

Study on the Interference of 500 kV AC Transmission Lines with Different Structure and DC Transmission Lines and the Co-Existence

Pinliang Chen^{1*}, Shu Ren², Fan Yang³, Wei He³

¹Beijing Electric Power Corporation, Beijing

²Guangzhou Foshan Power Supply Bureau, Foshan

³State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing
Email: *chenplbjep@163.com

Received: Oct. 2nd, 2012; revised: Oct. 22nd, 2012; accepted: Nov. 1st, 2012

Abstract: In the paper the interference between the 500 kV AC transmission lines with different structure and DC transmission line is investigated, and the feasibility to build the AC lines and DC lines in common corridor is analyzed. Based on the theory of conduction coupling, a novel equivalent model to analyze the influence between the parallel DC and AC transmission lines is presented. Calculation for the induced voltage on the DC transmission lines for different arrangement of the AC conductors and different distance between the AC and DC transmission lines were carried out. Results indicate that the induced voltage of the horizontal arrangement of AC lines is 20.719 kV when the distance between the AC transmission lines and DC transmission lines is 40 m, the induced voltage of the AC compact transmission lines decrease by 28.7%, and the induced voltage of the AC double circuit transmission lines on the same tower is 35.42 kV, increase by 34.42%. In addition, the induced voltage decreases with the increasing of the distance.

Keywords: Electromagnetic Interference; Induced Voltage; Capacitive Coupling; Double-Circuit Lines

不同结构 500 kV 交直流线路共走廊的干扰与可行性研究

陈品良^{1*}, 任 姝², 杨 帆³, 何 为³

¹北京市电力公司, 北京

²广东电网佛山供电局, 佛山

³重庆大学电气工程学院, 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆
Email: *chenplbjep@163.com

收稿日期: 2012 年 10 月 2 日; 修回日期: 2012 年 10 月 22 日; 录用日期: 2012 年 11 月 1 日

摘 要: 论文研究了采用不同结构的 500 kV 交流线路与直流线路共走廊时, 交流线路对直流线路的干扰, 在此基础上分析了共走廊的可行性。首先建立了交直流线路同走廊情况的电磁耦合干扰模型, 并采用该模型分别计算了交流线路单回水平排列、单回紧凑型排列和同塔双回布线方式时, 其对直流线路电磁耦合干扰的影响, 并比较分析了最适合用于交直流共走廊的交流线路形式。结果表明, 交流输电线路的排列方式对直流线路的耦合结果有影响。当水平接近距离为 40 m 时, 单回水平排列的常规型交流线路产生的感应电压值为 20.719 kV; 单回紧凑型排列线路产生的感应电压值为 14.7699 kV, 相对下降了 28.7%; 而同塔双回交流线路产生的感应电压值为 35.42 kV, 相对增加了 61%。感应电压值随着距离的增加而衰减, 衰减速率由快变慢, 逐渐趋近于零。

关键词: 电磁干扰; 感应电压; 容性耦合; 双回线路

*通讯作者。

1. 引言

随着电力工业的快速增长、输电网络的规模和电网容量不断扩大,可利用的架空线路走廊资源越来越少。为了满足社会发展的需要,提高输电效率并克服输电走廊资源的紧缺,成了迫切需要解决的问题。目前常采用的方法主要包括:1) 将现有的 HVAC 线路转换成 HVDC 线路;2) 在现有的输电线路走廊中建造新的 HVDC 线路(即混合通道)或交直流共用相同的杆塔(即同塔运行);3) 采用紧凑型排列或同塔双回布线方式对原线路进行改造;4) 采用大截面导线与耐热导线等新型输电方式。交直流共走廊输电方式提高了输电线路的经济效益,但也带来了一些新的问题。当交直流线路混合通道正常运行时,交流线路通过耦合作用,会在直流线路上产生工频感应。感应电压通过线路两侧换流设备,在换流变压器中会产生直流电流,从而影响换流变压器的正常运行。因此需要计算交流线路对直流线路的耦合干扰,对于干扰严重的线路需要采取一定措施以减少这一干扰^[1-15]。

因此论文研究了采用不同结构的 500 kV 交流线路与直流线路共走廊时,交流线路对直流线路的干扰。建立了交直流共走廊线路的电磁耦合干扰模型,并采用该模型分别计算了交流单回水平排列、单回紧凑型排列、同塔双回布线方式对直流线路电容性耦合干扰的影响。结果表明,交流输电线路的排列方式对直流线路的耦合结果有影响。水平接近距离为 40 m 时,水平排列产生的感应电压值为 20.719 kV;紧凑型排列的感应电压值为 4.7699 kV;而同塔双回线路的感应电压值为 35.42 kV。且感应电压值都随着距离

的增加呈非线性衰减,衰减速率随着距离的增加快速减缓。当距离增加至 140 m 时,单回水平排列、紧凑型排列和同塔双回线路产生的感应电压趋近于零。论文研究的模型中充分考虑了输电线路、地线和地三者之间的分布电容,计算结果能与文献[1]中采用专业软件计算的结果相吻合。

2. 交直流耦合干扰模型

2.1. 等效模型

正常运行的三相交流线路,虽然三相电压对称相等,但三相导线距直流线路的距离不同,在直流线路每极上的感应电压也就不能相互抵消^[1],所以正常运行的交流线路会通过电容性耦合在邻近并行直流线路上感应出对地的交变电压。该感应电压值可以通过导线间的分布电容计算出来。当交流线路与直流线路平行排列时,交流线路在直流线路上的感应电压可以通过图 1 所示的等效电路进行计算^[14]。

图 1 中各参数的物理意义如下:

- 1) C_{A0} 、 C_{B0} 、 C_{C0} 分别为交流线路 ABC 三相的对地电容。
- 2) C_{AG1} 、 C_{AG2} 、 C_{AG3} 、 C_{AG4} 、 C_{BG1} 、 C_{BG2} 、 C_{BG3} 、 C_{BG4} 、 C_{CG1} 、 C_{CG2} 、 C_{CG3} 和 C_{CG4} 为三相交流线路与各地线之间的等效电容。
- 3) C_{AD} 、 C_{BD} 和 C_{CD} 为交直流的线间电容。
- 4) C_{D0} 为直流正极(或负极)线路的对地电容。
- 5) C_{DG1} 、 C_{DG2} 、 C_{DG3} 和 C_{DG4} 为直流线路与各地线之间的等效电容。

假设交流线路是三相电压对称且均匀换位的理想

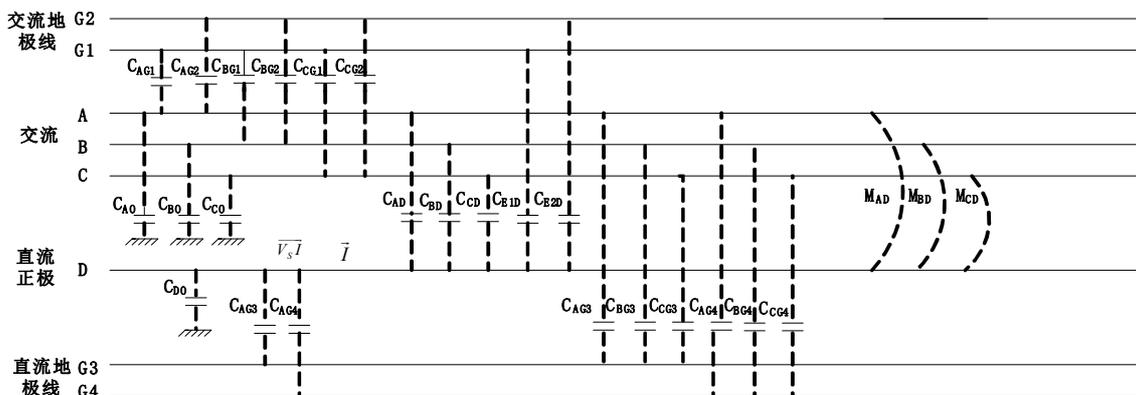


Figure 1. Equivalent model to compute the induced voltage on the DC transmission line caused by the parallel AC transmission lines
图 1. 混合通道交直流线路感应电压的等效电容模型

运行状况, 根据已知交直流传输线的参数分别计算出它们的等效电阻、电抗和电纳(电导一般取值为 0), 然后根据线路之间的分布式电容模型即可仿真得出交流线路在直流线路上的感应电压值^[16-18]。下面介绍模型中各个参数的计算公式。

2.2. 等效模型的参数计算

单位长度分裂导线的等效电阻计算公式为:

$$R_{1,20} = \rho / SN \quad (1)$$

式中: ρ 为导线材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; S 为导线的额定截面, mm^2 ; N 为子导线数。

考虑到线路的温升效应, 我们对等效电阻进行适当的温度修正, 修正的温度值选为 50°C 。其修正公式如下:

$$R_{1,50} = R_{1,20} [1 + \alpha(50 - 20)] \quad (2)$$

式中: $R_{1,50}$ 、 $R_{1,20}$ 为 50°C 、 20°C 时的电阻, Ω ; α 为电阻的温度系数。

因三相输电线正常运行时, 相电容由相导线对地电容和三相导线间的电容组成。则三相输电线的等效电容计算公式如下:

$$C_{\text{交}} = 2\pi\epsilon / \ln \left[\frac{GD}{(rNA^{N-1})^{1/N}} \right] \quad (3)$$

$$GD = \sqrt[3]{d_{AB} * d_{BC} * d_{CA}}$$

式中: GD 为相间几何平均间距, m ; r 为导线的半径, m ; d_{AB} 、 d_{BC} 、 d_{CA} 为三相输电线的线间距离, m ; ϵ 为介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, $\epsilon_r = 1$; A 为分裂导线分布的圆周半径, m 。

直流线路正极的等效电容的计算公式为

$$C_{\text{直正}} = 2\pi\epsilon / \ln \left[\frac{2hd}{(rNA^{N-1})^{1/N} \sqrt{4h^2 + d^2}} \right] \quad (4)$$

直流线路负极的等效电容的计算公式为:

$$C_{\text{直负}} = \pi\epsilon / \ln \left[\frac{2hd}{(rNA^{N-1})^{1/N} \sqrt{4h^2 + d^2}} \right] \quad (5)$$

式中: h 为分裂导线几何圆心对地的高度, m ; d 为

输电线路的线间距离, m 。

交流线路的等效电感计算公式为:

$$L_{\text{交}} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi\epsilon} * \ln \left[\frac{GD}{(rNA^{N-1})^{1/N}} \right] \quad (6)$$

式中 μ 为导线磁导率, $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_0 为自由空间的磁导率, μ_r 为相对磁导率, $\mu_r = 1$, H/m 。

直流线路的等效电感计算公式为:

$$L_{\text{直}} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi\epsilon} * \ln \left[\frac{d}{(rNA^{N-1})^{1/N}} \right] \quad (7)$$

交与直流线路正极线间电容的计算公式为:

$$C_{\text{L正}} = 4\pi\epsilon \ln \frac{f}{d} / \left[\ln \frac{2h_1}{R_1} \ln \frac{2h_2}{R_2} - \left(\ln \frac{f}{d} \right)^2 \right] \quad (8)$$

交与直流线路负极线间电容的计算公式为:

$$C_{\text{L负}} = 4\pi\epsilon \ln \frac{f}{d} / \left[\ln \frac{2h_1}{R_1} \ln \frac{2h_2}{R_2} - \left(\ln \frac{f}{d} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中: h_1 、 h_2 为分裂导线对地的高度, m ; R_1 、 R_2 为分裂导线的等效半径, $R_1 = (r_1 NA^{N-1})^{1/N}$ 、 $R_2 = (r_2 NA^{N-1})^{1/N}$, m ; f 为是一相导线与另一相导线镜像点的距离, m 。

导线的对地线电容计算公式为:

$$C_{\text{地}} = 2.42 * 10^{-11} / \left[\ln \frac{h + \sqrt{h^2 - (rNA^{N-1})^{2/N}}}{(rNA^{N-1})^{1/N}} \right] \quad (10)$$

式中 h 为分裂导线与地线的距离, m 。

根据工频耦合的特点, 在直流输电线路上的感应电压主要是由分布电容引起, 为了获得直流线路上的感应电压, 我们为在直流线路平行接近段电路模型的两端分别串接一个大电阻 $999,999,999 \Omega$ ^[2]。图 2 为模型的等效电路框图。

3. 实例分析与结果

影响共走廊并行交直流线路耦合干扰的因素有很多。例如: 交直流线路水平接近距离、交流线路的排列方式等。因此本文主要针对交流线路的不同排列方式, 包括交流单回水平排列、单回紧凑型排列、同塔双回线路相对直流线路不同距离时, 交流线路对直

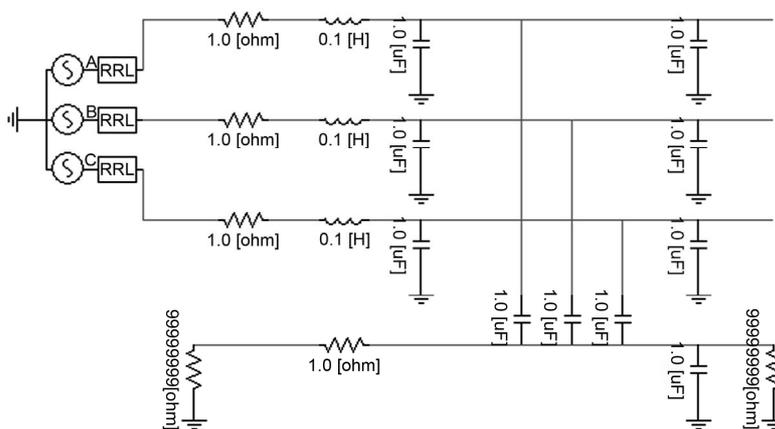


Figure 2. Simulation model of AC and DC transmission line by capacitive coupling
图 2. 交直流线路等效电路图

流线路的干扰状况。以下是模型分析的过程与结果。

3.1. 交流线路水平排列

以文献[1]中的计算实例为例，交流线路运行线电压为 525 kV；输送功率为 1000 MW；A、B、C 三相电压相角分别为 0° 、 120° 、 240° ；功率因素为 1；正常工作时电流为 1 kA；计算时平均长度为 1 km；通过地区的大地电阻率计算时取 $200 \Omega \cdot m$ 。

交流线路参数：相导线型号 LGJ-300/45，导线直径为 $d = 26.82 \text{ mm}$ ，分裂距离为 450 mm 的 4 分裂导线；直流电阻为 $0.07389 \Omega/km$ ；相导线采用水平布置，从左至右为 A 相、B 相和 C 相，相间距离为 13 m；各相导线平均对地高度为 18 m。

直流线路参数：极导线型号 ACSR-720/50，导线直径为 $d = 36.24 \text{ mm}$ ，分裂距离为 450 mm 的 4 分裂导线；直流电阻为 $0.03984 \Omega/km$ ；极导线采用水平排列方式，从左至右为正极和负极，极间距离为 14 m；极导线平均对地高度为 17 m。

为了研究交直流线路之间的距离对交直流线路之间的耦合干扰的影响，分别计算了交直流线路平行距离从 40 m 逐渐增加时，交流线路对直流线路的耦合干扰。

3.1.1. 水平排列下的容性耦合

在考虑交直流线路都有地线的情况时，由等效电路模型仿真得到交流线路在直流线路上的感应电压随平行接近距离的变化关系如图 3 所示。文献[1]中的计算结果如图 4 所示。

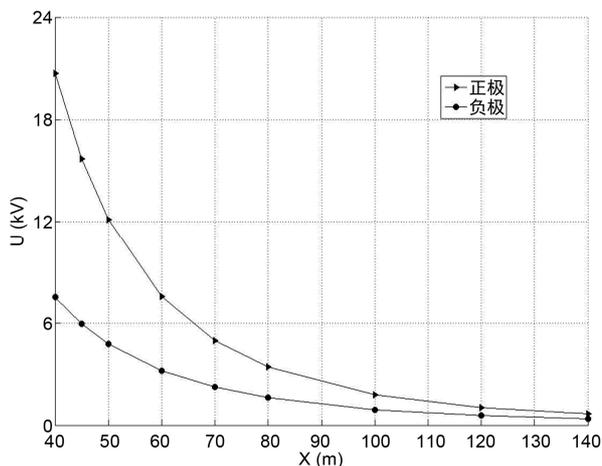


Figure 3. Induced voltages as function of distance between AC and DC lines by capacitive coupling
图 3. 容性耦合产生的感应电压随距离的变化关系

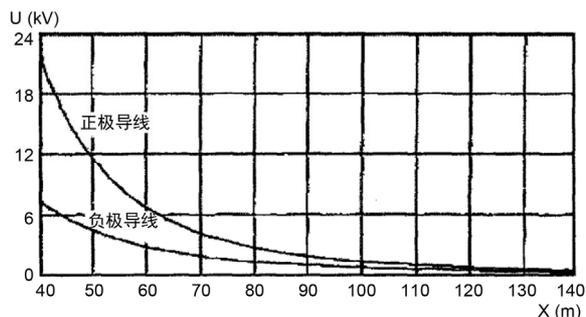


Figure 4. Result obtained in [1]
图 4. 文献[1]中的计算结果

通过图 3 与图 4 的对比可知，该模型的计算结果与文献[1]中的结果基本一致。该电路模型简单明了，只要知道输电线路的相关参数，根据上述的计算公式，可以方便快捷地估算出感应电压值。在仿真结果

中我们可以看出：交流线路通过电容性耦合在直流线路上产生的感应电压值，随着距离的增加而衰减，衰减速率由快变慢。当水平接近距离增至为 140 m 时，直流线路上的感应电压趋近于 0。所以，在 40 m 至 70 m 之内，单回交流水平排列线路通过改变水平接近距离，可以很好地限制在邻近并行直流线路上的感应电压值。

3.1.2. 水平排列下的感性耦合

正常运行的交流线路同时也会通过感性耦合在直流线路上产生一个感应电压。要对有地线的直流线路进行准确的理论计算较为复杂，在此，选择采用文献[1]所提供的方法进行处理。首先计算没有架空地线时交流线路对直流线路的感应耦合，再根据采用的地线种类，乘以相应屏蔽系数，从而得到在直流线路上产生的感应电压值。当交直流线路都有地线时，近似认为总屏蔽系数为两个屏蔽系数的乘积。当交直流线路地线同时采用钢绞线，屏蔽系数为 0.9。

根据推导可知互感 l_m 的计算公式如下：

$$l_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left(1 + \frac{4h_1 h_2}{(h_1 - h_2)^2 + d^2} \right) \quad (11)$$

在此，我们分别考虑了 2 种工况：1) 交流线路运行线电压为 525 kV，输送功率为 1000 MW；2) 该交流线路过载 20%。由感性耦合的原理，在考虑交直流线路都有地线的情况时，按上述两种运行工况，交流线路在直流线路上的感应电压随平行接近距离的变化关系如图 5 所示。

从图中可以看出，通过感性耦合作用在直流线路

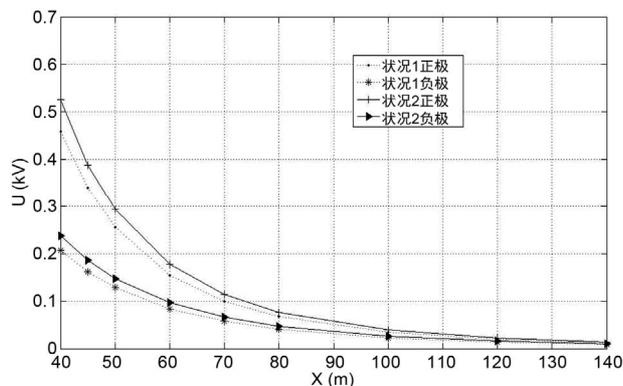


Figure 5. Induced voltages as function of distance between AC and DC lines by reactive coupling
图 5. 感性耦合电压随距离变化的关系

上面产生的感应电压值，不超过容性耦合作用产生的感应电压的 3%，数值不大，受实际工况的影响振幅微弱，对换流站设备绝缘不会造成危险，故以后不对其进行一一分析。

3.2. 交流线路紧凑型排列

紧凑型输电技术是通过导线的优化排列，缩小相间距离，减小波阻抗，增加电容，大幅度提高自然输送功率，有效压缩输电走廊的新型输电技术。它基础占地范围小和所用塔材少，无疑都减少了工程的造价，且节约了走廊面积，受到广泛的关注。

交流紧凑型排列与直流线路的几何结构如图 6 所示。交流线路参数为：相导线型号 LGJ-300/45，相导线采取三角形排列，从左至右为 A 相、B 相和 C 相；相间水平间隔为 10 m，B 相与最下层导线垂直间隔 5 m；最下层导线对地距离为 18 m。其余部分的参数等同于水平排列线路。根据紧凑型线路的参数，计算得出紧凑型交流线路对平行接近的直流线路的感应电压如图 7 所示。

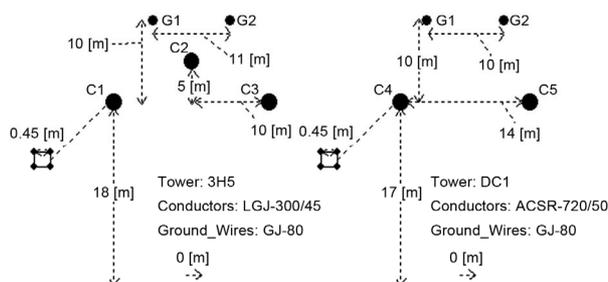


Figure 6. Schematic diagram of the AC and DC transmission lines
图 6. 平行接近交流、直流线路几何结构

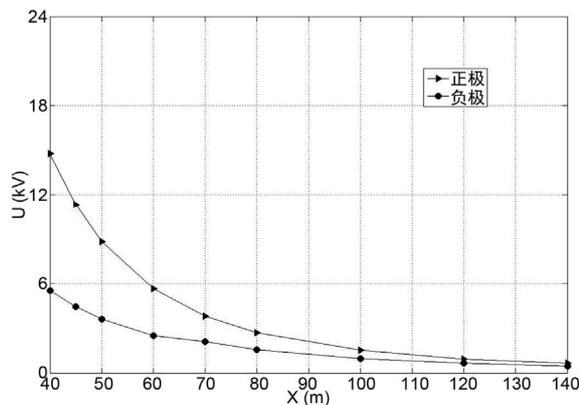


Figure 7. Induced voltages on DC lines as function of distance between AC and DC lines
图 7. 交流紧凑型排列时感应电压随距离的变化关系

比较图 3 和图 7 所示的结果可以发现：在水平接近距离为 40 m 时，紧凑型线路在直流线路正极上的感应电压 14.7699 kV 远小于水平排列线路在直流线路正极上线的感应电压 20.719 kV；且正、负极上的感应电压值都随着水平接近距离的增加而衰减，衰减速率逐渐减缓，两者的感应电压差值随着距离的增加而逐渐减小。当水平接近距离增至 140 m 时，两者的感应电压都趋近于 0。

3.3. 交流线路同塔双回排列

因交流同塔双回输电线路越来越普及，本论文还研究了交流同塔双回交流线路对同走廊并行直流线路的影响。交流线路参数：相导线型号 LGJ-300/45，最下层导线离地平均距离为 18 m，架空地线里最下层导线高度为 15 m，上下两层导线垂直间隔 5 m。直流线路参数不变。考虑到双回线路的原因，水平间距变化范围从 40 m 扩大至 180 m。导线参数与单回路模型的参数一致。

计算结果如图 8 所示。可以看出：当水平距离为 40 m 时，同塔双回交流线路对直流线路正极的感应电压值为 35.42 kV。水平距离为 140 m 时，感应电压值为 1.26 kV，比同距离下的水平排列线路感应电压值 0.46 kV 大的多。当水平距离增至 180 m 时，感应电压值仍高达 0.725 kV。

4. 结论

1) 论文提出一种基于传导耦合的交直流共走廊

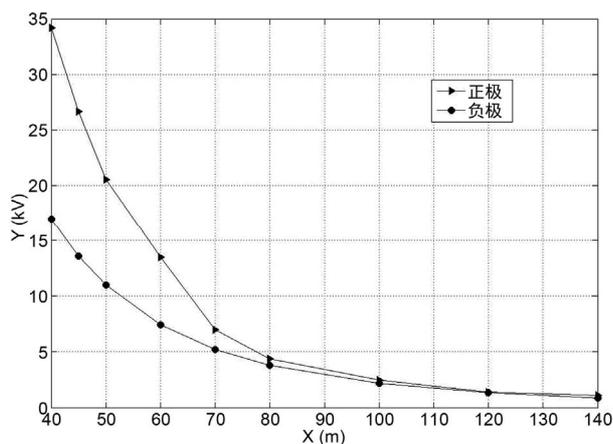


Figure 8. Induced voltages on DC lines as function of distance between AC and DC line

图 8. 交流为同塔双回时感应电压随距离的变化关系

线路之间的干扰分析模型，并给出了模型的建立方法，以及各个参数的计算公式。

2) 交流线路与直流线路的水平距离对感应电压值呈非线性的影响。以水平排列交流线路为例，水平距离从 40 m 至 70 m 时，水平距离变化了 30 m，感应电压值从 20.7190 kV 变化到 4.9710 kV，总体下降了 15.748 kV。水平距离从 70 m 至 100 m 时，感应电压值从 4.9710 kV 变化到 1.7894 kV，总体下降了 3.18165 kV。从 100 m 至 140 m 时，总体感应电压值从 1.7894 kV 变化到 0.6585 kV，总体下降了 1.1309 kV。可以看出前 30 m 距离对感应电压影响很大，占了整体的 78.5%。在此范围内改变水平接近距离就可以很好的控制对直流线路上的感应电压值。

3) 交流线路的排列方式对直流线路的感应电压有显著影响。当水平距离为 40 m 时，紧凑型交流线路对直流线路的感应电压值相对水平排列下降了 28.7%。突显出紧凑型线路在输电走廊紧缺的情况下，有效地削弱了感应电压对并行直流线路影响的劣势。

4) 同塔双回线路对平行接近的直流线路影响较大，距离为 40 m 时，直流线路上的感应电压比水平排列的感应电压增加 34.42%。当距离增至 180 m 时，感应电压值仍高达 0.725 kV。则当交流线路选择同塔双回输电方式时，可考虑采用交流线路在平行段进行全换位的方法来减小电容性耦合的影响。

参考文献 (References)

- [1] 邵方殷. 交流线路对平行接近的直流线路的工频电磁感应[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 59-63.
- [2] 赵松涛. 交流输电线路对并行直流输电线路电磁感应的仿真研究[D]. 华北电力大学, 2006.
- [3] 周沛洪, 修木洪, 聂定珍. 同廊道假设交直流线路的相互影响[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 5-9.
- [4] G. F. Wu, J. Yu, X. S. Guo, et al. Study on least approaching distances between 800 kV DC transmission line and 1000 kV AC transmission line a hybrid corridor. Electric Power, 2007, 40(12): 22-26.
- [5] B. A. Clarimont, G. B. Johnson, L. E. Zaffanella, et al. The effects of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1338-1350.
- [6] F. Yang, H. Wu, W. He, et al. Investigation on the electric field inverse problem of HV transmission lines and discussion on its application. Applied Computational Electromagnetic Society Journal, 2010, 25(3): 129-136.
- [7] F. Yang, W. He and Y. C. Fu. Study on the electric-field inverse problem in the environmental evaluation of HV transmission lines. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 98-103.
- [8] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

- [9] 中国电气工程大典编辑委员会. 中国电气工程大典 1 版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 132-146.
- [10] 乐勋. 大截面架空导线输电技术的研究与分析[J]. 电线电缆, 2006, 39(8): 12-17.
- [11] 齐旭, 曾德文, 史大军等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.
- [12] 王琦. 罗百交流线路对云广±800 kV 直流电磁干扰研究[J]. 南方电网技术研究, 2007, 3(1): 27-31.
- [13] G. Flisberg. AC/DC touching line study. Sweden: ABB Power System, 2000.
- [14] 李新年. 与特高压直流平行架设的交流线路对特高压直流的影响及措施的仿真研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [15] 李新年, 蒋卫平, 李涛等. 交流线路对平行架设特高压直流线路的影响及限制措施[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 45-51.
- [16] G. F. Wu, J. Yu, X. S. Guo, et al. Study on least approaching distances between 800 kV DC transmission line and 1000 kV AC transmission line a hybrid corridor. Electric Power, 2007, 40(12): 22-26.
- [17] B. A. Clarimont, G. B. Johnson, L. E. Zaffanella, et al. The effects of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1338-1350.
- [18] Y. S. Yuji. Study on reduction in electric field, charged voltage, ion current and ion density under HVDC transmission lines by parallel shield wires. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1351-1359.