

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.014

相序对特高压交流输电线下工频电磁场影响的仿真分析研究

邹岸新, 徐禄文

(国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 在实际工程中,特高压交流输电线路为保证三相平衡经常采用变相序的方法进行运行。为掌握相序对特高压交流输电线下工频电磁场的影响情况,笔者以荆门—南阳—晋东南1 000 kV特高压输电线路为例,采用线单元模拟电荷法和基于毕奥—沙伐尔定律的数值计算方法分别对不同相序运行时的工频电场和工频磁场分布情况进行了仿真分析。分析发现:同相序排列时电场强度较大,逆相序排列时电场强度较小,而工频磁场在逆相序排列方式时稍大,在同相序排列方式时较小。

关键词: 相序; 特高压; 工频电磁场; 仿真

Simulation Analysis on Effect of Phase Sequence on Power Frequency Electromagnetic Field Under UHV AC Transmission Lines

ZOU Anxin, XU Luwen

(Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: To ensure three-phase equilibrium, ultra-high voltage (UHV) AC transmission lines often operate with changeable phase sequence. In this paper, the Jingmen-Nanyang-Southeast Shanxi 1 000 kV UHV transmission line is taken for example to investigate the effect of phase sequence on the power frequency electromagnetic field under the UHV AC transmission line. The line unit charge simulation method and the numerical calculation method based on Biot-Savart law are employed to simulate the distributions of power frequency electric field and magnetic field for different phase sequences. The results show that the electric field intensity is higher in same phase sequence but lower in reverse phase sequence, while the magnetic field intensity behaves reversely.

Key words: phase sequence; UHV; power frequency electromagnetic field; simulation

0 引言

随着中国国民经济的快速发展,各方面的电力需求越来越迫切。现阶段中国能源分配不合理,需求大的负荷中心一般都离能源基地较远,现有的电网构架很难快速实现资源的优化配置。特高压输电线路可以在保证经济和环境效益的同时,实现输送容量的大幅度提升,实现资源的优化配置^[1-3]。但是特高压输电线路的高电压、大电流特点带来了一系列的电磁环境问题^[4-8]。

特高压交流输电线路产生的电磁环境不仅受到线路结构的影响,还受到运行情况的影响,国内外学者及研究机构对此方面均作了大量的研究。自

1986年以来,中国电力科学研究院、国网电力科学研究院和有关高等院校开展了特高压交流输电线路电磁环境计算及影响因素的相关研究,取得了一系列丰硕成果^[8-15]。研究认为只要设计合理,可以使特高压交流输电工程的工频电场、工频磁场和可听噪声水平与超高压交流输电工程相当,部分学者还提出了中国特高压输电线路的工频电场、工频磁场和可听噪声控制限值的建议。在国外,美国是研究特高压输电最早的国家,美国邦纳维尔电力公司从1976年开始进行特高压线路的机械结构的研究,并进行了电晕和电场、生态和环境、操作和雷电冲击绝缘等方面的研究^[16]。日本,前苏联及加拿大等国家均相继对特高压交流输电线路的电磁环境影响作了相关研究^[17-20]。国内外的研究主要侧重于线路结构及运行情况对输电线路下工频电磁场的影响研

究,而针对相序的影响情况,研究较少。

笔者以荆门—南阳—晋东南 1 000 kV 特高压线路为例,采用相应的数值计算方法对 6 种不同相序情况下的特高压交流输电线路的工频电磁场分布情况进行了仿真计算分析,可以为特高压交流输电线路的设计施工从电磁环境的角度提供参考。

1 特高压交流输电线路三维电磁场计算模型

1.1 输电线路的悬链线方程

特高压交流输电线路在实际运行中,在一个档距内会存在弧垂,为准确计算线路下方的工频电磁场,需要考虑输电线的弧垂影响^[21]。结合输电线路的实际情况,在计算中做如下假定:①输电线是理想的柔性索链,输电线只承受轴向拉力而忽略弯矩等的影响;②作用在输电线上的荷载均指向同一方向,并且沿输电线方向呈均匀分布。

根据假设,悬挂在两基杆塔之间的架空输电线呈悬链线形状,当输电线两端悬挂点等高(离地高度均为 H) 时,导线的最大弧垂 s 出现在每个档距中央,见图 1。设输电线的纵向为 y 轴方向,其横向为 x 轴方向, z 轴垂直向上,则根据输电线的受力平衡条件,可得图 1 中所示档距的悬链线方程为

$$Z = \frac{L}{a} [\cosh \frac{ay}{L} - \cosh \frac{a}{2}] + H, (-\frac{L}{2} \leq y \leq \frac{L}{2})。 \quad (1)$$

式(1)中: $a = \gamma L / \sigma_0$ 为导线的水平应力系数,其中 σ_0 为导线水平应力,MPa; γ 为导线的比载, $N/(m \cdot mm^2)$; L 为输电线的档距, m。

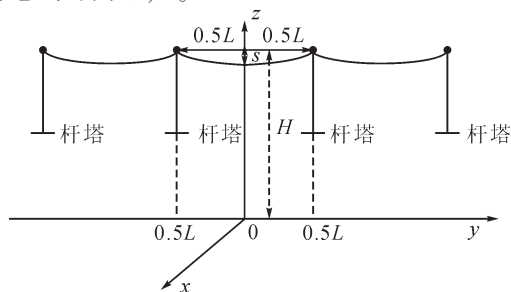


图 1 架空悬链线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overhead suspension line

在式(1)中取 $y=0$,可以得到输电线的最大弧垂度为

$$s = \frac{L}{a} (\cosh \frac{a}{2} - 1)。 \quad (2)$$

当得到了悬挂线方程之后,便可得到一档距导线上任意点的空间坐标。

1.2 输电线路三维空间电磁场计算假设

对于实际运行中的特高压交流输电线路的工频电磁场的计算,在建立输电线三维计算模型时,

可以在保证计算精度要求时,进行简化计算:

1)地面是无穷大的导体面,其电势等于零,沿线地面各处的电阻率相同;

2)输电线都为光滑圆柱体,同一档距内的同类型导线具有相同的半径且彼此相互平行,导线表面都有相同电位和等磁位;

3)在计算中只考虑线路主体部分产生的电磁场,而忽略金具、杆塔、绝缘子等相邻物体的影响,同时忽略导线、架空地线产生的端部效应;

4)电荷分布沿线路无畸变,并且电位沿线路不发生变化;

5)假设输电线的电流为正弦稳态电流,沿导线轴线流动。

2 特高压交流输电线路电磁场的计算方法

2.1 三维电场计算

当考虑输电线路的弧垂后,需要建立适用于三维电场计算的线路模型。笔者采用线单元模拟电荷法计算三维电场,其基本思想是通过坐标变换,求得电位和场强的解析表达式,基本思路如下^[22]:

设某一有限长直线电荷处于直角坐标系中,放置方向任意,不平行或重合于任何坐标轴。见图 2, $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 为线电荷两端点坐标, $P(x, y, z)$ 为线单元外任意一点。

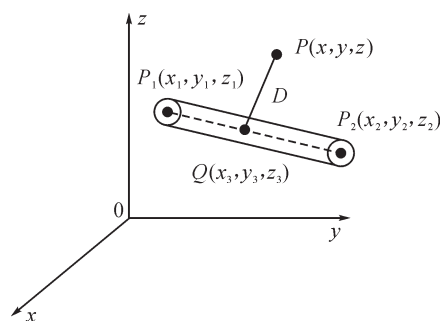


图 2 线单元模拟电荷模型

Fig. 2 Line charge model

若以 P_1 为起点,沿 $P_1 P_2$ 方向建立局部坐标 u ,并设线单元长度为 L ,则单元内部任一点 $Q(x_3, y_3, z_3)$ 的坐标可由式(3)–(5)求出:

$$x_3(u) = x_1 + \frac{l}{L} u; \quad (3)$$

$$y_3(u) = y_1 + \frac{m}{L} u; \quad (4)$$

$$z_3(u) = z_1 + \frac{n}{L} u。 \quad (5)$$

式(3)–(5)中: $l = x_2 - x_1$; $m = y_2 - y_1$; $n = z_2 - z_1$; u 的取值范围为 $[0, L]$ 。若线电荷密度 τ 在单元内按线性规律

分布

$$\tau(u)=au+b. \quad (6)$$

式(6)中, a, b 为待定系数, 则此单元在场内任一点 $P(x, y, z)$ 产生的电位为

$$\varphi_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\tau(u)}{D} du. \quad (7)$$

式(7)中: D 为单元内源点到场点 P 的距离; ϵ_0 为真空介电常数。对积分限作变量代换, 令 $u=Lt(0 \leq t \leq 1)$, 则电位 φ_p 可表示为

$$\varphi_p = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{At+B}{\sqrt{Et^2+ Ft+G}} dt. \quad (8)$$

式(8)中: $E=l^2+m^2+n^2$; $F=-2[l(x-x_1)+m(y-y_1)+n(z-z_1)]$; $G=(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2$; $A=aL, B=b$ 。若设 $\tau(0)=\tau_1, \tau(L)=\tau_2$, 则积分求出电位的解析表达式为

$$\varphi_p = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{2E+F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F+2E+2\sqrt{E(E+F+G)}}{F+2\sqrt{EG}} \right) - \\ & \frac{1}{E} (\sqrt{E+F+G} - \sqrt{G}) \end{aligned} \right\} \tau_1 + \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{-F}{2\sqrt{E^3}} \ln \left(\frac{F+2E+2\sqrt{E(E+F+G)}}{F+2\sqrt{EG}} \right) + \\ & \frac{1}{E} (\sqrt{E+F+G} - \sqrt{G}) \end{aligned} \right\} \tau_2. \quad (9)$$

从而 P 点电场强度的 3 个分量可通过对电位求导得出:

$$E_{px} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(x-x_1-lt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt; \quad (10)$$

$$E_{py} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(y-y_1-mt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt; \quad (11)$$

$$E_{pz} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(z-z_1-nt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt. \quad (12)$$

则 P 点的电场强度有效值为

$$E_p = \sqrt{E_{px}^2 + E_{py}^2 + E_{pz}^2}. \quad (13)$$

在上述电位和电场强度表达式推导过程中, 若 $A=0$, 则将线单元视为常线电荷, 此时的电位表达式中 $\tau_1=\tau_2=b$ 。

2.2 输电线路三维磁场计算

在计算三维空间磁场时, 将载流输电线路微元化, 任一载流导体都可以看成各个载流的直线段组合而成, 则载流导体周围任一点的工频磁场强度都可以看成是这些直导线段在该点产生的磁场强度的矢量和。磁场计算示意图见图 3, 具体思路如下:

如图 3 所示, 空间任意微元载流线段 AB , 其所载电流为 I , 在三维直角坐标系中端点 A, B 的坐标分别为 $(x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b)$, 则根据毕奥—沙伐尔定律, 它在空间任一点 P 处产生的磁感应强度为

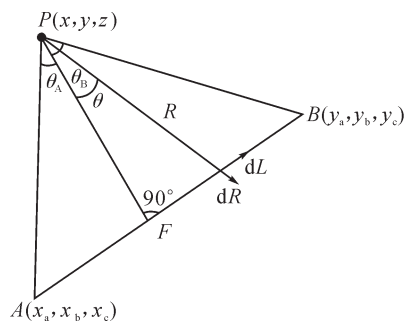


图 3 磁场计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the magnetic field calculation

$$B = \frac{u_0 I}{4\pi} \int_A^B \frac{dL \times R^0}{r^2}. \quad (14)$$

式(14)中, R^0 为从 dL 到 P 点的单位方向矢量, 如图 3 中所示, 则 $|dL \times R^0| = dl \cdot \cos\theta, dl = r d\theta / \cos\theta, r = \rho / \cos\theta, \rho$ 为从 P 点到 AB 的垂直距离, 将其带入式(14)可以得到

$$B = \frac{u_0 I}{4\pi\rho} (\sin\theta_A + \sin\theta_B). \quad (15)$$

根据几何关系和 A, B 点的坐标可以得到任意微元载流线段在空间任一点产生的三维空间磁场分量

$$\begin{cases} B_x = \frac{l}{\sqrt{l^2+m^2+n^2}} B \\ B_y = \frac{m}{\sqrt{l^2+m^2+n^2}} B \\ B_z = \frac{n}{\sqrt{l^2+m^2+n^2}} B \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中,

$$\begin{cases} l = (y_b - y_a)(z - z_b) - (y - y_b)(z_b - z_a) \\ m = (x - x_b)(z_b - z_a) - (x_b - x_a)(z - z_a) \\ n = (x_b - x_a)(y - y_b) - (x - x_b)(y_b - y_a) \end{cases} \quad (17)$$

对于考虑弧垂时的输电线路, 只需要将每个档距的导线分成 N 个微元段, 然后算出每个微元段在空间任一点 P 的磁场强度, 然后应用叠加原理, 便可以求出空间输电线在 P 点产生的磁场强度总和。具体计算公式为

$$\begin{cases} B_x = \sum_j^M \sum_{i=1}^N B_{x,i} \\ B_y = \sum_j^M \sum_{i=1}^N B_{y,i} \\ B_z = \sum_j^M \sum_{i=1}^N B_{z,i} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: M 为输电线的条数, 如计算三相单回输电线路时 M 的值为 3, 单塔四回的时候 M 的值为 12; N 为考虑弧垂时一档距输电线分的微元段数, 具体值根据导线最大弧垂的大小设定。在计算出 x 、

y, z 方向的磁场强度矢量后, 便可以计算出合成磁场强度为

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (19)$$

3 相序对特高压交流输电线下工频电磁场影响分析

3.1 实际特高压交流输电线路计算参数

国内荆门—南阳—晋东南 1 000 kV 特高压线路的其中一个杆塔示意图见图 4。其具体参数如下: 分裂导线数目为 8 分裂, 导线类型 LGJ-500/45, 子导线半径 15 mm, 子导线间距 0.4 m, 架空地线为 LHBJ-120/70, 假定三相电压额定值都为 1 000 kV。档距取 500 m, 查询导线的气象条件和线路参数, 代入导线的最大弧度计算式(2)可得导线的最大弧度为 11.64 m。三相 1 000 kV(线间电压)回路各导线对地电压为

$$|U_A| = |U_B| = |U_C| = \frac{1\,000 \times 1.05}{\sqrt{3}} = 606.2 \text{ kV}。$$

故各导线对地电压分量为:

$$U_A = (606.2 + j0) \text{ kV};$$

$$U_B = (-303.1 + j525.0) \text{ kV};$$

$$U_C = (-303.1 - j525.0) \text{ kV}。$$

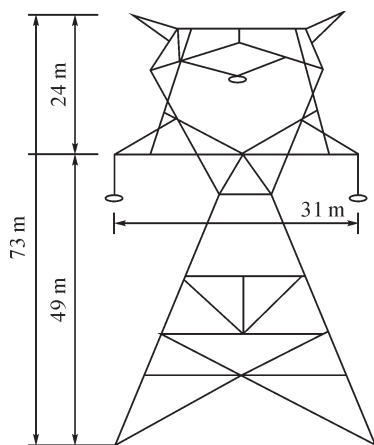


图 4 1 000 kV 杆塔结构图

Fig. 4 1 000 kV tower structure

3.2 相序对工频电场的影响分析

目前中国已经建成运行的 1 000 kV 输电线路是单回路的, 多回路运行将会减少走廊面积, 进一步提高单位走廊面积的输电容量。考虑到 1 000 kV 输电线的相间距较大, 因此只考虑双回路。对于同塔双回 1 000 kV 线路, 采用图 5 的排列形式。

针对 6 种不同的输电相序: ABCABC、ABCACB、ABCBAC、ABCBAC、ABCCAB、ABCCBA 分别进行了仿真计算, 输电线路下的工频电场分布见图 6。特高压双回路不同相序时的线下工频电场强度的最大

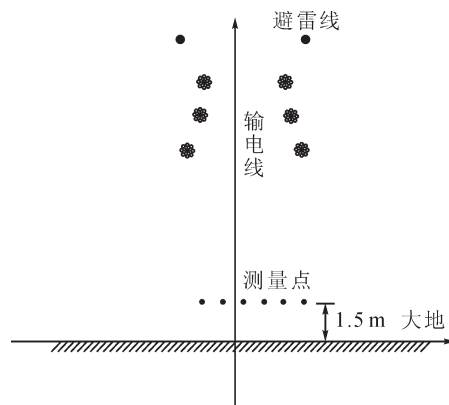


图 5 特高压同塔双回输电线路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double-circuit transmission line in one tower

值见表 1, 不同相序时的线下工频电场强度的最大值见图 7。

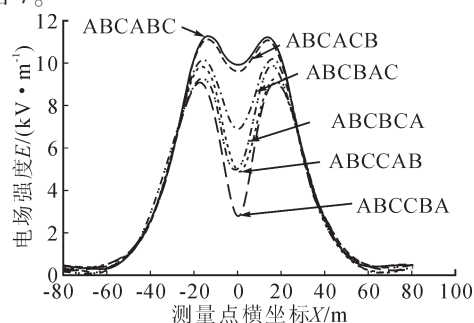


图 6 双回输电线路不同相序的地面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution when the double-circuit transmission line is in different phase sequence

表 1 特高压双回路不同相序时的线下工频电场强度的最大值
Table 1 Maximum electric field in different phase sequence

相序布置	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
	ABC	ACB	BAC	BCA	CAB	CBA
最大场强/ (kV·m ⁻¹)	11.249	11.101	10.173	9.865	9.838	9.071

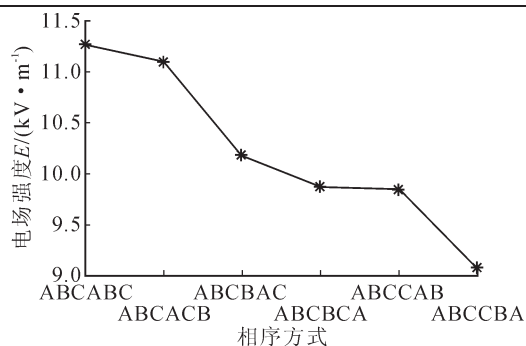


图 7 不同相序时的线下工频电场强度的最大值

Fig. 7 Maximum electric field in different phase sequence

由图 6、7 和表 1 可以看出, 输电线路产生的电场强度最大时, 排列相序为: ABCABC(同相序排列); 输电线路产生的电场强度最小时, 排列相序为: ABCCBA(逆相序排列); 这两种排列方式

的工频电场的最大场强相差 2.178 kV/m。因此,采用双回特高压交流输电线路进行输电时,在对工频电场的场强比较敏感的区域如人口密度较大的区域,可以优先考虑同塔双回逆相序排列方式,而在对工频电场的场强不敏感的区域如人口密度较小的区域可以采用同相序排列的方式,或者 ABCBCA、ABCCAB、ABCCBA 这几种排列方式。

3.3 相序对工频磁场的影响分析

为弄清相序的不同排列形式对输电线路的工频磁场的影响规律。同样选择国内荆门—南阳—晋东南 1 000 kV 特高压线路杆塔形式,计算参数为:相导线最大弧垂为 11.64 m,输电电流为 3 000 A,计算距离地面 1.5 m 处的工频磁场的分布情况,分析了 6 种不同相序排列 (ABCABC、ABCACB、ABCBAC、ABCBCA、ABCCAB、ABCCBA) 下的磁场分布,仿真结果见图 8。

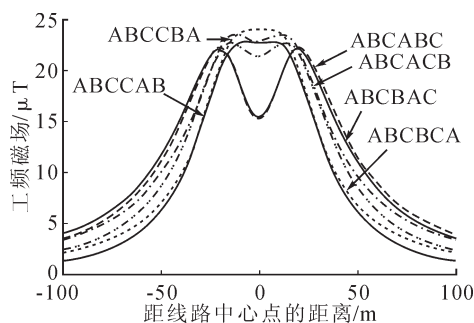


图 8 不同相序的工频磁场分布曲线

Fig. 8 Magnetic flux density distribution when the phase sequence is different

由图 8 可以看出:双回特高压交流输电线路的排列特点为左右两侧均为垂直排列,同一侧的三相导线在地面产生的磁场有一部分相互抵消掉了。在这 6 种不同相序中,逆相序排列方式的磁场强度稍大,但高场强覆盖区最小。同相序排列方式的磁场强度较小,但高场强覆盖区最大。不同相序的最大磁场强度见表 2。

表 2 不同相序的最大磁场强度

Table 2 Maximum magnetic density distribution when the phase sequence is different

相序布置	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
	ABC	ACB	BAC	BCA	CAB	CBA
最大磁场/ μT	22.23	23.50	22.05	23.50	23.50	23.96

4 结论

笔者以荆门—南阳—晋东南 1 000 kV 特高压输电线路为例,采用线单元模拟电荷法和基于毕

奥—沙伐尔定律的数值计算方法分别对 6 种不同相序(ABCABC、ABCACB、ABCBAC、ABCBCA、ABCCAB、ABCCBA)运行时的工频电场和工频磁场分布情况进行了仿真分析。分析发现:同相序排列时电场强度较大,逆相序排列时电场强度较小,两种排列方式的工频电场最大场强相差 2.178 kV/m;而工频磁场逆相序排列方式的稍大,同相序排列方式的较小,两工频磁场最大场强相差 1.91 μT 。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:27-35.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House,2005:27-35.
- [2] 汲 广,谢 超,石延辉. 云南—广东特高压直流滤波器电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(1):65-69.
JI Guang,XIE Chao,SHI Yanhui. Fault analysis of Yunnan-Guangdong UHV DC filter reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2013,34(1):65-69.
- [3] 蔡重凯,陈晓宇,金百荣,等. 特高压串补电容器内熔丝试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(2):28-33.
CAI Chongkai,CHEN Xiaoyu,JIN Bairong,et al. Research on test of internal fuse for UHV series compensation capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2013,34(2):28-33.
- [4] 郭 雄,万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京:中国电力出版社,2009:7-68.
WU Xiong,WAN Baoquan. The electromagnetic environment of power transmission and transformation engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press,2009:7-68.
- [5] 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,2008:5-23.
LIU Zhenya. The electromagnetic environment of UHVAC transmission project[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008:5-23.
- [6] 王广周,张嵩阳,闫 东,等. 500 kV 超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策[J]. 高压电器,2010,46(8):93-96.
WANG Guangzhou,ZHANG Songyang,YAN Dong,et al. Analysis of influencing factors on electromagnetic environment under 500 kV EHV transmission lines with prevention strategies[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(8):93-96.
- [7] 王 伟,郭 勇. 静止无功补偿装置的电磁干扰及抗扰性措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(1):5-8.
WANG Wei,GUO Yong. Electromagnetic interference from SVC equipment and immunity measures[J]. Power Capacitor

- & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 5-8.
- [8] 邬雄, 万保权, 路遥. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 55-58.
WU Xiong, WAN Baoquan, LU Yao. Study on electromagnetic environment for 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58.
- [9] 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殷. 特高压等级输电的电磁环境研究[J]. 中国电力, 2005, 38(6): 24-27.
WU Guifang, LU Jiayu, SHAO Fangyin. Research on electromagnetic environment of the next voltage level of transmission system in China[J]. Electric Power, 2005, 38(6): 24-27.
- [10] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
ZHOU Hao, YU Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [11] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.
SHAO Fangyin. Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 1-7.
- [12] 邬雄, 聂定珍, 万保权, 等. 架空送电线路的电磁环境及其污染影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 24-26.
WU Xiong, NIE Dingzhen, WAN Baoquan, et al. Electromagnetic environment of the overhead transmission lines and electromagnetic pollution[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 24-26.
- [13] 邬雄, 丁燕生. 我国 500 kV 电网的电磁环境状况和策略[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2408-2411.
WU Xiong, DING Yansheng. Status and strategies for electromagnetic environment of 500 kV power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2408-2411.
- [14] 李永明, 何健, 徐禄文, 等. 超高压输电线路下工频电场抑制方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 47-51.
LI Yongming, HE Jian, XU Luwen, et al. Research on suppression of power frequency electric field due to EHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 47-51.
- [15] 黄韬, 吕建红, 彭继文, 等. 基于矩量法的输电线路工频电磁场实测与计算分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 30-36.
HUANG Tao, LYU Jianhong, PENG Jiwen, et al. Calculation of power frequency electromagnetic field around transmission line based on moment method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 30-36.
- [16] 美国邦维尔电力管理局生态研究工作组. 输电线路的电效应和生态效应, 报告编号缺失[R]. 北京: 水利电力部电力科学研究院, 1987.
The United States Bovill Electric Power Administration Ecology Research Group. Electricity effect and ecological effect of transmission lines[R]. Beijing: Ministry of Water Conservancy, Electric Power Research Institute, 1987.
- [17] ANZIVINO L D. HVDC transmission line reference book[M]. Palo Alto (USA): EPRI, 1993.
- [18] LAFOREST J J. Transmission line reference book 345 kV and above (Second Edition Revised)[M]. Palo Alto (USA): EPRI, 1987.
- [19] CIGRE Working Group 31. 04. Electric power transmission at voltages of 1 000 kV and above plans for future AC and DC transmission data on technical and economic feasibility and on general design information on testing facilities and the research in progress[J]. Electra, 1983(91): 83-133.
- [20] Working Group 36.01 CIGRE. Electric and magnetic fields produced by transmission systems[M]. Paris: Paris Description of Phenomena Practical Guide for Calculation 1980.
- [21] 肖冬萍, 何为, 张占龙, 等. 特高压输电线路工频磁场三维优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 116-120.
XIAO Dongping, HE Wei, ZHANG Zhanlong, et al. The power frequency magnetic field three-dimensional optimization model of UHV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 116-120.
- [22] 文武, 彭磊, 张小武, 等. 特高压大跨越架空线路三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1821-1825.
WEN Wu, PENG Lei, ZHANG Xiaowu, et al. 3D power frequency electric field calculation of multi-span UHV overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1821-1825.
- 邹岸新(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网电磁兼容等。
- 徐禄文(1967—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网环保和电力系统电磁兼容。