

不换位线路参数不对称对距离保护的影响分析

隆茂¹, 李田刚², 安然然², 王奕², 张哲¹, 鲁功强¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要: 不换位输电线路的参数不对称性, 将会影响到基于参数对称为前提的保护的正确动作。为了研究参数不对称对于距离保护的影响, 提出了不换位线路的序参数计算方法。在此基础上, 通过理论推导和数字仿真, 分析了阻抗继电器在各种故障情况下, 不换位线路的测量阻抗的误差大小。据此, 对不换位线路的距离保护整定计算提出改进建议。

关键词: 输电线路; 参数对称性; 距离保护; 测量阻抗; 误差分析

Analysis of line asymmetry parameters' impact on distance protection considering the untransposed transmission line

LONG Mao¹, LI Tian-gang², AN Ran-ran², WANG Yi², ZHANG Zhe¹, LU Gong-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corp, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The asymmetry of untransposed transmission lines parameters will affect the correct operation of protection which is based on parameters symmetry. To study the line asymmetry parameters' impact on distance protection, this paper puts forward the sequence parameter calculation method of untransposed lines. On this basis, it analyzes the error of untransposed lines measured impedance through theoretical derivation and numerical simulation, when the impedance relay is in various fault cases. In response to the measured impedance errors of untransposed lines, improvement suggestions of distance protection setting are put forward.

Key words: transmission line; parameter symmetry; distance protection; measured impedance; error analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0090-05

0 引言

在输电线路中, 对于短线路大多采用不换位方式, 以降低建设成本。对于同杆并架线路, 由于实现技术方面的限制, 通常也难以做到完全换位。当输电线路不换位或换位不完全时, 将导致输电线路参数不对称^[1-8], 给以参数对称为前提的输电线路保护的正确动作带来不利影响。迄今, 针对输电线路参数不对称对继电保护的影响开展了多方面的研究工作, 但主要是分析系统正常运行情况下, 线路参数不对称可能产生的负序和零序电流的大小, 以评估其对零序或负序电流保护带来的危害^[9-15]。然而基于对称分量法的距离保护, 由于参数的不对称, 也会造成测量阻抗出现误差, 进而影响距离保护的動作性能, 相关研究工作有待深入。

本文从不换位输电线路的序阻抗参数出发, 根据距离保护的测量阻抗原理, 对不同故障情况下线

路参数不对称对测量阻抗的影响进行了理论分析和仿真计算, 并从整定计算的角度, 提出了相关应对建议。

1 不换位线路的阻抗参数

当三相对称时, 采用对称分量法将导线参数解耦为正负零序阻抗进行序网络计算, 但对于参数不对称的线路, 序参数计算将会发生变化^[16-17]。因此, 以自阻抗系数、互阻抗系数为基础分析不换位线路的阻抗参数。由文献[18]可知, 线路的自阻抗系数和互阻抗系数为

$$z_s = r_s + r_e + j0.1445 \lg \frac{D_e}{D_s} \quad (1)$$

$$z_m = r_e + j0.1445 \lg \frac{D_e}{D} \quad (2)$$

式中: z_s 为自阻抗系数; r_s 为导线电阻; r_e 表示大地的等值电阻; D_e 是大地电阻率 $\rho_e (\Omega \cdot m)$ 和频率 f

(Hz)的函数, 即 $D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho_e}{f}}$; D_s 代表导线的自几何均距, 它与导线的材料和结构(如股数)有关; z_m 为互阻抗系数; D 就是线路的互几何均距, 与各导线之间的距离有关。

自阻抗和互阻抗系数共同构成线路相阻抗矩阵, 对应的阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_{ABC} = \begin{bmatrix} z_s & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_s & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $z_{AB} = z_{BA}$, $z_{AC} = z_{CA}$, $z_{BC} = z_{CB}$ 。对于不换位线路, 由于三相导线之间距离不相等, 故有 $z_{BC} \neq z_{AB} \neq z_{AC}$ 。线路首端电压与电流有如下关系

$$\mathbf{U}_{ABC} = \mathbf{Z}_{ABC} \mathbf{I}_{ABC} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{U}_{ABC} = [\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C]^T$; $\mathbf{I}_{ABC} = [i_A, i_B, i_C]^T$ 。

将相分量变成序分量, 有

$$\mathbf{Z}_{120} = \mathbf{S} \mathbf{Z}_{ABC} \mathbf{S}^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_{120} = \begin{bmatrix} z_1 & z_{12} & z_{10} \\ z_{21} & z_2 & z_{20} \\ z_{01} & z_{02} & z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, z_1 , z_2 , z_0 分别为线路的正序、负序、零序阻抗, 正负序阻抗相等。各序阻抗与阻抗系数的关系为

$$z_1 = z_2 = z_s - \frac{1}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{AC} \quad (7)$$

$$z_0 = z_s + \frac{2}{3} z_{AB} + \frac{2}{3} z_{BC} + \frac{2}{3} z_{AC} \quad (8)$$

在计算出参数不对称线路的正负零序参数后, 便可对故障时测量阻抗的误差大小进行分析。

2 测量阻抗误差分析

对于参数对称的线路来说, 测量阻抗的大小能够准确反映故障点的位置, 且与故障相别无关。但是不换位线路由于其参数不对称, 不仅会造成测量阻抗的误差, 且不同类型和不同相别的阻抗继电器, 其测量阻抗误差的大小也不相同。以下分别针对相间阻抗继电器和接地阻抗继电器, 从理论分析和仿真计算两方面, 对线路参数不对称对测量阻抗的影响进行比较分析。

2.1 理论误差分析

2.1.1 相间阻抗继电器的误差分析

以 BC 两相短路为例, 如图 1 所示, 若在线路末端发生两相短路。由测量阻抗的定义可得:

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} \quad (9)$$

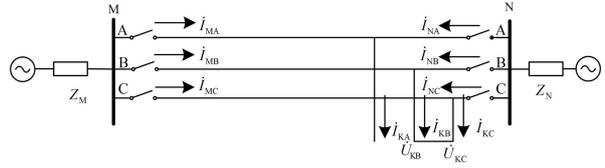


图 1 BC 两相故障示意图

Fig. 1 Diagram of BC-phase short circuit

由故障边界条件可知, $\dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC}$ 。根据式(4), 式(6)及式(7)可得, N 侧发生 BC 两相短路时, M 侧的测量阻抗为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_{MB} - \dot{U}_{MC}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}} = \frac{\dot{U}_{KB} + z_{AB} \times \dot{I}_{MA} + z_s \times \dot{I}_{MB} + z_{BC} \times \dot{I}_{MC}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}} - \frac{(\dot{U}_{KC} + z_{CA} \times \dot{I}_{MA} + z_{CB} \times \dot{I}_{MB} + z_s \times \dot{I}_{MC})}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}} = \quad (10)$$

$$z_s - z_{BC} + \frac{(z_{AB} - z_{CA}) \times \dot{I}_{MA}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}} =$$

$$z_1 - \frac{2}{3} z_{BC} + \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{1}{3} z_{AB} + \frac{(z_{AB} - z_{CA}) \times \dot{I}_{MA}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}}$$

观察 BC 两相短路时其测量阻抗的表达式可知

$$Z_m = z_1 + \Delta z \quad (11)$$

$$\Delta z = -\frac{2}{3} z_{BC} + \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{1}{3} z_{AB} + \frac{(z_{AB} - z_{CA}) \times \dot{I}_{MA}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}} = \quad (12)$$

$$\Delta z_1 + \Delta z_2$$

其中,

$$\Delta z_1 = -\frac{2}{3} z_{BC} + \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{1}{3} z_{AB} \quad \Delta z_2 = \frac{(z_{AB} - z_{CA}) \times \dot{I}_{MA}}{\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC}}$$

同理可得, AB 两相短路和 AC 两相短路的测量阻抗分别如下:

$$Z_{mAB} = z_1 - \frac{2}{3} z_{AB} + \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{1}{3} z_{BC} + \frac{(z_{AC} - z_{BC}) \times \dot{I}_{MC}}{\dot{I}_{MA} - \dot{I}_{MB}} \quad (13)$$

$$Z_{mAC} = z_1 - \frac{2}{3} z_{AC} + \frac{1}{3} z_{AB} + \frac{1}{3} z_{BC} + \frac{(z_{AB} - z_{BC}) \times \dot{I}_{MB}}{\dot{I}_{MA} - \dot{I}_{MC}} \quad (14)$$

在发生两相接地故障和三相短路故障时, 各相别测量阻抗的表达式与两相短路时相同, 故此不再赘述。

由式(10)、式(13)和式(14)可知, 在同一故障点发生同一类型不同相别的相间故障时, 其测量阻抗是不同的, 且都与真实阻抗值有一定误差。根据式(10)和式(11), 若 $\Delta z > 0$, 则测量阻抗偏大, $\Delta z < 0$,

则测量阻抗偏小。

而在测量阻抗误差 Δz 中, Δz_1 只受线路结构参数的影响, 与故障类型(短路电流大小)无关。 Δz_2 情况较复杂, 由短路电流大小和相间互阻抗参数的差值共同决定。对于不对称相间短路, 由于健全相电流远小于故障相间电流, 如式(12)中的电流 \dot{I}_{MA} 远小于电流 $(\dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MC})$, 故可忽略 Δz_2 的影响。对于三相对称短路, 相电流仍明显小于故障相间电流, 此时, 测量阻抗误差 Δz 仍主要取决于 Δz_1 的大小。

综上所述, 同一故障点发生不同类型(即: 两相短路, 三相短路和两相接地)的相间故障时, 相间阻抗继电器的测量误差变化不大, 也即相间阻抗继电器测量误差受故障类型的影响较小。

2.1.2 接地阻抗继电器的误差分析

以 A 相接地为例, 如图 2 所示, 在线路末端发生 A 相接地时, 其测量阻抗的表达式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + 3k\dot{I}_0} \quad (15)$$

由 $k = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$, 且 $3\dot{I}_0 = \dot{I}_{MA} + \dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC}$, 推导 A 相测量阻抗如式(16)所示。

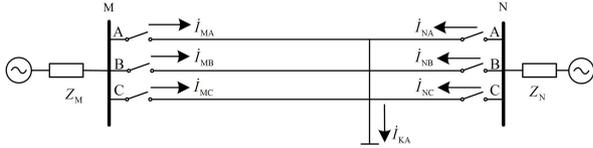


图 2 A 相接地示意图

Fig. 2 Diagram of phase A grounded fault

$$\begin{aligned} Z_{mA} &= \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_{MA}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} = \frac{z_s \times \dot{I}_{MA} + z_{AB} \times \dot{I}_{MB} + z_{AC} \times \dot{I}_{MC}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} = \\ &= \frac{z_s \times \dot{I}_{MA} - \frac{1}{3}z_{AB} \times \dot{I}_{MA} - \frac{1}{3}z_{AC} \times \dot{I}_{MA} - \frac{1}{3}z_{BC} \times \dot{I}_{MA}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} + \\ &= \frac{\frac{1}{3}z_{AB} \times \dot{I}_{MA} + \frac{1}{3}z_{AC} \times \dot{I}_{MA} + \frac{1}{3}z_{BC} \times \dot{I}_{MA} + z_{AB} \times \dot{I}_{MB} + z_{AC} \times \dot{I}_{MC}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} = \\ &= \frac{z_1 \times \dot{I}_{MA} + \frac{1}{3}z_{AB} \times 3\dot{I}_0 + \frac{1}{3}z_{AC} \times 3\dot{I}_0 + \frac{1}{3}z_{BC} \times 3\dot{I}_0}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} + \\ &= \frac{(\frac{2}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MB} + (\frac{2}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MC}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_0} = \\ &= z_1 + \\ &= \frac{(\frac{2}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MB} + (\frac{2}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MC}}{3z_s \dot{I}_{MA} + (z_{AB} + z_{AC} + z_{BC})(\dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC})} = \\ &= z_1 + \Delta z \end{aligned} \quad (16)$$

其中,

$$\Delta z = \frac{(\frac{2}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MB} + (\frac{2}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{BC}) \times \dot{I}_{MC}}{3z_s \dot{I}_{MA} + (z_{AB} + z_{AC} + z_{BC})(\dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC})}$$

由于 \dot{I}_{MB} 与 \dot{I}_{MC} 是健全相电流, 其大小远远小于故障相电流 \dot{I}_{MA} , 因此可以得知 Δz 的幅值较小。但是, 由于 Δz 与电流相位和互阻抗差值相关, 因此其正负无法确定。

同理可得, 在线路末端发生 B 相或 C 相接地故障时, 测量阻抗为

$$Z_{mB} = z_1 + \frac{(\frac{2}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{BC} - \frac{1}{3}z_{AC}) \times \dot{I}_{MA} + (\frac{2}{3}z_{BC} - \frac{1}{3}z_{AB} - \frac{1}{3}z_{AC}) \times \dot{I}_{MC}}{3z_s \dot{I}_{MB} + (z_{AB} + z_{AC} + z_{BC})(\dot{I}_{MA} + \dot{I}_{MC})} \quad (17)$$

$$Z_{mC} = z_1 + \frac{(\frac{2}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{BC} - \frac{1}{3}z_{AB}) \times \dot{I}_{MA} + (\frac{2}{3}z_{BC} - \frac{1}{3}z_{AC} - \frac{1}{3}z_{AB}) \times \dot{I}_{MB}}{3z_s \dot{I}_{MC} + (z_{AB} + z_{AC} + z_{BC})(\dot{I}_{MA} + \dot{I}_{MB})} \quad (18)$$

对于单相接地来说, 其测量阻抗偏大偏小情况取决于故障后的各相电流, 因此情况较复杂。但是由附加测量阻抗 Δz 的表达式可以推导出, 单相接地时测量阻抗的误差相对较小, 一般小于相间阻抗继电器的最大测量误差。

2.2 仿真分析

以某水平排列的实际单回线路参数为例, 在 PSCAD 仿真平台上搭建仿真模型, 导线排列如图 3 所示。分别针对 50 km、100 km 和 150 km 的不换位线路在不同类型故障情况下, 相间阻抗继电器和接地阻抗继电器的测量阻抗误差进行仿真分析, 具体计算结果见表 1, 其中, 阻抗测量误差为实际测量阻抗值与理论阻抗值的相对误差; 对于三相短路, 分别给出了 BC、AB 和 AC 相间阻抗继电器的测量误差, 以反映参数不对称对不同相别阻抗继电器的影响。此外, 由于测量阻抗角误差较小, 在表中未具体列出。

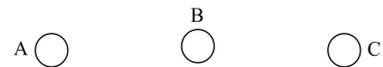


图 3 单回线相序排列示意图

Fig. 3 Diagram of single line phase sequence arrangement

根据表 1 结果并结合理论分析, 可以得出下述结论:

(1) 线路长度对于测量阻抗的误差影响不大, 不同长度的线路在发生相同故障时, 测量阻抗的相对误差大小基本一致。

表 1 不同故障类型下测量阻抗的相对误差
Table 1 Relative error of measured impedance in various fault types

故障类型	线路长度/km			%
	50	100	150	
KBC	-5.91	-5.88	-5.94	
KAB	-3.45	-3.35	-3.33	
KAC	10.88	10.76	10.79	
KABC(BC)	-5.04	-4.95	-4.98	
KABC(AB)	-4.96	-4.92	-4.93	
KABC(AC)	10.88	10.77	10.78	
KBCG	-5.58	-5.53	-5.55	
KABG	-3.82	-3.75	-3.75	
KACG	10.86	10.78	10.79	
KAG	3.34	3.42	3.33	
KBG	-2.78	-2.85	-3.07	
KCG	-0.26	-0.49	-0.77	

(2) 相间阻抗继电器的测量阻抗误差受故障类型的影响较小。如 BC 相间阻抗继电器在发生两相短路, 两相接地短路和三相短路时, 其测量阻抗的误差基本相同。

(3) 不同相别的相间阻抗继电器的测量阻抗误差存在较大差异。如 AC 相阻抗继电器的测量误差远大于 AB 相阻抗继电器。

(4) 相间阻抗继电器测量阻抗误差大小主要与相序排列有关, 相间距离最大的阻抗继电器, 其测量阻抗误差也最大, 且产生正向偏差, 而其它两种阻抗继电器将产生负向偏差。如仿真所用线路采取 ABC 水平排列方式, 由于 AC 的相间距离大于 AB、BC 的距离, 故 AC 测量阻抗最大, 且为正向偏差, AB、BC 测量阻抗误差相对减小, 且为负偏差。

(5) 接地阻抗继电器的测量阻抗误差小于相间阻抗继电器, 不同相别测量阻抗误差可能为正向偏差或负向偏差。

3 整定建议

由前述分析可以看出, 参数不对称性对距离保护的影响不容忽视, 因此, 需要采取相应的措施以保证距离保护动作的正确性。一种简单可行的应对策略是对距离保护的整定计算方法进行适当调整。

以相间距离保护例, 对于相间距离保护 I 段, 其基本要求是保证线路末端短路时保护可靠不误动。按照现有整定规程, 相间距离保护 I 段可靠系数取 0.8~0.85。根据表 1, 不换位线路测量阻抗的最大下偏误差约为 6%左右。因此, 建议对于不换位线路, 将可靠系数调整为 0.7~0.75。

对于相间距离保护 II 段, 其基本要求是对本线

末端短路时有足够的灵敏度。按照现有整定规程, 其灵敏系数应满足如下要求:

- a) 50 km 以下线路, 不小于 1.5;
- b) 50~200 km 线路, 不小于 1.4。

根据前述分析, 不换位线路测量阻抗的最大上偏误差达 11%左右。为了保证不换位线路距离 II 段的灵敏度, 建议对于不换位线路, 其灵敏度系数要求调整为

- a) 50 km 以下线路, 不小于 1.6;
- b) 50~150 km 线路, 不小于 1.5。

接地距离保护的可靠系数及灵敏度系数调整与相间距离保护类似, 不再复述。

4 结论

本文从不换位输电线路的序阻抗参数出发, 对不同故障情况下线路参数不对称对距离保护的影响进行了理论分析和仿真计算, 主要结论如下:

(1) 不换位线路由于其参数不对称性会造成距离保护测量阻抗产生误差, 但测量阻抗的相对误差大小基本不受线路长度的影响。

(2) 相间阻抗继电器的测量阻抗误差大小主要与故障相别相关, 而受故障类型的影响较小。相间距离最大的阻抗继电器, 其测量阻抗误差一般也最大。

(3) 与相间阻抗继电器相比, 接地阻抗继电器受参数不对称性的影响相对较小。

(4) 不换位线路由于测量阻抗误差较大, 若不采取应对措施, 可能会造成保护误动或拒动, 在工程应用中, 可以通过对整定计算中的可靠系数和灵敏度系数进行适当调整来防止保护不正确动作。

参考文献

- [1] 朱庆刚, 刘前进, 陈海涛, 等. 同塔双回不换位线路电压不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 73-79.
ZHU Qing-gang, LIU Qian-jin, CHEN Hai-tao, et al. Study on voltage imbalance of un-transposed double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 73-79.
- [2] 刘桂峰, 高戟, 郎需军, 等. 对高压架空送电线路一种优化换位方式的探讨[J]. 山东电力技术, 2001(5): 6-7.
LIU Gui-feng, GAO Ji, LANG Xu-jun, et al. Phase changing mode for HV power transmission line[J]. Shandong Electric Power Technology, 2001(5): 6-7.
- [3] 常文华. 特高压长距离输电线路换位问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
CHANG Wen-hua. Research on long-distance UHV

- transmission line transposition problem[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [4] ADIBI M M, MILANICZ D P, VOLKMANN T L. Asymmetry issues in power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1085-1091.
- [5] ZHONG S, ABUR A. Effects of non-transposed lines and unbalanced loads on state estimation[C] // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 2002, 2: 975-979.
- [6] 王晔. 1000 kV 特高压输电线路不平衡度分析及换位方式的研究[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(5): 38-42.
WANG Ye. Unbalanced analysis and transposition research for 1000 kV EHV transmission lines[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(5): 38-42.
- [7] 陶凯, 刘明波. 输电线路不换位引起的不对称问题及其改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 39-43.
TAO Kai, LIU Ming-bo. Asymmetric issues caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 39-43.
- [8] 李军, 彭谦, 卞鹏, 等. 特高压输电线路不平衡度分析及换位方式研究[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(9): 31-35.
LI Jun, PENG Qian, BIAN Peng, et al. UHV transmission line analysis and research transposition unbalanced way[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(9): 31-35.
- [9] 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 Xiao-tong, LIN Ji-ming, BAN Lian-geng, 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.
- [10] 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 Wen-hui, WU Shi-min. New method 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.
- [11] 刘前进, 朱庆刚, 罗龙波. 750 kV 同塔双回不换位线路电流不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 105-110.
LIU Qian-jin, ZHU Qing-gang, LUO Long-bo. Analysis on current imbalance of un-transposed 750 kV double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 105-110.
- [12] 戴雨剑. 基于 EMTP 的高压输电线路换位研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 1): 133-135.
DAI Yu-jian. Discussion on transposition of the overhead transmission line based on EMTP[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 133-135.
- [13] 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 Xue-bin, DING Mao-sheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-208.
- [14] 蒋陶宁, 徐亮, 卞鹏, 等. 导线相序及换位方式对地线损耗的影响[J]. 电力建设, 2011, 32(11): 16-19.
JIANG Tao-ning, XU Liang, BIAN Peng, et al. Effects of phase sequences and conductor transposition modes on the characteristics power loss of ground wire[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(11): 16-19.
- [15] 丁洪发, 段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 24-28.
DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong. Unbalance issue caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 24-28.
- [16] 刘博, 张庆超. 不换位输电线路参数变换矩阵的校正方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 62-65.
LIU Bo, ZHANG Qing-chao. Transformation matrix correction method of untransposed transmission line parameter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 62-65.
- [17] 姜彤, 郭志忠, 陈学允, 等. 多态分量法及其在电力系统三相不对称分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 70-74.
JIANG Tong, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun, et al. Polymorphic phase components method and its application in three-phase unbalance calculation of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 70-74.
- [18] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin. Power system analysis (volume one)[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.

收稿日期: 2014-06-31; 修回日期: 2014-08-19

作者简介:

隆 茂(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微机继电保护与控制。E-mail: longmao19900821@163.com