

# 耦合因素对特高压交流同塔双回线路不平衡度的影响分析及相序优化

张龙伟<sup>1</sup>, 吴广宁<sup>1</sup>, 朱 军<sup>1</sup>, 吴静文<sup>1</sup>, 石超群<sup>1</sup>, 范建斌<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 针对特高压同塔输电线路之间更强的电磁耦合作用加剧了电流不平衡度的问题, 利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了特高压交流同塔双回输电线路模型, 分析了输电线路之间的电磁耦合作用以及架设耦合地线对电流不平衡度的影响, 确定了线路导线的最优排列方式。分析结果表明: 当一回线路处于重载而另一回线路处于轻载情况时电流不平衡度较大, 当双回线路同时处于重载情况时电流不平衡度较小; 当交流线路呈逆相序排列时, 不平衡度处于较低水平; 架设耦合地线时, 穿越负序不平衡度和穿越零序不平衡度增加, 而环流负序不平衡度和环流零序不平衡度减小; 耦合地线横向位置对电流不平衡度影响较大, 其架设高度对电流不平衡度影响较小。

**关键词:** 特高压输电; 交流输电; 同塔双回线路; 不平衡度; 电磁耦合; 耦合地线; 相序; 模型

**中图分类号:** TM 721.2; TM 723

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.021

## 0 引言

为缓解长期困扰我国经济社会发展的煤电运紧张局势, 特高压交流输电已成为电网发展的必然趋势。我国首个特高压交流同塔双回输电工程——皖电东送工程, 已于 2013 年底投入运行, 此工程可充分发挥大容量、远距离、少占地等优势, 示范效应深远。特高压同塔双回输电为社会带来显著效益, 但同时也会产生一些问题, 例如: 特高压交流同塔双回输电线路走廊宽度较小, 线路之间电磁耦合作用更加强烈, 加剧了特高压同塔双回输电线路的不平衡电流问题<sup>[1-2]</sup>。

国内外学者对不平衡电流问题进行了大量研究, 提出了基于 PSS/E 外网多端口戴维南等值的不平衡度分析方法<sup>[3]</sup>, 采用特征模量分解手段精确计算了环网中线路相电流分布<sup>[4]</sup>, 分析了线路换位对不平衡电流的控制作用<sup>[5-7]</sup>, 评估了线路相序排列、线路长度、电压等级、线路潮流对不平衡电流的影响<sup>[7-10]</sup>, 阐述了环流不平衡度对继电保护以及线路损耗的影响<sup>[11]</sup>, 给出了改善不平衡电流的建议<sup>[12]</sup>。但是就目前而言, 针对特高压同塔多回输电线路不平衡电流以及架设耦合地线对不平衡电流的影响方面的研究非常少见。

基于以上分析, 本文利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立了 1000 kV 特高压交流同塔双回输电线路模型, 分析了输电线路之间的电磁耦合

作用以及架设耦合地线对不平衡电流的影响, 确定了线路导线的最优排列方式, 相关结论可为工程设计和技术规范提供参考与指导。

## 1 同塔双回输电线路不平衡电流分析

同塔双回输电线路两端电压差与各相电流的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_{A1} & U_{B1} & U_{C1} & U_{A2} & U_{B2} & U_{C2} \end{bmatrix}^T = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_{A1} & I_{B1} & I_{C1} & I_{A2} & I_{B2} & I_{C2} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中,  $U_{m1}$ 、 $U_{m2}$  和  $I_{m1}$ 、 $I_{m2}$  ( $m=A, B, C$ ) 分别为各回线路两端各相的电压差和电流;  $\mathbf{Z}$  为线路阻抗矩阵。

对式(1)进行对称分量变换得到电压序分量和电流序分量之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_{P1} & U_{N1} & U_{Z1} & U_{P2} & U_{N2} & U_{Z2} \end{bmatrix}^T = \mathbf{Z}_s \begin{bmatrix} I_{P1} & I_{N1} & I_{Z1} & I_{P2} & I_{N2} & I_{Z2} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

其中,  $U_{P_i}$ 、 $U_{N_i}$ 、 $U_{Z_i}$  ( $i=1, 2$ ) 分别为第  $i$  回线路电压差的正序、负序、零序分量;  $I_{P_i}$ 、 $I_{N_i}$ 、 $I_{Z_i}$  ( $i=1, 2$ ) 分别为第  $i$  回线路电流的正序、负序、零序分量;  $\mathbf{Z}_s$  为序阻抗矩阵。

对式(2)进行求逆运算得到:

$$\begin{bmatrix} I_{P1} & I_{N1} & I_{Z1} & I_{P2} & I_{N2} & I_{Z2} \end{bmatrix}^T = \mathbf{Y}_s \begin{bmatrix} U_{P1} & U_{N1} & U_{Z1} & U_{P2} & U_{N2} & U_{Z2} \end{bmatrix}^T = \mathbf{Y}_s \mathbf{U} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{Y}_s = \mathbf{Z}_s^{-1}$ 。

则两回输电线路的不平衡电流如下:

$$I_{N1} = Y_{s2} U, \quad I_{Z1} = Y_{s3} U \quad (4)$$

$$I_{N2} = Y_{s5} U, \quad I_{Z2} = Y_{s6} U \quad (5)$$

其中,  $I_{N_i}$ 、 $I_{Z_i}$  ( $i=1, 2$ ) 分别为第  $i$  回输电线路的负序、零序电流;  $Y_{sk}$  ( $k=2, 3, 5, 6$ ) 为  $\mathbf{Y}_s$  的第  $k$  行矩阵。

收稿日期: 2013-07-29; 修回日期: 2014-05-14

基金项目: 国家电网公司科技项目(2011-WG-4)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(2011-WG-4)

输电线路电流不平衡度可分为穿越型和环流型 2 类,其定义分别如式(6)、(7)所示。

$$M_{I2} = \left| \frac{I_{N1} + I_{N2}}{I_{P1} + I_{P2}} \right| \times 100\%, \quad M_{I0} = \left| \frac{I_{Z1} + I_{Z2}}{I_{P1} + I_{P2}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

$$M_{c2} = \left| \frac{I_{N1} - I_{N2}}{I_{P1} + I_{P2}} \right| \times 100\%, \quad M_{c0} = \left| \frac{I_{Z1} - I_{Z2}}{I_{P1} + I_{P2}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

其中,  $M_{I2}$ 、 $M_{I0}$  分别为穿越负序不平衡度和零序不平衡度;  $M_{c2}$ 、 $M_{c0}$  分别为环流负序不平衡度和零序不平衡度。

我国对超高压以上等级的输电线路的不平衡度未予以全面明确规定。GB/T15543—1995《电能质量三相电压允许不平衡度》中规定零序和负序电压不平衡度小于 2%, 发电机相关规程 GB755—2000《旋转电机定额和性能》中规定负序电流不平衡度小于 8%<sup>[13-14]</sup>。

### 2 计算模型

以国内某特高压交流同塔双回输电线路为例, 建立输电线路模型, 如图 1 所示。图中,  $U_r$ 、 $U_s$  分别为线路两端电压值。

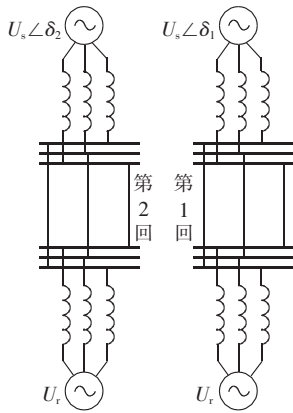


图 1 同塔双回输电线路模型

Fig.1 Model of dual transmission lines installed on same tower

线路采用伞形布置方式, 线路运行电压 1000 kV, 线路总长 164 km, 全线不进行换位, 土壤电阻率为  $600 \Omega \cdot m$ 。交流线路相线布置情况如图 2 所示, 导线和地线参数如表 1 所示。

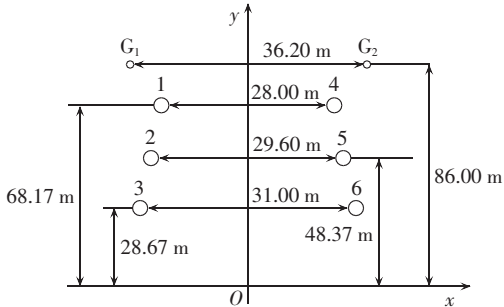


图 2 交流线路布置

Fig.2 Arrangement of AC transmission lines

表 1 导线和地线参数

Tab.1 Parameters of conductor and ground wire

类型	型号	分裂间距/mm	弧垂/m	直流电阻/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	计算半径/mm	分裂数
导线	8×LGJ-630/45	400	18.6	0.046	33.6	8
地线	LBGJ-240-20AC	—	13.0	0.625	17.0	—

### 3 输电线路间电磁耦合作用对电流不平衡度的影响

特高压同塔双回输电线路之间存在着强烈的电磁耦合作用, 该作用使每相电流在固有电流的基础上叠加了一部分耦合电流, 加剧了相电流的不平衡度。为研究电磁耦合作用对电流不平衡度的影响, 文中交流线路采用逆相序, 第 1 回线路正常运行电流为 2 kA 且处于重载运行方式, 分别计算了在不同电压初相角  $\delta_2$ , 即不同负载情况下, 第 2 回线路的序电流和相电流, 计算结果分别如图 3 和图 4 所示。

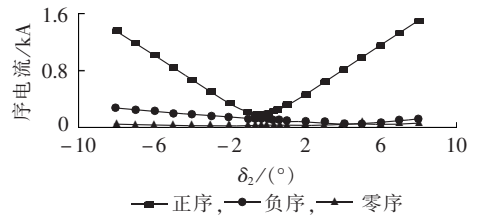


图 3 第 2 回线路序电流

Fig.3 Sequence currents of second line

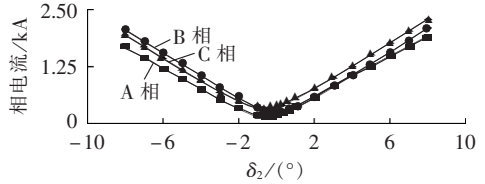


图 4 第 2 回线路相电流

Fig.4 Phase currents of second line

运用式(6)、(7)计算了负序电流和零序电流的不平衡度, 计算结果如图 5 所示。

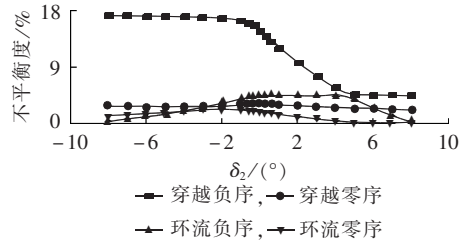


图 5 电流不平衡度

Fig.5 Current imbalance

由图 3、4 可以看出, 第 2 回线路电压初相角较小且处于轻载情况时, 正序电流、负序电流和零序电流数值相差不大, 相电流数值比较接近; 第 2 回线路电压初相角较大且处于重载情况时, 负序电流、零序

电流相对于正序电流较小,相电流数值差距增大。从图 5 中可以看出,第 2 回线路电压初相角较小且处于轻载情况时,电流不平衡度较大;第 2 回线路电压初相角较大且处于重载情况时,电流不平衡度较小。其中,当第 2 回线路电压初相角为  $5^\circ$  时,穿越负序不平衡度为 4.70%,环流负序不平衡度为 3.93%,均满足小于 8% 的要求。但当第 2 回线路潮流方向与第 1 回线路相反、电压初相角较大且处于重载时,穿越负序不平衡度仍然处于较高水平。

当第 2 回线路处于轻载情况时,耦合电流占第 2 回线路电流比重较大;当第 2 回线路处于重载情况时,耦合电流占第 2 回线路电流比重较小。因此,针对特高压同塔双回输电线路,当一回线路处于重载而另一回线路处于轻载情况时,电磁耦合作用对线路电流不平衡度影响较大,电流不平衡度较大;当双回线路同时处于重载情况时,电磁耦合作用对线路电流不平衡度影响较小,电流不平衡度较小。建议实际工程设计时可以适当加大线路之间的距离,而运行线路之间的潮流差异则不宜过大。

#### 4 交流线路导线排列方式对电流不平衡度的影响

交流线路相序对线路间耦合参数影响较大,从而对线路电流不平衡度。文中选取了 3 种导线排列方式,即同相序、异相序、逆相序,如图 6 所示。第 1 回线路运行电流仍保持 2 kA,在第 2 回线路电源初相角为  $5^\circ$  时,分别计算了 3 种相序排列方式下的电流不平衡度,计算结果如图 7 所示。

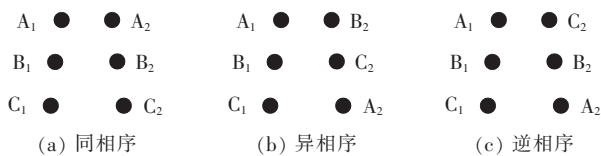


图 6 导线排列方式

Fig.6 Arrangement of conductors

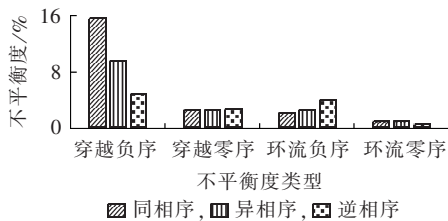


图 7 相序对电流不平衡度的影响

Fig.7 Influence of phase sequence on current imbalance

由图 7 可以看出,双回线路呈同相序、异相序、逆相序排列时,穿越负序不平衡度依次减小,而环流负序不平衡度依次增大;穿越零序不平衡度在交流线路呈逆相序方式排列时最大;环流零序不平衡度

在交流线路呈异相序排列时最大。交流线路呈逆相序排列时,4 种不平衡度表征参量虽然不都是最小的,但总体都处于较低的水平,因此笔者建议采用逆相序排列方式。

#### 5 耦合地线对电流不平衡度的影响

##### 5.1 架设耦合地线对电流不平衡度的影响

耦合地线在改善输电线路电磁环境和电磁耦合方面具有重要作用<sup>[15-16]</sup>,但耦合地线的架设必然会影响线路之间的耦合参数,从而导致电流不平衡度的变化。文中交流线路采用逆相序,保持第 1 回线路运行电流 2 kA,在第 2 回线路电源初相角为  $5^\circ$  时,分别计算了不架设耦合地线和架设 1 根耦合地线(见图 8)这 2 种情况下的电流不平衡度,计算结果如图 9 所示。

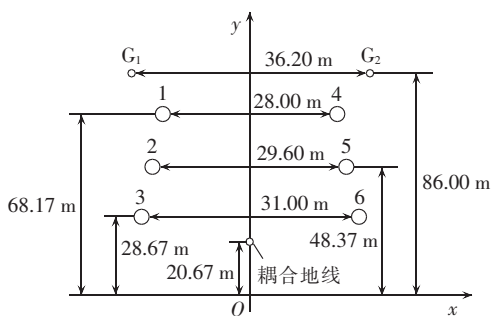


图 8 耦合地线架设示意图

Fig.8 Schematic diagram of coupling ground wire installation

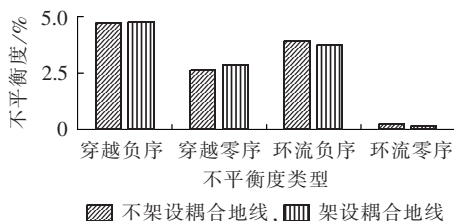


图 9 耦合地线对电流不平衡度的影响

Fig.9 Influence of coupling ground wire on current imbalance

由图 9 可以看出,相对不架设耦合地线情况,架设耦合地线时,穿越负序不平衡度和穿越零序不平衡度均有所增加,而环流负序不平衡度和环流零序不平衡度均有所减小。其中,穿越负序不平衡度增加了 0.04%,穿越零序不平衡度增加了 10.59%,环流负序不平衡度减小了 6.62%,环流零序不平衡度减小了 86.36%。上述结果表明,架设耦合地线对环流零序不平衡度影响很大,对其他 3 种不平衡度影响相对较小。零序电流对线路保护、通信等问题影响较为明显,因此耦合地线对线路不平衡度的影响不容忽视。

##### 5.2 耦合地线水平位置对电流不平衡度的影响

耦合地线空间位置的变化改变了线路间的耦合



程度,导致了电流不平衡度相应的改变。文中交流线路采用逆相序排列方式,保持耦合地线架设高度20.67 m,改变耦合地线的横向位置,分别计算了耦合地线与杆塔中心距离 $d$ 不同的情况下电流的不平衡度,计算结果如图10所示。图10中,横坐标负数表示耦合地线在靠近3号导线侧,正数表示耦合地线在靠近6号导线侧。

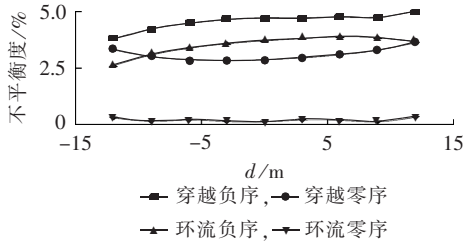


图10 耦合地线横向位置对电流不平衡度的影响  
Fig.10 Influence of transverse position of coupling ground wire on current imbalance

由图10可以看出,在耦合地线位置从靠近3号导线侧变化到靠近6号导线侧的过程中,穿越负序不平衡度、环流负序不平衡度总体呈现先增大后减小的趋势;穿越零序不平衡度呈现先减小后增大的趋势,环流零序不平衡度在小范围内波动,变化程度不是很明显。上述结果表明,耦合地线与杆塔中心的距离对电流不平衡度影响比较明显,工程设计时应合理选择耦合地线架设的横向位置。为尽量降低电流不平衡度,笔者建议耦合地线与杆塔中心的距离保持在 $-10\sim-5$  m范围内。

### 5.3 耦合地线架设高度对电流不平衡度的影响

交流线路采用逆相序排列方式,保持耦合地线水平位置在杆塔中心,改变耦合地线的架设高度 $h$ ,分别计算了耦合地线不同架设高度情况下电流的不平衡度,计算结果如图11所示。

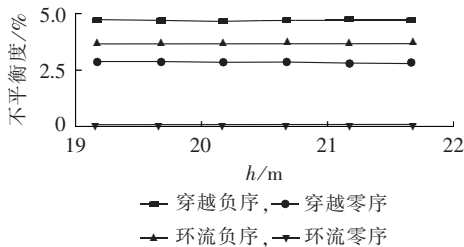


图11 耦合地线架设高度对电流不平衡度的影响  
Fig.11 Influence of coupling ground wire height on current imbalance

由图11可以看出,随着耦合地线架设高度的增大,4种电流不平衡度基本保持不变。上述结果表明,耦合地线架设高度对电流不平衡度影响较小。因此,工程设计时耦合地线架设高度应从电磁场分布情况和线间绝缘状况的角度进行合理选择。

## 6 结论

a. 一回线路处于重载而另一回线路处于轻载时,电磁耦合作用对电流不平衡度影响较大,电流不平衡度较大;双回线路均处于重载时,电磁耦合作用对电流不平衡度的影响较小,电流不平衡度较小。

b. 交流线路相序对电流不平衡度影响较大,当交流线路呈逆相序排列时,不平衡度处于较低水平,推荐采用逆相序排列方式。

c. 架设耦合地线时,穿越负序不平衡度和穿越零序不平衡度增加,而环流负序不平衡度和环流零序不平衡度减小。耦合地线位置从线路走廊一侧水平变化到另一侧,穿越负序不平衡度、环流负序不平衡度总体呈现先增大后减小的趋势;穿越零序不平衡度呈现先减小后增大的趋势,环流零序不平衡度变化程度不是很明显。耦合地线架设高度对电流不平衡度影响较小。

### 参考文献:

- [1] KALYUZHNY A, KUSHNIR G. Analysis of current unbalance in transmission systems with short lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2): 1040-1048.
- [2] 周冠波, 李晓华, 蔡泽祥, 等. 同杆多回线路不平衡问题分析与对策[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 58-63.  
ZHOU Guanbo, LI Xiaohua, CAI Zexiang, et al. Analysis and countermeasures for the unbalance problem of multi-parallel line on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 58-63.
- [3] 靳希, 吴文辉, 吴世敏. 基于戴维南等值的输电线路不平衡度分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 7-11.  
JIN Xi, WU Wenhui, WU Shimin. New methods of analysis of the unbalanced degree of the transmission line based on Thevenin equivalent[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 7-11.
- [4] 林军. 相序排列对超高压线路环网电流分布影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 560-564.  
LIN Jun. Effect of phase position on the current distribution on EHV loop grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 560-564.
- [5] 胡丹晖, 蔡汉生, 涂彩琪, 等. 500 kV 同杆并架双回线路电气特性研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 21-23.  
HU Danhui, CAI Hansheng, TU Caiqi, et al. Study on the electrical characteristic of 500 kV common-tower double-transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 21-23.
- [6] 王晓彤, 林集明, 班连庚, 等. 1000 kV 同塔双回线路不平衡度及换位方式分析[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 1-5.  
WANG Xiaotong, LIN Jiming, BAN Liangeng, et al. Analysis on unbalance factor and transposing modes for 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 1-5.
- [7] 郭志红, 程慈源, 苏建军, 等. 山东电网部分 500 kV 线路不平衡电流偏大的原因分析及改善措施[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 32-36.

- GUO Zhihong, CHENG Ciyuan, SU Jianjun, et al. Analysis on oversize unbalanced current in part of 500 kV transmission lines of Shandong Power Grid and corresponding improvement measures[J]. Power System Technology, 2006, 30(21):32-36.
- [8] 邹林, 林福昌, 龙兆芝, 等. 输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 电网技术, 2008, 32(2):283-286.
- ZOU Lin, LIN Fuchang, LONG Zhaozhi, et al. Influence factors analysis of unbalance parameter for overhead lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2):283-286.
- [9] 靳希, 吴文辉, 吴世敏. 高压输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 上海电力学院学报, 2010, 26(6):525-528.
- JIN Xi, WU Wenhui, WU Shimin. Analysis of unbalance degree factors of high-voltage transmission line[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2010, 26(6):525-528.
- [10] 韦刚, 张子阳, 房正良, 等. 多回输电线路并架的不平衡性分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(10):9-11.
- WEI Gang, ZHANG Ziyang, FANG Zhengliang, et al. Analysis of imbalance of the parallel multi-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10):9-11.
- [11] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):202-208.
- LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalance current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4):202-208.
- [12] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 同杆双回线环流对方向纵联保护的影响及改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8):103-107.
- LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Influence of circulating current in same-pole double-circuit transmission lines on directional pilot protection and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8):103-107.
- [13] 刘振亚. 特高压交流输电技术[M]. 4版. 北京:中国电力出版社, 2008:160-161.
- [14] 刘振亚. 特高压交流输电技术[M]. 6版. 北京:中国电力出版社, 2010:313-315.
- [15] 路遥, 邹雄, 万保权, 等. 交流特高压线路下电场强度的改善[J]. 高电压技术, 2006, 32(12):66-68, 82.
- LU Yao, WU Xiong, WAN Baoquan, et al. Study on the measurement of reducing electric field intensity under UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12):66-68, 82.
- [16] 任姝, 何为, 杨帆, 等. 同塔交直流线路容性耦合干扰的分析与计算[J]. 高压电器, 2012, 48(4):39-45.
- REN Shu, HE Wei, YANG Fan, et al. Analysis and calculation for the capacitive coupling of the AC and DC transmission lines on one tower[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4):39-45.

#### 作者简介:



张龙伟

张龙伟(1987-),男,河北石家庄人,硕士,研究方向为特高压直流输电技术及交流互联系统稳定性;

吴广宁(1969-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,从事特高压绝缘技术与电气化铁路方面的教学与研究工作(E-mail: gnwu@swjtu.cn);

朱军(1985-),男,四川成都人,博士,研究方向为电力系统过电压与电磁暂态。

## Influences of coupling factors on imbalance of dual UHVAC transmission lines installed on same tower and optimization of phase sequence arrangement

ZHANG Longwei<sup>1</sup>, WU Guangning<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>1</sup>, WU Jingwen<sup>1</sup>, SHI Chaoqun<sup>1</sup>, FAN Jianbin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Aiming at the intense current imbalance caused by the stronger electromagnetic coupling between UHV transmission lines installed on the same tower, a corresponding model is established with PSCAD/EMTDC for analyzing the influences of the electromagnetic coupling between transmission lines and the installed coupling ground wire on the current imbalance and determining the optimal phase sequence arrangement. The analytical results show that, the imbalance is bigger when one is heavily loaded while another one is slightly loaded; it is smaller when both lines are heavily loaded; it is smaller when AC lines are arranged in reverse phase sequence; when the coupling ground wire is installed, the imbalances of through negative-sequence and through zero-sequence increase while those of circulating negative-sequence and circulating zero-sequence decrease; the influence of the transverse position of coupling ground wire on the current imbalance is bigger while that of its height is smaller.

**Key words:** UHV power transmission; AC power transmission; dual-line installed on same tower; imbalance; electromagnetic coupling; coupling ground wire; phase sequence; models