

· 专论与综述 ·

采用六相输电技术优化双回高压输电线路电磁环境的研究

葛小宁¹, 庞福滨², 嵇建飞², 邹军¹

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084;
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着输电线路电压等级的提升,特高压线路电磁环境问题已成为决定其杆塔尺寸的主要因素之一。文中对1 000 kV特高压双回线路和六相578 kV线路的电磁环境进行了计算和比较,结果显示采用同样的塔头和呼高情况下,六相线路的电磁环境优于三相线路。文中还研究了六相线路电磁环境随呼高的变化规律,地线及距地面最高的两根输电线的表面场强随呼高降低而降低,其余导体表面场强随呼高降低而增加;线路下方地面附近工频电场强度、无线电干扰及可听噪声均随着呼高的降低而增加。相比于同等相电压等级的三相线路,其导线表面电场强度更小。因此,六相输电可有效改善双回交流线路的电磁环境。

关键词:特高压;六相输电线路;三相双回线路;电磁环境;呼高

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0001-05

0 引言

我国发电的一次能源与电力负荷在地理上分布不均衡,需将电能大容量远距离地进行输送。特高压输电具有远距离、大容量、低损耗等优良特点,是远距离电力输送的理想选择。随着输电线路电压等级提升,线路电晕导致的电磁环境问题日益严重^[1]。为了将线路电磁环境参数控制在规程范围内,可通过改变导线规格、塔头尺寸和杆塔呼高等手段对线路电磁环境予以控制^[2-5]。不同于无线电干扰的衰减特性,由导线电晕引起的可听噪声为机械波,衰减缓慢。通过改变导线规格等措施降低可听噪声收效甚微,通常需要增加导线对地高度才能将可听噪声控制在规程范围内^[6-9]。

随着我国特高压交流工程的建设,交流线路电磁环境的研究取得了丰富的成果,理论、设计和实验方面都有相关报道^[10-17]。减小特高压线路无线电干扰、可听噪声及电晕损耗的关键在于减小线路相导线表面电场强度^[12-14]。对于双回高压输电线路,目前常采用逆相序布置。该布置方式对于减小线路走廊宽度有利,但此布置是双回线路所有相序中导线表面场强最大的情况。与之相对应,双回线路的同相序布置是导线表面场强最小的布置,但该布置使得线路的走廊宽度最大。为平衡导线表面场强和线路走廊宽度之间的矛盾,目前有大量文章研究不同相序情况下输电线路的电磁环境^[10-11]。

收稿日期:2018-09-12;修回日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577103);电网环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(GYW51201700-589)

同相序和逆相序布置是双回线路电磁环境的两种极限情况。从目前的研究和应用情况来看,特高压线路的电磁环境问题解决主要是两条途径:采用更大截面的导线和增加导线的对地高度。这类措施的最大问题是增加了塔材的消耗,线路的建设投资成本增加。

目前我国双回输电线路体制是采用三相三线制,从工程应用的角度,其电磁环境的指标优化的空间已经很小。为了进一步优化双回线路的电磁环境,文中研究采用六相输电技术。不同于双回三相输电方案,六相输电技术是指将双回线路的六相导线按照相差 60° 的方式连接,其线电压与相电压相等。

文中对相同相电压情况下的六相线路与双回三相线路的电磁环境进行比较研究。所有结果采用清华大学电机系开发的高压输电线路电磁环境综合计算软件ACEME2.0计算而得,该软件系统已被多家电力设计院采用,并应用于多条高压/特高压输电线路工程的电磁环境计算分析。

1 六相输电技术简介

六相输电技术中,每回线路的相数为6。对照三相线路,六相线路相邻相电压间相位差为 60° ,如图1所示。图1中 U_p 与 U_l 分别表示线路的相电压及线电压,六相线路的线电压与相电压相等。因此,在相等相电压条件下,六相线路的线电压小于三相路线电压,仅为后者的 $1/\sqrt{3}$ 。

工程中可在双回三相线路两端分别设置一组 Δ -Y型变压器(共4台),通过适当接线,将两回线

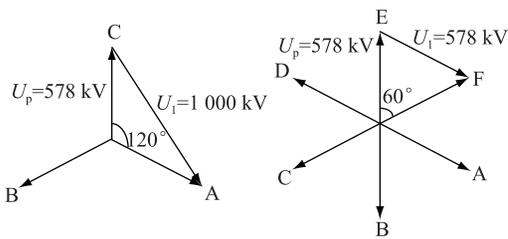


图1 六相线路与三相线路电压相量比较

Fig.1 Comparison of voltage phasor diagrams between six-phased and three-phased lines

路的电压相量彼此分离 60° , 构成一回六相输电线路。具体变压器布置及接线形式如图2所示^[4-5]。

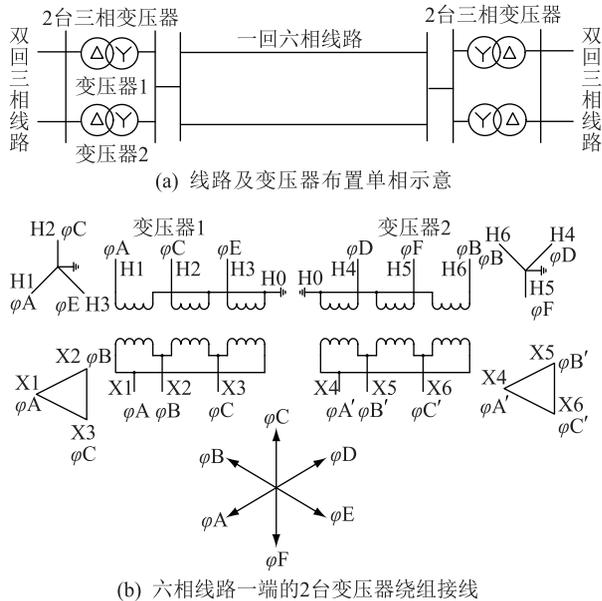


图2 实现六相输电的变压器布置及接线方式

Fig.2 Transformer arrangement for the six-phased line

图2(a)为线路及变压器布置单相示意图;图2(b)为六相线路一端的2台变压器绕组接线图,其中X1~X6为变压器三角形边出线,与双回三相线路中A、B、C及A'、B'、C'相连接;H1~H6为变压器星形边出线,构成一回六相线路中的A~F相。

2 高压输电线路电磁环境计算方法

单回六相输电方案和双回三相输电方案相比,单回六相输电方案可等效视为一种双回线路的特殊相序。因此,从高压输电线路的电磁环境计算的角度,六相输电方案电磁环境的计算和双回三相输电方案并无不同之处。

给定输电线路的电压等级后,采用麦克斯韦电位系数法计算各导线的等效线电荷密度,从而计算各相导线的表面场强和线路下方的空间场强。求得线路表面场强后,采用美国邦纳维尔电力局公式

计算线路可听噪声。对于无线电干扰,采用激发函数法计算^[6-9]。

3 六相输电线路电磁环境研究

3.1 计算条件

计算所采用杆塔尺寸如图3所示。三相逆序线路的布置方式为1-A,2-B,3-C,4-A',5-B',6-C',7与8为架空地线;六相线路的布置方式为1-A,2-B,3-C,4-D,5-E,6-F,7与8为架空地线。三相线路电压等级为1000 kV,六相线路电压等级为578 kV,二者相电压相同。在求取输电线路周围空间场强时,取垂弧距离10 m。

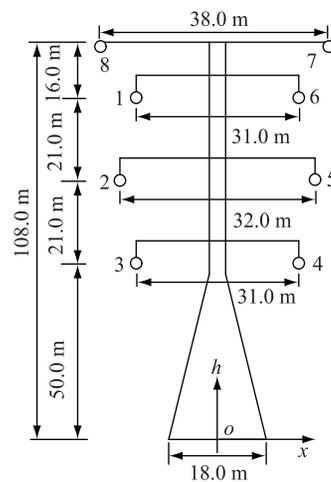


图3 1000 kV三相双回线路杆塔尺寸

Fig.3 Configuration of a 1000 kV three-phase double-circuited line

2种输电方式下导线型号均选取为LGJ-8×500/45,分裂导线外接圆直径104 cm,子导线直径为3 cm;架空地线均为单根导线,直径3.84 cm。

求取无线电干扰及可听噪声所需参数为:土壤电阻率 $200 \Omega \cdot \text{m}$,海拔高度450 m,无线电干扰频率0.5 MHz,无线电干扰修正值17 dB,大气温度 20°C ,大气压强95.54 kPa。

文中将坐标原点设置于杆塔与线路横截面内杆塔对称轴与地面交点处,如图3所示。横向坐标 x (方向沿地面)取值范围 $-60 \sim 60 \text{ m}$,计算步长为1 m;纵向坐标 h 为1.5 m,只计算1.5 m等高线上场点。

3.2 六相线路与三相双回逆序线路电磁环境比较

3.2.1 导线表面场强

计算1000 kV三相双回逆序线路及578 kV六相线路表面场强,结果如表1所示。其中,平均最大场强为一相线路中各分裂导线表面最大场强的平均值。

表 1 同塔三相双回逆序布置线路与六相线路表面平均最大场强结果

Table 1 Average maximum field strength results of three-phase double-reverse reverse-arranged lines and six-phase lines on the same tower

导体编号	导线表面场强/($\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	三相线路	六相线路
1	15.17	11.78
2	15.12	12.31
3	14.99	11.63
4	14.99	11.63
5	15.12	12.31
6	15.17	11.78
7	7.19	12.94
8	7.19	12.94

由表 1 可见,采用六相输电方案时各相线表面场强均小于采用三相双回逆序输电方式时线路表面场强;而六相方式下地线表面场强远大于三相双回逆序方式下地线表面场强。对于相导线而言,从图 1 的相量图可知,任意两项之间的电压,六相输电布置均小于三相输电布置,因此,其相导线上的表面场强降低。对于地线,其电位为零,决定地线场强的是导线 1 号和 6 号电压之和,而不是此两导线之差,因此,地线的表面场强六项输电布置下更大。

3.2.2 线路下方空间电场强度、无线电干扰与可听噪声的比较

文中对六相输电方式及三相双回逆序输电方式中线路下方 h 为 1.5 m 水平高度场点的工频电场强度、无线电干扰和可听噪声水平进行了计算和比较,结果如图 4 所示。

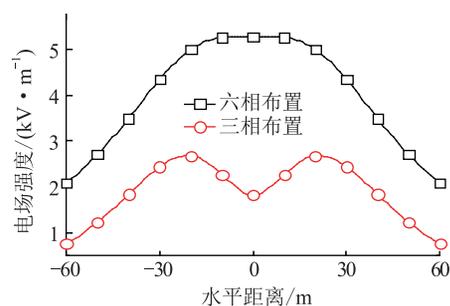
由图 4 可知,六相线路产生的空间电场强度大于三相逆序线路;六相线路产生的无线电干扰及可听噪声小于三相逆序线路。采用六相输电方式实现了对可听噪声的有效抑制,有利于减小杆塔尺寸。

3.2.3 原因分析

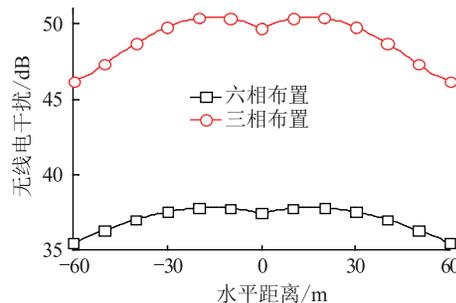
造成六相线路与三相双回逆序线路电磁环境差异的根本原因在于二者的电压情况不同。六相线路的电压相位情况有异于三相线路,而线路与杆塔结构未发生改变,其内部电荷分布情况与三相线路并不相同,导致线路表面及周围电场强度、无线电干扰与可听噪声发生变化。相对于三相布置的情况,六相布置情况的导线表面场强降低了 20% 以上,因此,其对应电磁环境参量均有相应的降低。

3.3 改变呼高对六相线路电磁环境的影响

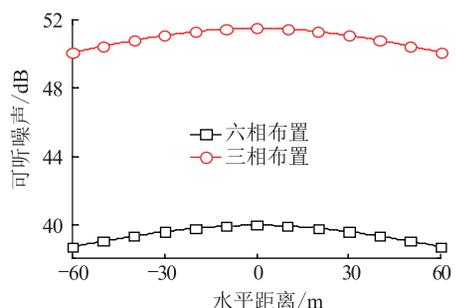
文中将图 3 中杆塔呼高作为变量,分析了呼高分别取 50 m(原杆塔尺寸),40 m,35 m,30 m,20 m



(a) 两种布置情况下地面电场强度比较



(b) 两种布置情况下无线电干扰水平比较



(c) 两种布置情况下可听噪声比较

图 4 线路下方电场强度、无线电干扰及可听噪声比较

Fig.4 Comparison of electric intensity, radio noise and audible noise under lines

时六相线路电磁环境的变化情况。结果如表 2 及图 5 所示。

表 2 六相线路表面平均最大场强随呼高变化情况

Table 2 Electric intensity on the surface of the conductor of the six-phased line with different nominal heights

导体编号	导线表面场强/($\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$)				
	50 m	40 m	35 m	30 m	20 m
1	11.78	11.40	11.28	11.18	11.02
2	12.31	12.32	12.34	12.37	12.48
3	11.63	11.91	12.10	12.35	13.17
4	11.63	11.91	12.10	12.35	13.17
5	12.31	12.32	12.34	12.37	12.48
6	11.78	11.40	11.28	11.18	11.02
7	12.94	9.77	8.76	7.97	6.79
8	12.94	9.77	8.73	7.97	6.79

分析表 2 可知,随着杆塔呼高的降低,六相线路中 1、6、7、8 号导体的表面场强随之降低,其余导体

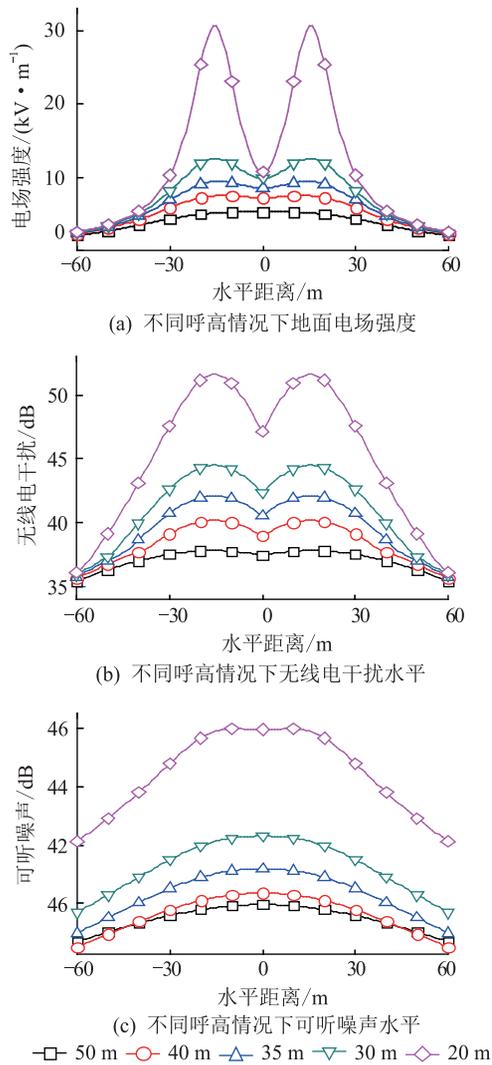


图5 六相线路下方空间电场强度、无线电干扰及可听噪声随呼高变化情况

Fig.5 The electric intensity, radio noise and audible noise under the six-phased line with different nominal heights

表面场强随之增加。呼高减小到20 m时,六相线路中各导体的表面场强仍均小于三相双回逆序线路情况下相应导体表面场强。

分析图5可知,六相线路下方电场强度、无线电干扰及可听噪声水平均随呼高的减小而增大。若将电磁环境限制标准选择为线路下方空间场强最大值10 kV/m,无线电干扰及可听噪声限值均为55 dB,则仅需呼高为35 m即可满足要求。

4 结论

对相同杆塔尺寸及导线型号的三相双回逆序线路及六相输电线路的电磁环境进行了计算和比较,结果表明,六相输电方式下地线表面场强及线路下方工频电场强度大于三相双回逆序情况;六相情况下各相输电线路表面场强以及线路产生的无

线电干扰与可听噪声水平小于三相双回逆序情况。

在此基础上,文中将杆塔呼高作为变量,分析了呼高改变时六相线路电磁环境的变化规律。结果显示,六相线路中的地线及距地面最高的两根输电线的表面场强随呼高降低而降低,其余导体表面场强随呼高降低而增加;线路下方地面附近工频电场强度、无线电干扰及可听噪声均随着呼高的降低而增加。此外,文中验证了仅需将六相线路呼高取为35 m即可满足通常电磁环境限值要求。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 赵庆明. 六相输电线的故障分析与继电保护[D]. 天津: 天津大学, 2008.
ZHAO Qingming. Fault analysis and relay protection for six-phases transmission lines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [3] 赵庆明, 贺家李, 牟敦庚, 等. 特高压六相输电线路特性研究[J]. 中国电力, 2007, 40(8): 40-44.
ZHAO Qingming, HE Jiali, MOU Dungeng, et al. Study on UHV six-phase transmission lines characteristics[J]. Electric Power, 2007, 40(8): 40-44.
- [4] LANDERS T L, RICEDA R J, KRIZAUSKAS E K. High phase order economics: constructing a new transmission line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1521-1526.
- [5] AHMAD H, JAMBAK M I. Advanced laboratory scale model of high phase conversion power transmission line[C]//2nd IEEE International Conference on Power and Energy, Johor Baharu, Malaysia, 2008.
- [6] 栗福珩. 高压输电的环境保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
SU Fuheng. Environment protection of high-oltage transmission [M]. Beijing: Water Power Press, 1989.
- [7] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
NI Guangzheng. Engineering electromagnetic field [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [8] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
HU Baixue. Research on electromagnetic environment of power frequency EHV and UHV transmission lines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [9] 袁建生, 邹军. 计算架空线路无线电干扰的激发函数法分析[C]//电机工程学会. 无线电干扰和变电站电磁兼容研讨会论文集, 2008: 17-23.
YUAN Jiansheng, ZOU Jun. Analysis of the excitation function method for calculating the radio interference of transmission lines [C]//Research Papers of Radio Interference and Electromagnetic Compatibility of Substation, Zhuhai, China, 2008:

- 17-23.
- [10] 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 Jiexiang,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.
- [11] 叶艳峰,逯迈,陈小强. 典型特高压交流输电线路电磁暴露安全评估的比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2017,35(6):1-11.
YE Yanfeng,LU Mai,CHEN Xiaoqiang. Comparative study on safety assessment of electromagnetic exposure of typical ultra-high voltage AC transmission lines[J]. Journal Radiation Research and Radiation Processing,2017,35(6):1-11.
- [12] 张业茂,万保权,周兵,等. 特高压输电线路可听噪声长期测试数据的统计分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):6136-6144.
ZHANG Yemao,WAN Baoquan,ZHOU Bing, et al. Statistic analysis of long-term measured data of audible noise on UHV AC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(20):6136-6144.
- [13] 汪龙龙,宋金山,汪迪锋. 1 000 kV 紧凑型输电线路选型研究[J]. 电气工程学报,2017,12(9):34-40.
WANG Longlong,SONG Jinshan,WANG Difeng. A study of conductors selection types in 1 000 kV compact power transmission line [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(9):34-40.
- [14] 张业茂,张建功,邬雄,等. 特高压试验示范工程输电线路无线电干扰长期测试数据的统计分析[J]. 高电压技术,2015,41(11):3708-3714.
ZHANG Yemao,ZHANG Jianguo,WU Xiong, et al. Statistic analysis of long-term measured data of radio interference on UHV AC demonstration project transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3708-3714.
- [15] 金梦,李修金,刘一丹,等. 基于 PSMModel 的江苏电网机电-电磁混合仿真[J]. 电力工程技术,2017,36(3):7-12.
JIN Meng,LI Xiujin,LIU Yidan, et al. Electromechanical-electromagnetic hybrid simulation of Jiangsu power grid using PSMModel[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):7-12.
- [16] 高阳. 高压输电线路电磁环境分析及人体生物效应研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
GAO Yan. The research on high voltage transmission line electromagnetic environment and the biological effects of human [D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [17] 杨洋,孙静,杨培栋,等. 适用于混合仿真的戴维南等值阻抗改进求取算法[J]. 电力工程技术,2017,36(4):36-42.
YANG Yang,SUN Jing,YANG Peidong, et al. Improved thevenin equivalent impedance calculating method for hybrid simulation[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):36-42.

作者简介:



葛小宁

葛小宁(1983),女,博士,研究方向为高压输电线路和电力系统电磁兼容(E-mail: xiaoningge@126.com);

庞福滨(1987),男,博士,高级工程师,从事变电站电磁兼容研究工作;

嵇建飞(1982),男,博士,高级工程师,从事变电站电磁兼容和电力系统保护相关工作。

Improving the electromagnetic environment of a double-circuit high-voltage transmission line using the six-phased technology

GE Xiaoning¹, PANG Fubin², JI Jianfei², ZOU Jun¹

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: As the rated voltage of the transmission line increases, the electromagnetic environment of ultra-high voltage transmission lines has become one of the main factors to determine the tower size. The comparison of the electromagnetic environment is analyzed between the 1 000 kV three-phase double-circuited transmission line and the six-phased 578 kV. The numerical results show that the electromagnetic environment of a six-phased transmission line is much improved with the same tower configuration and nominal tower height. Further more, the characteristic of the electromagnetic environment of a six-phased transmission line with respect to the nominal tower height is studied in detail. With the decrease of nominal height, the electric field strength on the surface of the ground wire and the two highest transmission lines decreases, while that of the other conductors increases. The ground-level electric field, radio interference and audible noise increases as the nominal height decreases. In comparison with a three-phased transmission line with the same phase voltage, the electric intensity on the surface of the conductor of the six-phased transmission line is much lower than that of the three-phased ones. The six-phased technology of the transmission line can essentially improve the electromagnetic environment of the high-voltage AC transmission lines.

Keywords: ultra-high voltage; six-phased transmission line; three-phase double-circuited transmission line; electromagnetic environment; nominal height

(编辑 方晶)