

# 同走廊线路零序互感对线路等值零序阻抗的影响

徐习东<sup>1</sup>, 黄旭聪<sup>1</sup>, 王全<sup>1</sup>, 方愉冬<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 以同走廊平行架设的双回线路为模型, 研究线路避雷线和邻近平行线路对故障线路等值零序阻抗的影响。研究分析了线路间距、避雷线材料及运行状态等因素对线路等值零序阻抗计算的影响, 并推导出基于 Carson 线路模型的等值零序阻抗计算方法; 通过一个实例直观地比较分析各种因素的作用。理论分析与仿真计算表明, 平行线路间的互感影响随间距增大而减弱, 采用良导体避雷线会在一定程度上降低等值零序阻抗, 同走廊线路接地检修时对故障线路参数的影响最为显著。

**关键词:** 同走廊线路; 零序互感; 等值零序阻抗

## Influence of zero-sequence mutual inductance of transmission lines of the same passage on equivalent zero-sequence impedance

XU Xi-dong<sup>1</sup>, HUANG Xu-cong<sup>1</sup>, WANG Quan<sup>1</sup>, FANG Yu-dong<sup>2</sup>

(1. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Electric Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Based on a model of two parallel lines, this paper studies the influence of the overhead earth wire and the adjacent parallel lines on the equivalent zero-sequence impedance of fault line. The influence of such factors as distance between parallel lines, the material of overhead earth wire and the operation condition on the calculation of line equivalent zero-sequence impedance is analyzed. An algorithm of equivalent zero-sequence impedance, which is based on Carson line model, is given as well. Finally, the influences of all factors mentioned above are compared through an example. Theoretical analysis and simulation indicate that the influence of mutual inductance decays with the increase of the distance between lines, a high conductivity overhead earth wire will decrease the equivalent zero-sequence impedance to a certain degree, and grounding overhauling of transmission lines of the same passage affects the fault line parameters the most.

**Key words:** transmission lines of the same passage; zero-sequence mutual inductance; equivalent zero-sequence impedance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0001-05

## 0 引言

随着电力系统的发展, 高压输电线路不断增加, 而当前土地资源日益紧张, 造成输电线路走廊受限。为提高土地利用率和降低建设投资, 同一输电线路走廊内往往平行架设多回线路甚至同杆架设。同走廊平行线路间存在强烈的电磁耦合作用, 当一回线路发生不对称故障时, 在邻近平行线路及避雷线上会感应出一定的零序电流<sup>[1]</sup>。这个电流与故障回线中的零序电流反向, 形成额外的去磁作用, 引起故障线路等值零序阻抗的较大变化, 进而可能导致线路继电保护装置的不正确动作<sup>[2-4]</sup>。

平行线路间可能同时存在电的联系和磁的联系, 鉴于在继电保护整定计算中往往计入电气联系

造成的影响, 而忽略了线路间磁的耦合, 本文主要研究平行双回线路间磁耦合作用的影响。本文以同走廊平行架设的双回线路为模型, 分别考察线路避雷线和同走廊平行线路对线路等值零序阻抗的影响, 并比较分析同走廊线路处于正常运行及接地检修时的差别。

## 1 线路零序阻抗

三相输电线路流过零序电流时, 需以大地构成回路, 因此架空线路的零序阻抗不仅取决于三相导线本身, 还与大地阻抗有关<sup>[5]</sup>。根据卡尔逊公式, 可以用一根与架空导线平行的虚拟地线代替大地, 从而可推导出线路零序阻抗计算公式。

据文献[5]可知, 三相输电线路完全换位时, 零

序自阻抗为

$$Z_0 = r_a + 3r_c + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_c^3}{D_s D_{eq}^2} = r_a + 3r_c + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_c}{D_{st}} \quad \Omega/\text{km} \quad (1)$$

线路间零序互阻抗为:

$$Z_m = 3 \left( r_c + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_c}{D_m} \right) \quad \Omega/\text{km} \quad (2)$$

同理可得避雷线零序自阻抗为:

$$Z_g = 3r_g + 3r_c + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_c}{D_{sg}} \quad \Omega/\text{km} \quad (3)$$

其中:  $D_c$  代表虚拟地线的等值深度, 它是大地电阻率  $\rho_c (\Omega \cdot \text{m})$  与频率  $f(\text{Hz})$  的函数, 即

$$D_c = 660 \sqrt{\frac{\rho_c}{f}}; \quad D_{st} \text{ 表示三相导线组自几何均距,}$$

$D_m$  表示两线路间的互几何均距;  $r_a$ 、 $r_g$ 、 $r_c$  ( $\Omega/\text{km}$ ) 分别表示输电线、避雷线及大地的单位长度电阻。

## 2 同走廊线路影响分析

对于图 1 所示的同走廊双回线情况, 线路间没有电气联系, 只存在磁场的耦合。每一回线都带有对应的避雷线, 若为双避雷线则将进行换位<sup>[6]</sup>, 故可以等效为一根避雷线来处理; 为简化计算, 本文中均采用单避雷线模型。将同走廊双回线标示为 M、N, 则  $g_1$ 、 $g_2$  分别表示回线 M、N 所对应的避雷线。

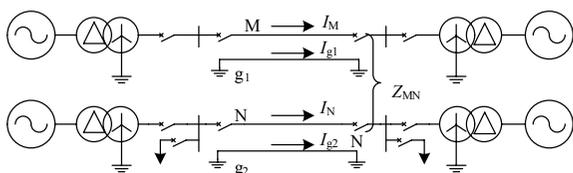


图 1 同走廊双回线路示意图  
Fig.1 Two adjacent parallel lines

M 回线发生接地故障而出现零序电流时, 会在 N 回线及两根避雷线上感应出零序电势, 此时对应的零序网络上各线电压、电流所满足的回路电压方程如下所示。阻抗矩阵中对角元素表示各线零序自阻抗, 非对角元素则表示线间零序互阻抗。

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_M \\ \dot{U}_N \\ \dot{U}_{g1} \\ \dot{U}_{g2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{MM} & Z_{MN} & Z_{Mg1} & Z_{Mg2} \\ Z_{MN} & Z_{NN} & Z_{Ng1} & Z_{Ng2} \\ Z_{Mg1} & Z_{Ng1} & Z_{g1} & Z_{g1g2} \\ Z_{Mg2} & Z_{Ng2} & Z_{g1g2} & Z_{g2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_M \\ \dot{I}_N \\ \dot{I}_{g1} \\ \dot{I}_{g2} \end{pmatrix}$$

由于 N 回线本身不存在零序电源, 且其零序等值电路始终能构成回路, 故 N 回线零序电压  $U_N$  恒等于零。由于电磁耦合作用, 避雷线上会感应出零序电流, 反过来对导线产生互感作用。线路间的互感作用会使故障线路的零序电压电流关系发生变化, 将零序互阻抗折算到线路上即得到等值零序阻抗。同走廊线路不同运行状态下及是否考虑避雷线, 双回线零序网络可以有不同的简化结果, 以下详述四种情况下对等值零序阻抗的影响。

### 2.1 单回线避雷线影响分析

若仅考虑单回线对应的避雷线的影响, 回路方程可简化为:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_M \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{MM} & Z_{Mg1} \\ Z_{Mg1} & Z_{g1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_M \\ \dot{I}_{g1} \end{pmatrix}$$

等值零序阻抗可表示为:

$$Z_{01} = \frac{U_M}{I_M} = Z_{MM} - \frac{Z_{Mg1}^2}{Z_{g1}} \quad (4)$$

### 2.2 双回线互感影响分析

当忽略避雷线, 单独考虑同走廊双回线之间的互感影响时, 对应的回路电压方程如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_M \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{MM} & Z_{MN} \\ Z_{MN} & Z_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_M \\ \dot{I}_N \end{pmatrix}$$

此时等值零序阻抗可表示为

$$Z_{02} = Z_{MM} - \frac{Z_{MN}^2}{Z_{NN}} \quad (5)$$

双回线互感不仅与回线间距相关, 还与同走廊回线的运行状态相关。同走廊回线处于接地检修状态时零序网络如图 2 所示, 两端直接接地。

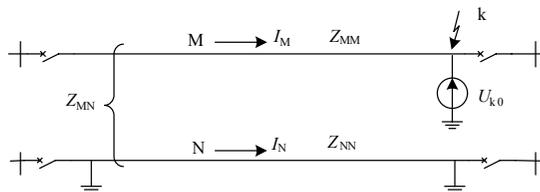


图 2 同走廊检修状态下接地故障零序网络  
Fig.2 Topology of the zero-sequence network when one with earth faults and the other overhauling

同走廊线路正常运行状态时零序网络可简化为如图 3 所示, 即回线两端通过变压器短路阻抗接地, 在回路电压方程中的体现是 N 回线的自阻抗变  $Z_{NN}$  修正为  $Z'_{NN}$  ( $Z'_{NN} = Z_{NN} + \Delta Z$ )。阻抗修正值  $\Delta Z = \frac{2Z_k}{l}$ ,  $Z_k$  为线路变压器短路阻抗,  $l$  为线路长度。

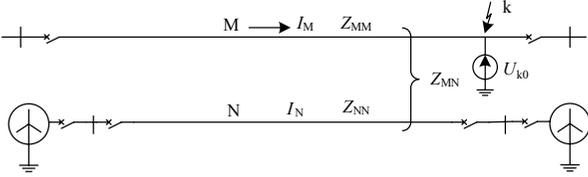


图 3 同走廊正常运行状态下接地故障零序网络

Fig.3 Topology of the zero-sequence network when one with single-phase-to-earth faults and the other normal

### 2.3 同走廊带避雷线双回线互感影响分析

当同走廊线路中其中一回线接地检修, 再考虑两根与大地形成闭合回路的避雷线影响时, 对故障线路等值零序阻抗影响最大。此时对应的零序网络如图 4 所示。

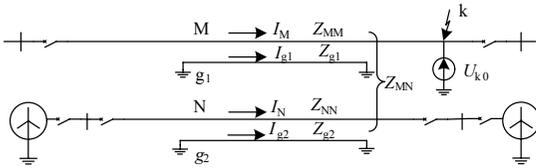


图 4 同走廊接地检修状态下单相接地故障零序网络

Fig.4 Topology of the zero-sequence network when one with single-phase-to-earth faults and the other overhauling

这种情况下对应的回路电压方程为:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_M \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{MM} & Z_{MN} & Z_{Mg1} & Z_{Mg2} \\ Z_{MN} & Z_{NN} & Z_{Ng1} & Z_{Ng2} \\ Z_{Mg1} & Z_{Ng1} & Z_{g1} & Z_{g1g2} \\ Z_{Mg2} & Z_{Ng2} & Z_{g1g2} & Z_{g2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_M \\ \dot{I}_N \\ \dot{I}_{g1} \\ \dot{I}_{g2} \end{pmatrix}$$

若令  $P_{Mg} = \begin{pmatrix} Z_{MN} & Z_{Mg1} & Z_{Mg2} \end{pmatrix}$ ;

$$P_{Ng} = \begin{pmatrix} Z_{NN} & Z_{Ng1} & Z_{Ng2} \\ Z_{Ng1} & Z_{g1} & Z_{g1g2} \\ Z_{Ng2} & Z_{g1g2} & Z_{g2} \end{pmatrix};$$

此时等值零序阻抗可表示为:

$$Z_{04} = Z_{MM} - P_{Mg} P_{Ng}^{-1} P_{Mg}^T \quad (6)$$

由文献[7]得知, 电压等级 220 kV 及以下的输

电线路, 线路避雷线直接通过支撑杆塔接地, 而 500 kV 以上线路避雷线与支撑杆塔间安装绝缘间隙, 工程上避雷线绝缘间隙是按保证单相接地故障时能可靠击穿来调整的, 因此在线路发生接地故障时绝缘间隙全部击穿<sup>[8-10]</sup>。经过研究, 考虑避雷线绝缘间隙影响时与本文 2.3 所分析的结果基本没有差异, 所以本文的结论有较普遍的应用。

### 3 实例分析

为进一步研究典型情况下各种因素对等值零序阻抗的影响, 以下举一实例进行计算并分析其结果, 计算模型如图 5 所示。每相导线采用 LGJ-150 钢芯铝线 ( $D_e = 7.65 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $r_a = 0.21 \Omega/\text{km}$ ), 大地电阻率  $\rho_e = 285 \Omega \cdot \text{m}$ , 避雷线采用 GJ-70 钢绞线 ( $D_{sg} = 5.52 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $r_g = 2.29 \Omega/\text{km}$ )<sup>[5]</sup>。

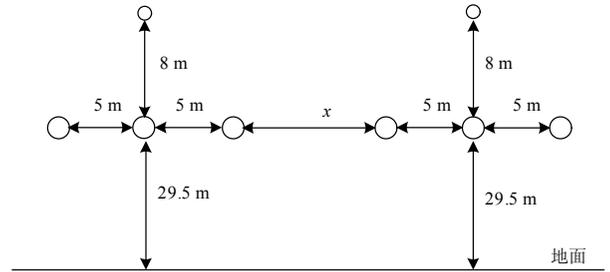


图 5 同走廊双回线实例图

Fig.5 Model of two adjacent parallel lines

根据公式 (1)、(2), 并结合计算模型架构参数, 可算出实例的部分零序参数: 回线自阻抗  $Z_{MM} = Z_{NN} = 0.36 + j1.376 \Omega/\text{km}$ ; 回线与对应避雷线互阻抗  $Z_{Mg1} = Z_{Ng2} = 0.15 + j0.904 \Omega/\text{km}$ ; 地

中电流等价深度  $D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho_e}{f}} = 1576 \text{ m}$ 。

#### 3.1 避雷线材料影响分析

根据第 2 节中几种情况下等值零序阻抗的计算公式可知, 避雷线自阻抗也对线路等值零序阻抗有一定的影响。

为排除其他因素的干扰, 选择在单回线单避雷线情况下具体研究避雷线电阻对等值零序阻抗的影响。

由公式 (4) 知,  $Z_{01} = Z_{MM} - \frac{Z_{Mg1}^2}{Z_{g1}}$ ,

$Z_{g1} = 3(r_g + r_e) + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{D_{sg}}\right)$ , 故可得到  $Z_{01}$

随  $r_g$  的变化趋势如图 6。

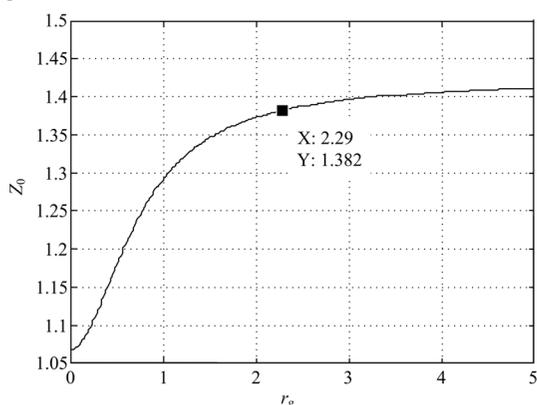


图 6 等值零序阻抗随避雷线直流电阻变化曲线

Fig.6 Curve of equivalent zero-sequence impedance change with resistivity

根据图 6 结果，随着避雷线电阻增大，等值零序阻抗也随之增大。在仿真过程中还发现，等值零序阻抗的电抗分量随避雷线电阻增大而增大；而电阻分量却是先随避雷线电阻增大而迅速增大，然后再缓慢减小趋近于  $0.4 \Omega/\text{km}$ 。在  $r_g = 1.0 \Omega \cdot \text{m}$  附近时达到最大值  $0.48 \Omega/\text{km}$ 。由此可以推知，采用良导体避雷线可以在一定程度上降低等值零序阻抗。在避雷线影响下，等值零序阻抗电阻分量有所增加，电抗分量减小。避雷线电阻取实例中所用  $r_g = 2.29 \Omega \cdot \text{m}$  时，等值零序阻抗  $Z_{01} = 0.45 + j1.307 \Omega/\text{km}$ 。

### 3.2 双回线互感影响分析

由公式 (5) 可知，回线互阻抗  $Z_{MN}$  的变化会改变等值零序阻抗。邻近回线接地检修时的等值零序阻抗与回线 M 自阻抗的比值随线路间距的变化曲线如图 7。

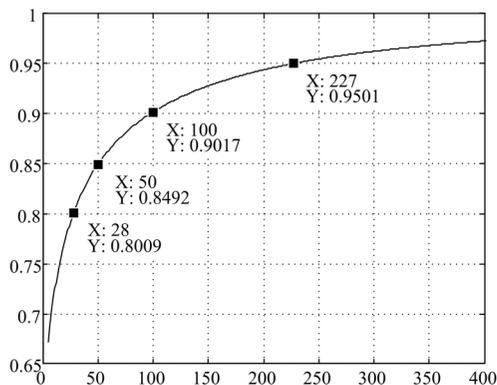


图 7 线路间距对等值零序阻抗影响曲线 (检修状态下)

Fig.7 Curve of equivalent zero-sequence impedance change with distance (on overhauling)

由图 7 可知，接地检修状态下的同走廊线路对邻近线路的等值零序阻抗影响很大，间距较小时幅值最大变化可达 30%。两回线间距达到 400 m 时的互感影响依旧超过对应避雷线对回线的影响，由此可见在邻近线路接地检修时，回线间的影响是主要因素。

根据 2.2 的分析，线路正常运行状态时的情况与检修时相比，回线两端加上变压器短路阻抗后再接地，实际计算中将短路阻抗平均分配到线路中。短路阻抗的影响将使回线零序自阻抗  $Z_{NN}$  发生改变，现把  $Z_{NN}$  的不同取值情况进行比较分析，如图 8 所示。

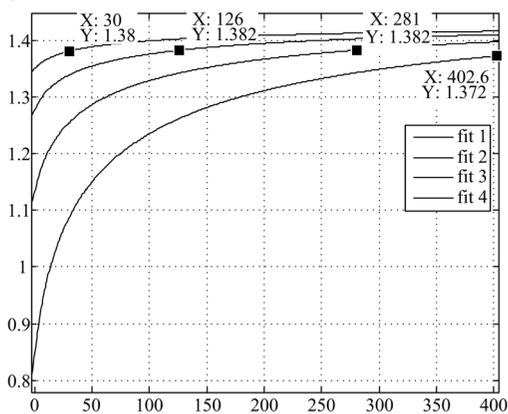


图 8 不同阻抗修正量条件下的等值零序阻抗变化曲线

Fig.8 Curve of equivalent zero-sequence impedance change with impedance added

图 8 中，从下到上四条曲线依次为  $Z_{NN} = Z_{MM}$ 、 $Z_{NN} = 2Z_{MM}$ 、 $Z_{NN} = 4Z_{MM}$ 、 $Z_{NN} = 8Z_{MM}$  情况下等值零序阻抗随线路间距的变化趋势。由曲线趋势可知，线路自阻抗  $Z_{NN}$  越大，其对邻近线路等值零序阻抗的影响就越小。当取  $Z_{NN} = 8Z_{MM}$  时，间距超过 30 m 的平行回线间的影响已小于避雷线的影响。由于阻抗修正量与线路长度成反比，所以长距离平行线路间的影响较为显著。

### 3.3 同走廊带避雷线双回线互感影响分析

当一回线处于接地检修状态，同走廊平行线路发生接地故障，则此时对等值零序阻抗的影响最大。在这种极端情况下，N 回线及两避雷线的零序电压均为零。由式 (6) 可得到此时等值零序阻抗的变化曲线如图 9。

图 9 中等值零序阻抗的变化曲线与 3.2 中得到的变化曲线极为接近，所以本文比较了一回线接地检修时不考虑避雷线、单避雷线及双避雷线三种情况下，等值零序阻抗随间距变化趋势，得到如图 10 所示的曲线。由图易知三条曲线非常接近，说明在

邻近线路接地检修情况下, 检修回线间的互感作用是影响等值零序阻抗的主要因素。

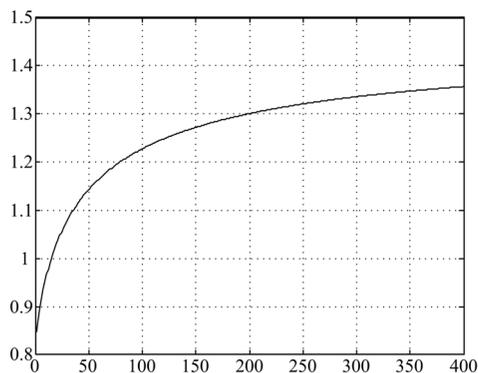


图9 双避雷线等值零序阻抗变化曲线

Fig.9 Curve of equivalent zero-sequence impedance change with two overhead earth wires

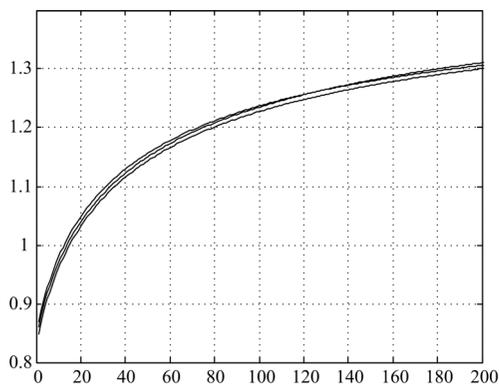


图10 三种互感影响比较 (检修状态下)

Fig.10 Comparison of three kinds of mutual inductance (on overhauling)

#### 4 结语

随着电力系统的不断发展, 同走廊线路日益增多, 线路间的互感作用对线路等值零序阻抗产生了较大的影响, 尤以邻近线路接地检修且最为严重, 等值零序阻抗变化最大可达30%。同时, 避雷线材料对线路等值零序阻抗也存在一定影响, 采用良导体避雷线时, 线路零序电阻增大, 零序电抗减小。在同走廊线路接地检修时, 回线间的互感作用是影响等值零序阻抗的主要因素; 而当同走廊线路正常运行, 尤其是线路零序自阻抗较大时, 避雷线的影响是主要因素。

#### 参考文献

[1] 李斌, 曹荣江, 顾霓鸿. 关于同杆双回线检修回路中接地开关开断工况的研究[J]. 电网技术, 1995, 19(1): 42-46.  
LI Bin, CAO Rong-jiang, GU Ni-hong. Study on making

and breaking behavior of the earthing switches on the common-tower double-circuit lines[J]. Power System Technology, 1995, 19 (1): 42-46.

[2] 郭润生, 何彩虹, 鄧建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32 (20): 71-73.

GUO Run-sheng, HE Cai-hong, ZHI Jian-jie. Influence of zero-sequence mutual inductance on pilot protection in parallel lines[J]. Relay, 2004, 32 (20): 71-73.

[3] JOHN HORAK. Zero sequence impedance of overhead transmission lines[C]. //IEEE 59<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers. 2006.

[4] 康小宁, 梁振锋, 索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33 (20): 1-4.

KANG Xiao-ning, LIANG Zhen-feng, SUONAN Jia-le. Influence of zero-sequence mutual inductance to transverse differential current protection and approaches to the improved measures[J]. Relay, 2005, 33 (20): 1-4.

[5] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

HE Yang-zan, WEN Zeng-yin. Power system analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

[6] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (20): 103-107.

ZENG Geng-hui, HUANG Ming-hui, LIU Zhi-yao, et al. Associated with the rod vertical line of zero-sequence analysis and measures to protect malfunction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (20): 103-107.

[7] 张太升, 鄢安河, 何南强, 等. 关于500 kV牡郑线的绝缘地线对零序参数影响的研究[J]. 继电器, 2001, 29 (3): 27-31.

ZHANG Tai-sheng, YAN An-he, HE Nan-qiang, et al. Study on the effect of insulation to earth on zero sequence parameters in 500 kV Mudan to Zhengzhou line, China[J]. Relay, 2001, 29 (3): 27-31.

[8] 文明浩, 陈德树, 吴伯华, 等. 绝缘地线间隙放电对距离保护影响的研究[J]. 继电器, 2000, 29(10): 25-27.

WEN Ming-hao, CHEN De-shu, WU Bo-hua, et al. Study on the influence of the gap disruptive flashover of insulated ground wire on distance relay[J]. Relay, 2000, 29 (10): 25-27.

[9] 东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

(下转第11页 continued on page 11)

- 现货市场联合均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (22) : 54-59.
- WANG Xian, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng. Joint equilibrium analysis for electricity forward and spot markets with transmission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (22) : 54-59.
- [8] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑远期合同及环路潮流约束的电力市场均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17) : 8-12, 23.
- WANG Rui-qing, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. On equilibrium in electricity markets considering forward contracts and loop flow constraints[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17) : 8-12, 23.
- [9] Anderson E J, Hu X. Forward contracts and market power in an electricity market[J]. International Journal of Industrial Organization, 2008, 26 (3) : 679-694.
- [10] 谭亲跃, 王少荣, 程时杰. 电力需求侧管理 (PDSM) 综述[J]. 继电器, 2005, 33 (17) : 79-84.
- TAN Qin-yue, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Survey on power demand side management[J]. Relay, 2005, 33 (17) : 79-84.
- [11] 王 晔, 李渝曾, 张少华. 考虑跨时段负荷响应的电力市场多时段均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (20) : 33-38.
- WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Multi-period equilibrium analysis of electricity markets with cross-time response of load demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (20) : 33-38.
- [12] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求侧响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3) : 97-106.
- ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3) : 97-106.
- [13] Baldick R, Grant R, Kahn E. Theory and application of linear supply function equilibrium in electricity markets[J]. Journal of Regulatory Economics, 2004, 25 (2) : 143-167.
- [14] Weigt H, Neumann A, von Hirschhausen C. Divestitures in the electricity sector: conceptual issues and lessons from international experiences[J]. The Electricity Journal, 2009, 22 (3) : 57-69.
- [15] Belpex. Electrabel virtual power plant capacity auctions: general context for the VPP auctions[EB/OL]. <http://www.belpexvpp.be>. 2006.
- [16] WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [17] 菲赫金哥尔茨. 数学分析原理[M]. 第一卷, 第一、二分册. 吴亲仁, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1959: 262-263.

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-05-20

作者简介:

王 晔 (1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力市场均衡分析研究; E-mail: xianwang@shu.edu.cn

康小宁 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力市场风险管理研究;

张少华 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场风险管理、博弈分析等研究。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- Northeast Electric Power Design Institute. Electrical engineering high voltage transmission line design handbook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [10] 程慕尧. 架空输电线路导线换位及绝缘地线运行方式的优化方案[J]. 中国电力, 2000, 33 (1): 57-58.
- CHENG Mu-yao. Optimization of conductor transposition and configuration of insulated ground wire on overhead transmission line[J]. Electric Power, 2000, 33 (1): 57-58.

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-05-25

作者简介:

徐习东 (1966-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xxd@zju.edu.cn

黄旭聪 (1987-), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: cshxc2006@126.com

王 全 (1987-), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护。