式中: $[Q]$ 为模拟电荷矩阵,由实部分量和虚部分量两部分组成: $Q = Q_R + jQ_I$; $[\varphi]$ 为各导线匹配点对地电压的列矩阵; $[P]$ 是导线的电位系数组成的 n 阶方阵(n 为模拟电荷个数),并且有

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \quad (2)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(x'_i - x_j)^2 + (y'_i - y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{ii}, \lambda_{ij}$ 为各导线的电位系数; ϵ_0 为空气介电常数; r 为子导线半径; (x_i, y_i) 为模拟电荷位置坐标; (x'_i, y'_i) 为模拟电荷镜像电荷位置坐标; h 为导线对地高度。

根据所求出的模拟电荷,空间任意一点的电场强度可根据叠加原理计算得出,在点 (x, y) 的电场强度实部、虚部分量可表示如下。

1) 实部电场强度的横向分量:

$$E_{xR} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_{Ri} \left(\frac{x - x_i}{L_i^2} - \frac{x - x_i}{L_i'^2} \right) \quad (4)$$

2) 虚部电场强度的横向分量:

$$E_{xI} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_{Ii} \left(\frac{x - x_i}{L_i^2} - \frac{x - x_i}{L_i'^2} \right) \quad (5)$$

3) 实部电场强度的纵向分量:

$$E_{yR} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_{Ri} \left(\frac{y - y_i}{L_i^2} - \frac{y - y_i}{L_i'^2} \right) \quad (6)$$

4) 虚部电场强度的纵向分量:

$$E_{yI} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_{Ii} \left(\frac{y - y_i}{L_i^2} - \frac{y - y_i}{L_i'^2} \right) \quad (7)$$

式中: (x_i, y_i) 为模拟电荷的坐标, $i=1, 2, \dots, n$, n 为模拟电荷数; L_i, L_i' 分别为模拟电荷及其镜像电荷到计算点的距离。

5) 该点的合成电场强度为

$$\vec{E} = (E_{xR} + jE_{xI}) \vec{e}_x + (E_{yR} + jE_{yI}) \vec{e}_y \quad (8)$$

500 kV 双回路同序布置时的导线周围电场

强度分布如图2所示。500 kV 同塔双回路导线周围电场呈椭球型对称分布,导线附近电场较大。

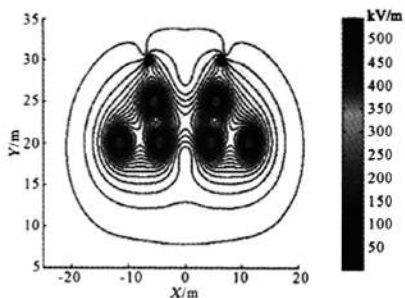


图2 500 kV 双回路导线周围电场分布图(单位:kV/m)

Fig. 2 Configuration/distribution curves of E around 500 kV double circuit transmission lines

2.2 导线周围磁场的计算

采用与计算电场强度相同的模型和坐标,由模拟电流法基本原理^[8],求得模拟电流后,根据迭加原理,用模拟电流可以计算场域中任意一点的磁场。由于输电线的电流采用的是相量形式,具有实部分量和虚部分量: $I = I_R + jI_I$,计算求得的磁感应强度也具有实部分量和虚部分量。

1) 实部磁感应强度的横向分量:

$$B_{xR} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_{Ri}(y_i - y)}{r_i^2} \quad (9)$$

2) 虚部磁感应强度的横向分量:

$$B_{xI} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_{Ii}(y_i - y)}{r_i^2} \quad (10)$$

3) 实部磁感应强度的纵向分量:

$$B_{yR} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_{Ri}(x - x_i)}{r_i^2} \quad (11)$$

4) 虚部磁感应强度的纵向分量:

$$B_{yI} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_{Ii}(x - x_i)}{r_i^2} \quad (12)$$

磁场强度与磁感应强度的关系为:

$$\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 \quad (13)$$

式中: μ_0 是真空中磁导率; (x, y) 是场强计算点的坐标; (x_i, y_i) 是模拟电荷的坐标; r_i 模拟电流到计算点的距离。

5) 计算点的合成场强为

$$\vec{B} = (B_{xR} + jB_{xI}) \vec{e}_x + (B_{yR} + jB_{yI}) \vec{e}_y \quad (14)$$

500 kV 双回路同序布置时的导线周围磁感应强度分布如图3所示,周围磁场呈椭球型对称分布,导线附近磁场较大。

2.3 导线周围坡印亭矢量的计算

$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ 称为坡印亭矢量,可以称为电磁能

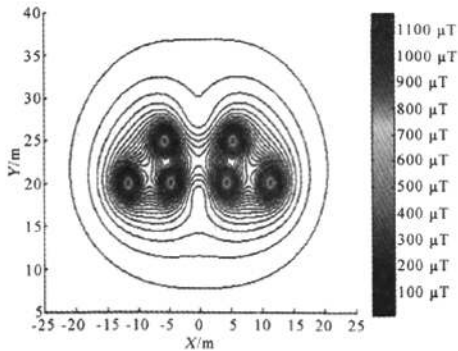


图3 500 kV 双回路导线周围磁场分布图(单位: μT)
Fig.3 Configuration/distribution curves of B around 500 kV double circuit transmission lines

量流动密度矢量,在方向和数值上反映了空间任意一点处电磁功率流动的特性,又可以称为电磁能量流动密度矢量^[1-2]。

根据式(8)、(13)和(14),

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} [(E_{xR}B_{yR} + B_{xL}E_{yL} - E_{xL}B_{yL} - B_{xR}E_{yR} + j(E_{xR}B_{yL} + E_{xL}B_{yR} - B_{xR}E_{yL} - B_{xL}E_{yR})] \vec{e}_z \quad (15)$$

计算采用二维坐标系,电场和磁场均只有 x , y 方向的分量, z 方向的分量为 0, 计算出导线周围的坡印廷矢量, 如上式所示, 只有 z 方向的分量, 即电能传输的方向。

500 kV 双回路同序布置时的导线周围坡印廷矢量分布如图 4 所示。500 kV 同塔双回路导线周围坡印廷矢量呈椭圆型对称分布, 导线附近坡印廷矢量较大, 随着空间点与输电线距离的增大, 坡印廷矢量减小, 电磁能量密度减小。对于高压输电线的能量传递来说, 导线周围存在一个主要的能量传输通道, 既线路所传输的电能基本都在这个通道内完成。

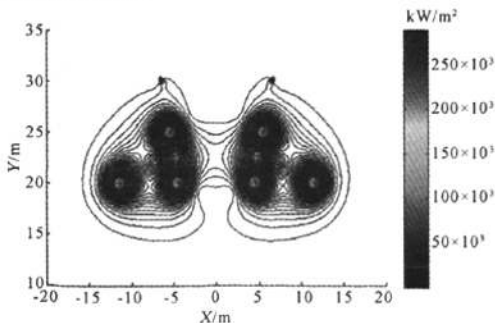


图4 导线周围坡印廷矢量轴向分布图(单位: kW/m^2)
Fig.4 Configuration/distribution curves of Poynting's vector around transmission lines

3 计算传输能量

根据复功率计算公式:

$$\vec{S} = -\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = P + jQ$$

可以计算出垂直于 z 轴方向的某一个截面区域内传输的有功功率 P , 再由有功功率 P 所占线路总传输自然功率的百分比 η , 可以确定其主要能量传输通道和有效能量传输通道。在不同的截面区域内传输能量的大小, 如表 1 所示。

表1 500 kV 双回路不同区域传输功率

Tab.1 Transport power of 500 kV double circuits in different areas

计算区间	传输功率/(10^6 kW)	$\eta/\%$
[-13 13 18 27]	1.580 9	79.04
[-14 14 17 28]	1.665 9	83.03
[-21 21 10 35]	1.792 0	89.60
[-23 23 8 37]	1.798 8	89.94
[-24 24 7 38]	1.801 2	90.06
[-25 25 5 40]	1.804 2	90.21
[-30 30 0 45]	1.809 1	90.46

从表 1 可以看出, 在距离边缘导线(或上下导线)3 m 的范围内, 其传输能量已达到总传输能量的 80% 以上, 这个通道可以称为线路的主要能量传输通道; 在距离边缘导线(或上下导线)13 m 的范围内, 其传输能量已达到总传输能量的 90%, 再增大计算范围, 传输能量增加不明显, 这个通道可以称为线路的有效能量传输通道和图 4 所示情况一致。

4 影响输电线路能量传输的主要因素

4.1 导线对地高度的影响

表 2 给出了 500 kV 同塔双回交流高压输电线路导线对地高度从 14 m 到 22 m 不同情况下, 主要能量传输通道内传输能量的大小。由表 2 可见, 随着导线对地高度的减小, 在主要能量传输通道内, 线路的传输能量变化并不明显。但随着导线对地高度的减小, 地面场强将大幅增加。

4.2 分裂导线根数的影响

表 3 给出了 500 kV 同塔双回交流高压输电线路相导线分裂根数分别为 2, 3, 5, 6 时主要能量传输通道内传输能量的大小。由表 3 可见, 增加导线的分裂根数, 导线主要能量传输通道内的传输能量有明显的增加, 可以通过增加次导线的分裂根数来提高导线的输电能力。

表 2 导线不同对地高度对传输功率的影响
Tab.2 Transport power of 500 kV double circuits
at different heights

高度/m	14	16	18	22
$P/(10^6\text{ kW})$	1.666 5	1.666 6	1.666 5	1.666 6

表 3 导线不同分裂根数对传输功率的影响
Tab.3 Transport power of 500 kV double circuits
at different number of bundled conductor

分裂根数	2	3	5	6
$P/(10^6\text{ kW})$	1.285 2	1.475 7	1.674 8	1.721 1

4.3 分裂间距的影响

表 4 给出了 500 kV 同塔双回交流高压输电线路相导线分裂间距不同时,主要能量传输通道内传输能量的大小.由表 4 可见,主要能量传输通道内的传输能量随分裂间距的增大而增大.

表 4 导线不同分裂间距对传输功率的影响
Tab.4 Transport power of 500 kV double circuits
at different bundle spacing

分裂间距/m	0.30	0.38	0.40	0.45
$P/(10^6\text{ kW})$	1.551 2	1.676 0	1.702 0	1.721 1

5 结论

对于 500 kV 同塔双回交流高压输电线路,只改变某一个线路参数对线路的能量传输影响分析结果如下:

- (1)增加子导线分裂根数,增大导线分裂半径,可以增加线路的输电能力,与文献[9]的结论一致;
- (2)相导线对地高度对线路的输电能力影响不大,可根据线路设计规范选取.

参考文献:

[1] 俞集辉. 电磁场原理[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2007;148 - 156.

[2] 孙同明,邱淑荣,徐永安. 坡印亭矢量与电磁能量传输[J]. 信息工程大学学报,2004,5(1):95 - 97.

[3] EMANUEL A E. Poynting vector and the physical meaning of nonactive powers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (4): 1457 - 1462.

[4] 强生泽. 220kV 同塔双回输电线空间工频电磁场理论计算[J]. 高电压技术,2004,30(5):45 - 46.

[5] 李世作. 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电场计算[J]. 高电压技术,2009,35(8):1946 - 1947.

[6] 邹雄,万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京:中国电力出版社,2009;51 - 66.

[7] 秦跃进. 不规则排列相分裂导线表面电场强度的计算方法[J]. 华中电力,1992,5(3):23 - 27.

[8] YAO De-gui, LI Bing, DENG Jun, et al. Power frequency magnetic field of heavy current transmit electricity lines based on simulation current method[C]// IEEE Automation Congress, Hawaii: IEEE press, 2008;1 - 4.

[9] 邵方殷. 500 kV 紧凑型线路导线结构的选型和有关特性[J]. 中国电力,1996,29(10):3 - 7.

Calculating and Analysis on Energy Transmission of 500 kV Double Circuit
AC Transmission Lines in Same Tower

LI Guo-dong¹, CHU Xu², WANG Quan-di², LIU Fang¹

(1. Henan Province Jiaozuo Electric Power Company, Jiaozuo 454000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A novel method to analyze the energy transmission of the HV transmission lines is presented in the paper based on the Poynting Vector (PV) distribution around the transmission lines, which show that electromagnetic energy density around the lines is larger. The charge simulation method and current simulation method were used to compute the distribution of the PV distribution around the transmission lines, and the influence on the PV distribution caused by changing the line parameters was investigated. The result can be a reference for the design of the high-voltage transmission lines.

Key words: 500 kV ;double circuits on same tower; electromagnetic field; Poynting's vector; energy transmission