

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:周亮,王斌,孙文杰,马梓淇.密集输电通道内同塔及并行线路电磁场分布特性研究[J].西安理工大学学报,2025,41(3):442-450.

ZHOU Liang, WANG Bin, SUN Wenjie, MA Ziqi. Study on the distribution characteristics of electromagnetic fields for same tower and parallel lines in dense electric transmission channel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2025, 41(3): 442-450.

密集输电通道内同塔及并行线路 电磁场分布特性研究

周亮¹, 王斌², 孙文杰³, 马梓淇⁴

(1. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200002; 2. 国家电网 国网上海市电力公司, 上海 200122;

3. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

4. 陕西恒巨软件科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 密集输电通道内线路工况复杂导致电磁场易互相耦合叠加, 需要深入分析不同电压下的电磁场分布特性, 以评估其对周边环境的影响。本文采用等效公式法并结合电磁场矢量叠加原理, 通过自编程序深入研究分析了密集输电通道内 110~1 000 kV 输电线路在各种复杂工况下的电磁场分布特性。结果表明: 同等条件下单回路地面电磁场强度大于双回路; 提高导线对地距离可降低电磁场强度, 但效果随对地距离增大而减弱; 并行线路采用内侧逆相序布置会使电磁场分布特性更优; 同塔混压四回路在进行电磁场计算时应对所有回路进行整体建模分析。本文研究成果可为后续密集输电通道内的线路设计以及电磁场评估提供参考。

关键词: 密集输电通道; 工频电场强度; 工频磁感应强度; 同塔四回路

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2025)03-0442-09

Study on the distribution characteristics of electromagnetic fields for same tower and parallel lines in dense electric transmission channel

ZHOU Liang¹, WANG Bin², SUN Wenjie³, MA Ziqi⁴

(1. State Grid Shanghai Electric Power Corporation Economic and Technological Research Institute,

Shanghai 200002, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, State Grid,

Shanghai 200122, China; 3. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Shaanxi Hengju

Software Technology Co., Ltd, Xi'an 710075, China)

Abstract: Due to the complex line working conditions in dense transmission channels, electromagnetic fields are easily coupled and superimposed. It is necessary to analyze the electromagnetic field distribution characteristics at different voltages to evaluate its impact on the surrounding environment. In this paper, the electromagnetic field distribution characteristics of 110~1 000 kV transmission lines in dense transmission channels under various complex working conditions are studied by the equivalent formula method and the electromagnetic field vector superposition principle. The results show that the ground electromagnetic field intensity of single circuit is greater than that of double circuit under the same conditions. The electromagnetic field intensity can be

收稿日期: 2023-08-22; 网络首发日期: 2024-03-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240329.1700.002>

基金项目: 国家电网公司科学技术资助项目(520900220012)

第一作者: 周亮, 男, 高级工程师, 研究方向为电网工程数字化。E-mail: 13764345671@163.com

通信作者: 孙文杰, 男, 博士, 讲师, 研究方向为软体机器人技术、计算力学等。E-mail: sunwenjie2017@xaut.edu.cn

reduced by increasing the distance between the conductor and the ground, but the effect decreases with the increase of the distance to the ground. The electromagnetic field distribution characteristics of parallel circuits are better when the interior inverse phase sequence layout is adopted. In the calculation of electromagnetic field in the same tower mixed-pressure four circuits, a whole modeling analysis of all circuits should be carried out. The research results in this paper can provide reference for the subsequent line design and electromagnetic field evaluation in dense transmission channels.

Key words: dense electric transmission channels; power frequency electric field intensity; power frequency magnetic induction intensity; four-circuit in the same tower

随着我国经济的持续增长,社会对电力的需求不断攀升,推动了电网建设的日益密集化,进而在多地构成了密集输电通道。所谓密集输电通道,即指输电走廊宽度限制在 600 m 以内,且包含特高压或超重 500 kV 及以上输电线路的区域。相较于传统的单一输电线路通道,密集输电通道内的线路电压等级更高,运行时各回路间及线路间的电磁场交互作用显著增强,形成更为复杂的电磁环境。这种复杂的电磁场环境对周边电子设备的正常运行、人体健康以及生态环境均可能产生深远且不可逆转的影响^[1]。鉴于上述背景,对密集输电通道的电磁场进行深入分析,并研究不同电压等级下的电磁场分布特性显得尤为重要。这不仅能为未来密集输电通道内的线路设计提供科学依据,也能为电磁场影响的评估工作提供参考。

密集输电通道因其狭窄的宽度和多种电压等级,出现了多线路并行、同塔多回路以及及混压等复杂运行工况,使得对其电磁场的研究成为行业内的难点与重点问题。目前,针对输电线路电磁场的计算方法主要包括有限元法和经验公式法。尽管有限元法在部分研究中取得了良好效果^[2-6],但其主要适用于较为简单的线路配置,如单回或同塔双回线路^[7]。对于密集输电通道内更为复杂的线路配置,有限元法的应用面临计算复杂度高和工作量大的限制。

相比之下,经验公式法在计算效率和应用场景的广泛性上表现出优势。已有研究采用此方法对同塔四回输电线路等多种复杂场景下的电磁场进行了计算和分析^[8-9],并探讨了相序布置、杆塔高度等因素对电磁场的影响^[10-15]。此外,通过与实际测量结果的对比验证,经验公式法在计算电磁场方面的准确性和可靠性得到了确认。

尽管国内外学者在输电线路的电磁场分析方面已取得了丰硕的研究成果^[2-17],但现有研究大多集中于单一电压等级、同塔双回或单一线路并行等相对简单的工况。对于密集输电通道中更为复杂的工

况,如多电压等级线路并行、同塔多回路及同塔混压等,其电磁场水平和影响规律的研究仍显不足。因此,本研究采用经验公式法,并结合《环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020》中的计算模型,通过自编程序实现对密集输电通道在复杂工况下电磁场的计算与分析,旨在为后续密集输电通道的输电线路设计以及电磁场评估提供参考。

1 基本假设与计算方法

1.1 计算模型假设

本文采用等效公式法对密集输电通道内的电磁场进行计算分析,现对线路计算模型做如下假设:

- 1) 大地为均匀、表面无起伏、且与导线平行的无穷大平面;
- 2) 大气空间是均匀无损的;
- 3) 同塔的导线或并行线路间的导线为相互平行且与地面平行的无限长光滑圆柱形导体;
- 4) 忽略导线支撑物(包括铁塔、金具和绝缘子等)及任何其他邻近物体的影响;
- 5) 导线间的距离至少比导线的半径大一个数量级;
- 6) 导线间水平间距为常数,导线对地距离为平均对地距离或弧垂最低点对地距离。

基于上述假设,可以将问题等效为二维断面的电磁场计算问题,见图 1。

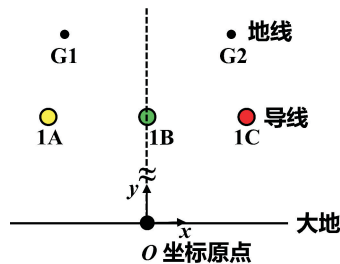


图 1 线路电磁场等效计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent calculation model for line electromagnetic field

1.2 工频电场强度计算

工频电场强度采用《环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020》中附录 C 的方法进行计算^[18], 分为两部分。

1.2.1 单位长度导线上等效电荷的计算

等效电荷由矩阵方程(1)求得。

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{U} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 为各导线上等效电荷的单列矩阵; $\mathbf{U}$ 为各导线对地电压的单列矩阵, 可由输电线的电压和相位确定, 从环境保护考虑以额定电压的 1.05 (系统最高运行电压) 倍作为计算电压; $\boldsymbol{\lambda}$ 为各导线的电位系数组成的 m 阶方阵 (m 为导线数目)

1.2.2 等效电荷产生的电场计算

在进行密集输电通道电磁场计算时应考虑多条导线同时作用的耦合影响。文献^[13, 19-21]开展过相关研究并将理论计算结果与实测结果进行了对比, 结果表明理论计算结果与实测结果误差较小, 采用矢量叠加原理计算是可行的, 可以满足工程实际需求, 因此, 本文采用矢量叠加原理计算密集输电通道内的电磁场。

二维空间任意一点的电场强度 E_x 和 E_y 可根据叠加原理计算得出。

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{x-x_i}{L_i^2} - \frac{x-x_i}{(L'_i)^2} \right) \quad (2)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{y-y_i}{L_i^2} - \frac{y+y_i}{(L'_i)^2} \right) \quad (3)$$

式中: E_x 、 E_y 分别为二维空间任一点处的电场强度水平及垂直分量; x 、 y 分别为二维空间任意一点的坐标; x_i 、 y_i 为导线 i 的坐标; ϵ_0 为空气介电常数; m 为导线数目; Q_i 为导线 i 上的等效电荷; L_i 、 L'_i 分别为导线 i 及其镜像至计算点的距离。

1.3 工频磁感应强度计算

工频磁感应强度采用《环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020》中附录 D 的方法进行计算^[18]:

$$H = \frac{\mu I}{2\pi \sqrt{h^2 + L^2}} \quad (4)$$

式中: H 为空间任一点处的磁场强度; I 为通过导线的电流; μ 为空气磁导率; h 为预测点与导线的垂直距离; L 为预测点与导线的水平距离。

由矢量叠加原理知, 多根导线在空间任一点产生的磁场强度等于每一根导线单独作用时在这一点产生磁场强度的叠加, 由式(4)计算出线路各相导线所产生的空间磁场强度, 并分别在平行于地面和垂直于地面的方向进行投影, 从而可采用矢量叠加进

行并行线路的空间磁场强度计算^[19]。

2 同塔单/双回路电磁场分析

2.1 计算参数

为了对不同电压等级下密集输电通道内的电磁场进行统一对比分析, 本文查阅了 110 kV 至 1 000 kV 范围内多个线路工程的设计条件, 并从中选取了具有代表性的设计条件作为本文计算分析的参考。表 1 详细列出了本文在计算过程中统一采用的计算参数, 其中导线对地距离在非居民区的部分严格遵循规范^[22]中的要求, 针对同塔混压的情况, 以最下层回路对应电压等级的对地距离作为标准。

表 1 各电压等级计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of different voltage levels

电压等级/kV	110	220	330	500	750	1 000
单回输送容/MW	50	200	400	1 000	2 300	5 000
功率因数	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
计算电压/kV	115.5	231.0	346.5	525.0	787.5	1 050.0
分裂数	1	2	2	4	6	8
分裂间距/mm	/	400	400	400	400	400
导线直径/mm	23.9	23.9	26.8	30.0	30.0	33.8
地线直径/mm	13.0	14.2	15.7	15.7	15.7	16.0
过非居民区导线 对地距离 h /m	6.0	6.5	7.5	11.0	15.5	20.0

图 2 展示了单回路和双回路导地线的位置示意图, 其中导地线相对于铁塔中心呈左右对称分布。单回路导线采用水平排列方式布置, 双回路导线采用垂直逆相序排列方式布置。表 2 详细列出了单回路中 1C 相导线和 G2 地线的位置参数, 以及双回路中 2A、2B、2C 相导线和 G2 地线的位置参数。

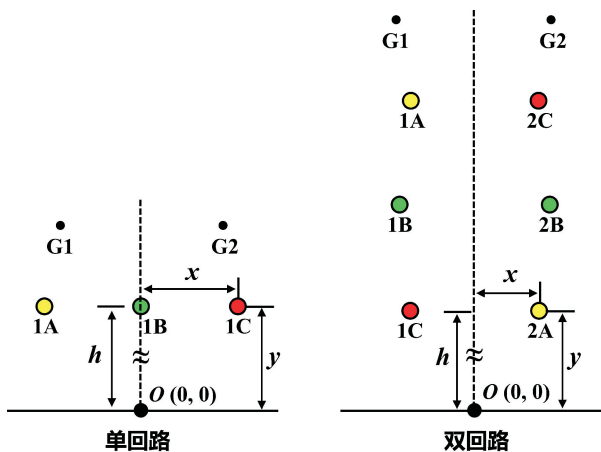


图 2 单回路及双回路导地线位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the wires location of single-circuit and double-circuit

表2 不同电压等级导线位置
Tab.2 Wire position of different voltage levels

导线	不同电压等级导线位置坐标/m					
	110	220	330	500	750	1 000
单回路	1C-x	6.0	7.4	9.0	11.5	17.7
	1C-y	h	h	h	h	h
	G2-x	5.1	5.8	7.4	9.7	14.9
	G2-y	$5.5+h$	$7.0+h$	$7.9+h$	$9.9+h$	$12.4+h$
双回路	2A-x	3.4	5.4	8.0	9.2	13.4
	2A-y	h	h	h	h	h
	2B-x	4.0	6.9	9.5	11.2	15.4
	2B-y	$3.7+h$	$6.0+h$	$9.0+h$	$11.5+h$	$15.0+h$
	2C-x	3.4	5.9	7.5	8.6	13.0
	2C-y	$7.7+h$	$12.5+h$	$18.0+h$	$23.7+h$	$28.5+h$
	G2-x	2.8	7.1	9.7	11.4	15.9
	G2-y	$11.7+h$	$17.0+h$	$23.5+h$	$31.7+h$	$38.2+h$
	G2-y	$5.5+h$	$7.0+h$	$7.9+h$	$9.9+h$	$12.4+h$
	G2-y	$5.5+h$	$7.0+h$	$7.9+h$	$9.9+h$	$12.4+h$

2.2 同塔单/双回路过非居民区时的电磁场分析

本文研究的输电线路的输送频率为 50 Hz, 根据《环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020》中的要求, 50 Hz 对应的电场强度为 4 kV/m, 磁感应强度为 $100 \mu\text{T}^{[23]}$ 。本文将导线对地距离按照表 2 中的过非居民区进行取值, 对 110~1 000 kV 单回路以及双回路距离地面 1.5 m 高位置处的电磁场进行分析。

图 3 分别给出了单回路和双回路的工频电场强度计算结果曲线图, 其中水平坐标轴代表距离线路中心 O 的水平距离 x (下同)。从图 3 中可以看出 110~1 000 kV 单回路工频电场强度最大值分别为 2.63 kV/m、6.77 kV/m、8.53 kV/m、9.36 kV/m、10.4 kV/m、10.96 kV/m, 双回路工频电场强度最大值分别为 1.98 kV/m、6.03 kV/m、8.25 kV/m、8.94 kV/m、9.61 kV/m、9.98 kV/m。可见这在种导线排列情况下, 电压等级相同的单回路较双回路工频电场强度最大值更大, 针对 1 000 kV 可增加 10% 左右。

110 kV 单回路和双回路在距离地面 1.5 m 高度位置处的工频电场强度均小于 4 kV/m。220~1 000 kV 单回路距线路中心 O 点分别大于 12.5 m、16.5 m、24 m、36.5 m、48 m 时工频电场强度小于 4 kV/m。220~1 000 kV 双回路距线路中心 O 点分别大于 9 m、14 m、19 m、28 m、36 m 时工频电场强度小于 4 kV/m。可见这种导线排列情况下, 电压

等级相同的单回路较双回路, 工频电场强度 4 kV/m 控制范围更大, 针对 1 000 kV 可增加 30% 左右。

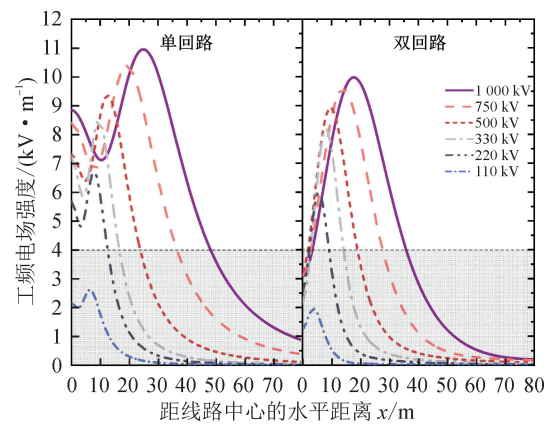


图3 不同电压等级工频电场强度
Fig.3 Power frequency electric field intensity with different voltage levels

图 4 分别给出了 110~1 000 kV 单回路和双回路的工频磁感应强度计算结果。从图中可以看出, 电压等级越高输送容量越大, 工频磁感应强度整体上也随之增大, 但工频磁感应强度整体上均小于 $100 \mu\text{T}$ 。

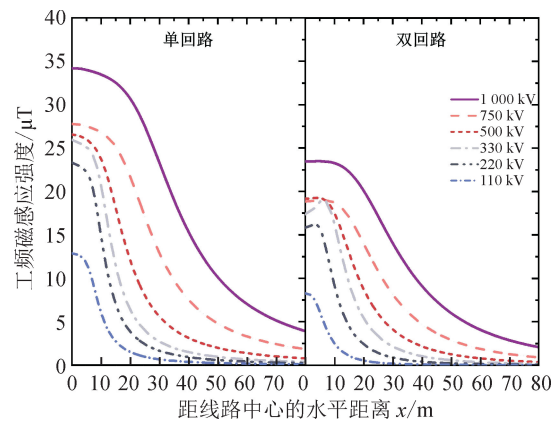


图4 不同电压等级工频磁感应强度
Fig.4 Power frequency magnetic induction intensity with different voltage levels

2.3 工频电场强度 4 kV/m 等值线分析

根据环保拆迁原则, 线路走廊两侧距边导线对地投影 6.0 m 以外常年住人的房屋不满足场强要求 (离地 1.5 m 处工频电场强度大于 4 kV/m) 的应予以拆迁。在其他条件相同的情况下, 输电线路导线对地距离越大输电线下的电场强度越小。在电场强度不满足要求的区域, 工程实践中可以通过增大输电线路导线对地距离来降低输电线路对周围环境的影响, 因此分析不同电压等级工频电场强度 4 kV/m 等值线范围以及分布特性对于划定输电线路周围拆迁范围以及导线对距离设计至关重要。

图 5(a)以 750 kV 为例给出了导线对地距离为 25 m 时的工频电场强度分布云图,工况 A 和工况 B 分别代表双回路以及单回路。从图中可知,在导线对地距离为 25 m 时双回路和单回路地面工频电场强度 4 kV/m 的分界点分别为距线路中心 18.5 m 和 31.5 m 处。

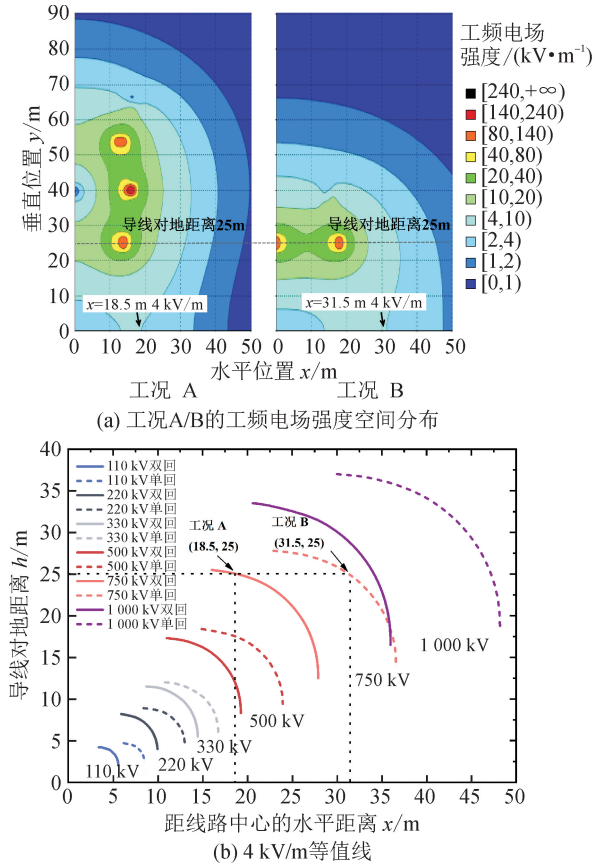


图 5 不同电压等级单回路及双回路工频电场强度 4 kV/m 等值线

Fig. 5 4 kV/m power frequency electric field intensity contour line with different voltage levels

图 5(b)给出了不同电压等级单回路以及双回路工频电场强度 4 kV/m 等值线。从图中可知,随着电压等级越高等值线的包络范围越大。导线对地距离的增大与 4 kV/m 等值线范围的缩小呈现非线性关系,当导线对地距离较小时,提高导线对地距离对缩小线路两侧 4 kV/m 等值线范围作用不大,随着导线对地线高的逐渐增大,线路两侧 4 kV/m 等值线范围缩小的速度则逐渐增大。水平排列的单回路要比垂直逆相序排列的双回路的工频电场强度 4 kV/m 等值线范围大,同等对地距离下线路两侧需要拆迁的走廊宽度也就越宽。当 110 kV~1 000 kV 单回路导线对地距离分别大于 4.7 m、8.9 m、12 m、18.4 m、27.8 m、37 m,双回路导线对地距离分别大于 4.2 m、8.2 m、11.5 m、17.3 m、25.5 m、33.5 m 时线路下方离地 1.5 m 处工频电场强度均小于 4 kV/m。

2.4 不同导线对地距离下的电磁场分析

为了横向对比不同电压等级不同导线对地距离下的电磁场分布特性,本文分别计算了 110~1 000 kV 不同电压等级单/双回路不同导线对地距离下地面上方离地 1.5 m 高度位置处的工频电场强度以及工频磁感应强度最大值,结果见图 6 和图 7。从两图中可以看出,随着导线对地距离的增加,离地 1.5 m 处的电磁场强度最大值呈现减小趋势。在导线对地距离较低时,增加导线的高度会导致电磁场强度最大值显著降低。然而,当导线对地距离继续增大时,电磁场强度最大值的降低速率明显减缓。单回路下的工频电场强度及磁感应强度的最大值均高于双回路配置下的最大值。

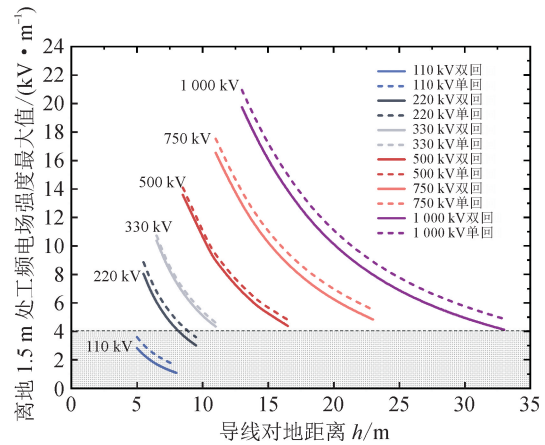


图 6 不同电压等级不同导线对地距离下的工频电场强度最大值

Fig. 6 Maximum power frequency electric field intensity of different wire distances to ground of different voltage levels

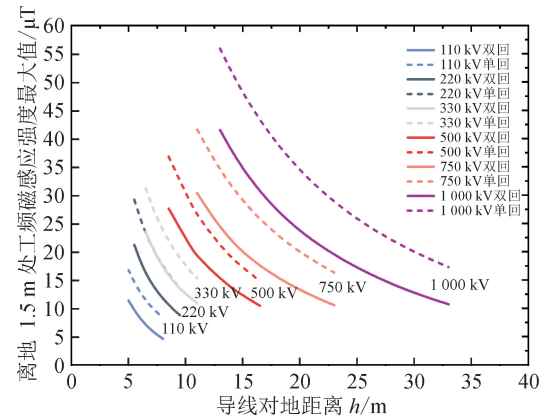


图 7 不同电压等级不同导线对地距离下的工频磁感应强度最大值

Fig. 7 Maximum power frequency magnetic induction intensity of different wire distances to ground of different voltage levels

3 线路并行时的电磁场分析

在密集输电通道中多线路并行是一种常见情

况。图 8 给出了单回线路并行示意图,内侧同相序指内侧相邻两相为相同的相序,内侧逆相序指内侧相邻的两相为相逆的相序。图中 d 为两线路的并行距离, M 点位于两并行线路的中间且距离地面 1.5 m 高度的位置处。

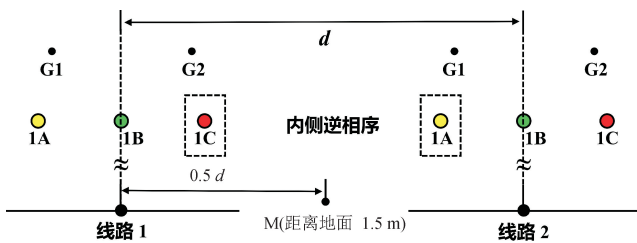


图 8 线路并行示意图

Fig. 8 Schematic diagram of parallel

对 110~1 000 kV 单回路并行时内侧同相序与逆相序排布下 M 点的工频电场强度进行计算分析,结果见图 9。结果表明,内侧同相序排布下 M 点的工频电场强度高于内侧逆相序排布,在线路并行距离较近时尤为显著。随着线路并行距离的逐渐增大,两种排布方式下 M 点的工频电场强度均呈现降低趋势,但内侧同相序的降低幅度更为显著。在进行线路并行设计时,推荐采用内侧逆相序的布置方式。

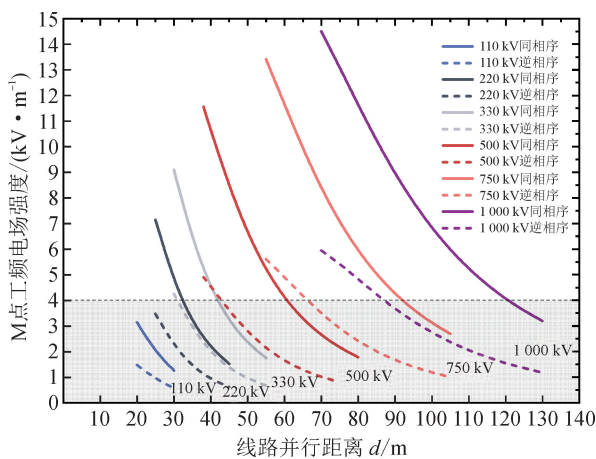


图 9 不同电压等级单回路内侧同相序和逆相序排布下 M 点处工频电场强度

Fig. 9 Power frequency magnetic induction intensity at point M in the inverting and reverse phase sequence arrangement of single-circuit of different voltage levels

4 同塔混压四回路电磁场分析

在密集输电通道内,由于走廊用地紧张经常会出现同塔混压四回路的情况,典型的组合包括 1000 kV 与 500 kV、750 kV 与 330 kV 以及 500 kV 与 220 kV 等。本文对上述同塔混压四回路的电磁场

分布特性进行研究分析,导地线的位置及示意图见图 10 和表 3。在分析中导线对地距离 h 的取值依据非居民区的要求执行。

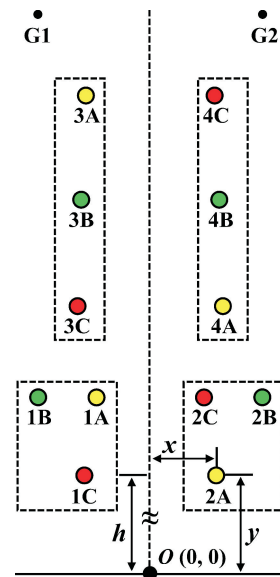


图 10 同塔混压四回路导地线位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the wires location of mixed voltage four-circuit line

表 3 同塔混压四回路导地线位置

Tab. 3 Wires location of mixed voltage four-circuit line

导地线	不同电压等级导地线位置坐标/m		
	1 000 与 500	750 与 330	500 与 220
2A-x	12.5	9.3	7.0
2A-y	h	h	h
2B-x	21.6	15.0	12.7
2B-y	$15.0+h$	$10.6+h$	$7.9+h$
2C-x	10.4	7.3	6.0
2C-y	$15.0+h$	$10.6+h$	$7.9+h$
4A-x	14.0	10.2	8.5
4A-y	$32.7+h$	$23.2+h$	$18.1+h$
4B-x	13.2	9.6	10.0
4B-y	$53.0+h$	$40.2+h$	$30.3+h$
4C-x	12.4	9.0	8.5
4C-y	$73.3+h$	$57.2+h$	$43.3+h$
G2-x	22.1	14.3	12.6
G2-y	$99.7+h$	$74.6+h$	$51.0+h$

关于同塔混压四回路的最优相序排布,已有众多学者进行了深入研究^[24-25]。本文参考上述文献中的相序排布方式,采用图 10 的相序排布方案进行计算分析。其中回路 3 和回路 4 采用垂直排列方

式,位于上部位置,相序采用逆相序布置,对应混压中的较高电压等级。回路 1 和回路 2 采用三角排列方式,位于下部位置,相序采用异相序布置,对应混压中的较低电压等级。为确保结构的对称性,不同回路的导地线相对于铁塔中心均采用左右对称的布置方式。表 3 详细列出了 2A、2B、2C、4A、4B、4C 相导线以及 G2 地线的位置参数。在进行电磁场计算

时,不同电压等级的计算参数均以表 1 中所给出的数据为准。

图 11 和图 12 中分别给出了 1 000 kV 与 500 kV、750 kV 与 330 kV、500 kV 与 220 kV 同塔混压四回路的工频电场强度以及工频磁感应强度空间分布图。从图中可以看出,三种塔型因相序布置方式相同,所以整体的空间分布规律大致相同。

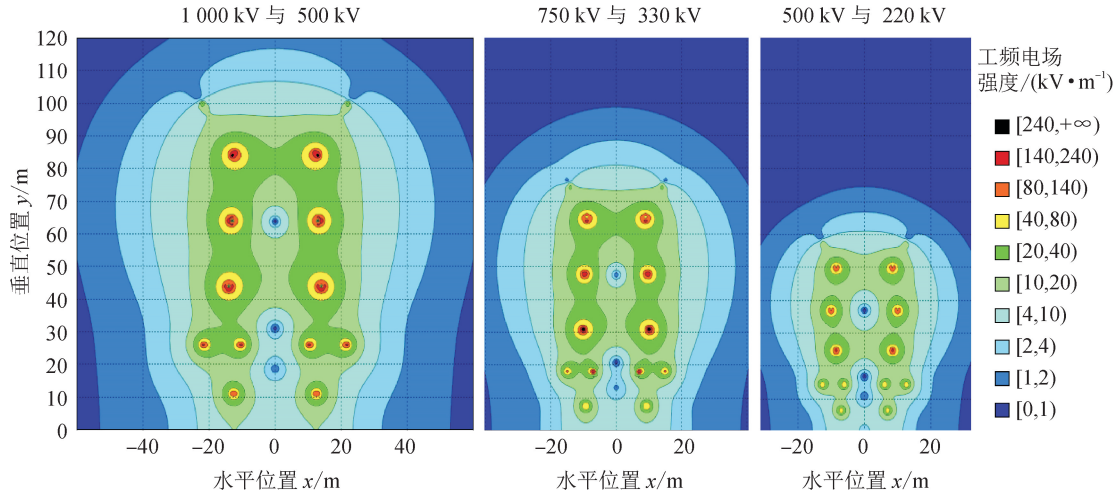


图 11 不同电压等级同塔四回路下的工频电场强度空间分布

Fig. 11 Spatial distribution diagram of power frequency electric field intensity of four-loop lines with different voltage levels

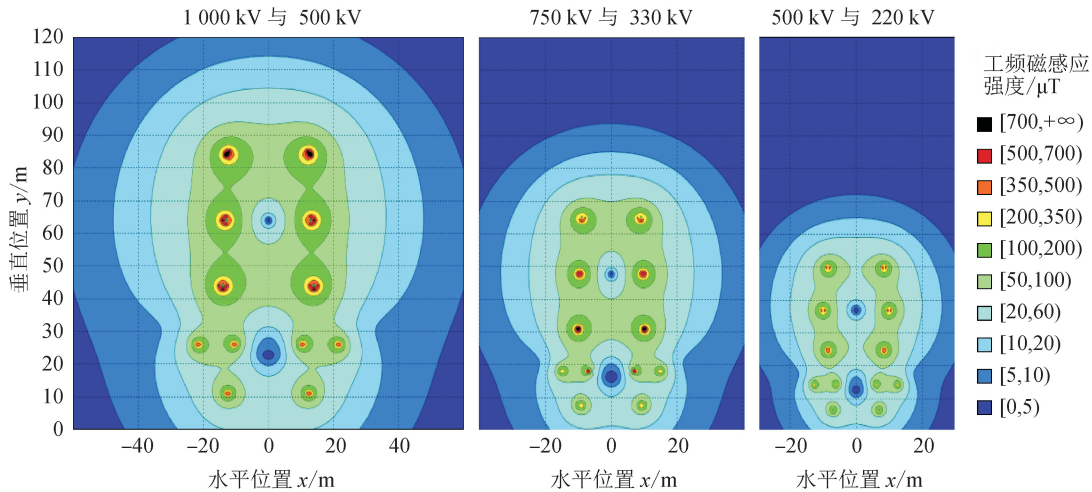


图 12 不同电压等级同塔四回路下的工频磁感应强度空间分布

Fig. 12 Spatial distribution diagram of power frequency magnetic induction intensity of four-loop lines with different voltage levels

1 000 kV 与 500 kV、750 kV 与 330 kV、500 kV 与 220 kV 同塔混压四回路下方距离地面 1.5 m 高处的工频电场强度最大值分别为 10.3 kV/m、9.34 kV/m、7.23 kV/m;当距线路中心 O 点大于 24 m、17 m、12 m 时工频电场强度小于 4 kV/m。

1 000 kV 与 500 kV、750 kV 与 330 kV、500 kV 与 220 kV 同塔混压四回路下方距离地面 1.5 m 高

处的工频磁感应强度最大值分别为 24.52 μT 、23.19 μT 、21.07 μT ,均小于限值 100 μT 。

鉴于电磁场强度的叠加特性,即便同塔混压四回路中位于较高位置的两个回路(图 10 的回路 3 和回路 4)距离地面距离较大,它们对地面位置的电磁场强度依然会产生显著的影响。当这些回路产生的电磁场强度叠加时,地面位置的电磁场强度最大值

相较于同电压等级的单回路或双回路线路会有明显的增加。因此,在进行同塔混压四回路导线对地距离设计以及划定输电线路两侧拆迁范围时,按对地距离较近的回路的电磁场分布特性来考虑是不够的,必须对整个同塔混压四回路进行综合建模分析,以确保准确评估其对地面电磁场的影响。

5 结 论

密集输电通道内存不同电压等级同塔多回路、线路并行、同塔混压等各种复杂工况,本文系统研究了不同电压等级单双回路的电磁场分布特性,对比了线路并行时内侧同相序和逆相序排布的电场强度差异,并对同塔混压四回路电磁环境进行了整体建模分析,研究发现如下结果。

1) 同一电压等级在相同导线对地距离下地面处的单回路(水平排列)工频电场强度及工频磁感应强度整体上大于双回路(垂直逆相序排列)。

2) 当线路对地距离较小时,提高导线对地距离对减小线路两侧 4 kV/m 等值线范围作用不大,但可显著降低电场强度最大值,随着导线对地距离逐渐增大,4 kV/m 等值线范围缩小的速度逐渐增大,但电磁场强度最大值的降低的速度明显减缓。

3) 线路并行时,内侧逆相序较同相序在线路中间位置产生更低的电场强度,磁感应强度分布无较大差异。为降低并行区域的工频电场强度,当线路并行时推荐采用内侧逆相序布置。

4) 由于电磁场强度的叠加效应,同塔混压四回路中每一回路都对地面电磁场有所贡献。因此,在进行电磁场计算时应同塔所有回路进行整体建模分析,以充分考虑电磁场叠加影响。

本文研究成果可为后续密集输电通道内的线路设计以及电磁场评估提供参考,具有重要的工程意义。

参考文献:

- [1] 杨彬,徐伟杰,韩文,等. 750 kV 输电线路下地面金属附着物感应电压分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 52-57.
YANG Bin, XU Weijie, HAN Wen, et al. Analysis of the induced voltage of ground metal attachment under 750 kV Transmission Lines[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 52-57.
- [2] 江进波,沈骏峰,黄国良,等. 220 kV 输电线路工频电磁场计算与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13787-13793.
JIANG Jinbo, SHEN Junfeng, HUANG Guoliang, et al. Calculation and analysis of 220 kV transmission line power frequency electromagnetic field[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13787-13793.
- [3] 杨勃,徐禄文,刘彤. 高压交流输电线路邻近城市高层建筑时的畸变电场计算[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 59-64.
YANG Bo, XU Luwen, LIU Tong. Calculation of distorted electric field for high-voltage AC power transmission lines adjacent to urban high buildings[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(10): 59-64.
- [4] 杨彬,韩文,吴健,等. 交流输电线下建筑物邻近区域电场分布及其影响因素研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 92-96, 102.
YANG Bin, HAN Wen, WU Jian, et al. Electric field distribution in adjacent area of buildings under high voltage transmission line and its influencing factors[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 92-96, 102.
- [5] 伍弘,张利花,何宁辉,等. 架空线路交叉穿越对超高压线下感应电压的影响研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 104-110.
WU Hong, ZHANG Lihua, HE Ninghui, et al. Influence of overhead line crossing on induced voltage under UHV transmission line[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 104-110.
- [6] 彭湃,程汉湘,陈杏灿,等. 基于有限元的超高压输电线路电场的数值分析与测量[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 56-61.
PENG Pai, CHENG Hanxiang, CHEN Xingcan, et al. Numerical analysis and measurement of the electric field of EHV transmission lines based on finite element[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(3): 56-61.
- [7] 孙自安,姚金雄,吕娜,等. 输电线路工频电磁场环境研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 87-91.
SUN Zian, YAO Jinxiong, LÜ Na, et al. Study on power frequency electromagnetic environment of power transmission lines[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(4): 87-91.
- [8] 郭天伟,罗日成,杨雅倩,等. 750 kV/330 kV 混压同塔四回输电线路电磁环境研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 157-164.
GUO Tianwei, LUO Richeng, YANG Yaqian, et al. Research on electromagnetic environment of the 750 kV/330 kV mixed voltage quadruple-circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 157-164.
- [9] 陈豫朝,周翠娟,张业茂,等. 1 000 kV/500 kV 同塔四回输电线路电磁环境研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(增刊 2): 297-301.
- [10] 李志伟,吴兴全,惠帅,等. 电磁环境计算在输电线路数字化设计中的应用研究[J]. 电网与清洁能源,

- 2018, 34(5): 25-30, 35.
- LI Zhiwei, WU Xingquan, HUI Shuai, et al. Study on application of electromagnetic environment calculating in digitized design of transmission lines [J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(5): 25-30, 35.
- [11] 谢庆, 任洁, 李至峪, 等. 重冰区同塔双回交流输电线路电磁环境仿真研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 9-16.
- XIE Qing, REN Jie, LI Zhiyu, et al. Simulation study on electromagnetic environment of AC double-circuit transmission lines in heavy icing area[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 9-16.
- [12] 潘茜雯, 罗日成, 唐祥盛, 等. 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁环境分析[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 183-190.
- PAN Qianwen, LUO Richeng, TANG Xiangsheng, et al. Analysis on electromagnetic environment of 500 kV compact transmission line with double circuits on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 183-190.
- [13] 刘丽娜, 陶加祥, 张业茂, 等. 特高压交流示范工程输电线路电磁环境实测分析[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 46-51.
- LIU Lina, TAO Jiaxiang, ZHANG Yemao, et al. On-site measurement and analysis of transmission line electromagnetic environment for UHV AC demonstration project [J]. Electric Power, 2017, 50(10): 46-51.
- [14] 李晨晖. 多回同走廊 750 千伏高压输电线路电磁环境影响调查与分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- LI Chenhui. Investigation and analysis on the electromagnetic environmental impact of multiplexing corridor 750 kV high voltage transmission line[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [15] 李晓星, 杜军凯, 傅尧, 等. 110 kV 输电线路跨越不同房屋类型的电磁环境影响分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 178-180.
- LI Xiaoxing, DU Junkai, FU Yao, et al. Electromagnetic environment analysis of 110 kV transmission lines crossing different types of housing [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(4): 178-180.
- [16] EL DEIN A Z. Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 899-907.
- [17] TONG Ziyuan, DONG Zhaoyang, ASHTON T. Analysis of electric field influence on buildings under high-voltage transmission lines[J]. IET Science Measurement & Technology, 2016, 10(4): 253-258.
- [18] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 输变电: HJ 24—2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [19] 曹红英, 张翼, 白永祥, 等. 并行输电线路工频电磁场的叠加算法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 62-66.
- CAO Hongying, ZHANG Yi, BAI Yongxiang, et al. Research on superposition algorithm of power frequency electromagnetic field of parallel transmission lines [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2014, 36(4): 62-66.
- [20] 甘艳, 李慧慧, 杜志叶, 等. 500 kV 并行线路工频电场测量及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 190-194.
- GAN Yan, LI Huihui, DU Zhiye, et al. measurements and influencing factors analysis of power frequency electric field under 500 kV parallel transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9): 190-194.
- [21] 周文武, 施西, 李小亭, 等. 一种求解同电压等级交流架空线路并行间距的方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 62-67, 74.
- ZHOU Wenwu, SHI Xi, LI Xiaoting, et al. A calculation method of parallel spacing between HVAC overhead transmission lines in same voltage grade[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 62-67, 74.
- [22] 国家能源局. 架空输电线路电气设计规程: DL/T 5582—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [23] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 电磁环境控制限值: GB 8702-2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [24] 潘春平, 廖民传, 汪晶毅. 500 kV/220 kV 混压同塔四回路最优相序研究[J]. 中国电力, 2015, 48(10): 71-76, 96.
- PAN Chunping, LIAO Minchuan, WANG Jingyi. Research on optimal phase sequence of quadruple-circuit transmission line with dual voltage 500/220 kV on same tower[J]. Electric Power, 2015, 48(10): 71-76, 96.
- [25] 张禄琦, 郝阳, 张小力, 等. 1 000 kV 与 500 kV 同塔四回交流输电线路杆塔型式研究[J]. 中国电力, 2013, 46(4): 32-36, 62.
- ZHANG Luqi, HAO Yang, ZHANG Xiaoli, et al. Study on tower types of 1 000 kV and 500 kV four-circuit AC transmission lines on one tower[J]. Electric Power, 2013, 46(4): 32-36, 62.

(责任编辑 王绪迪)