

DOI: 10.7667/PSPC170424

三相不对称输电线路单相自适应重合闸的研究

梁振锋, 崔若巍, 杨宁宁, 张晓阳

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对某些情况下故障性质判别灵敏度不足的问题, 提出了三相不对称输电线路单相自适应重合闸故障性质判别方法。建立了三相不对称输电线路等效电路, 推导了断开相恢复电压的计算公式, 分析了不同故障性质情况下影响恢复电压幅值大小的因素。研究表明恢复电压幅值受故障性质、潮流方向和大小、故障相别及故障位置的影响。据此提出了新的故障性质判别方法, 不同情况下采用相应的判别门槛值。EMTP 仿真结果验证了该方法的正确性和有效性, 能够提高重合闸成功率。

关键词: 三相不对称线路; 单相自适应重合闸; 瞬时性故障; 永久性故障; 恢复电压

Study on single-phase adaptive reclosure of the asymmetrical three-phase transmission lines

LIANG Zhenfeng, CUI Ruowei, YANG Ningning, ZHANG Xiaoyang

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to insufficient sensitivity of distinguishing permanent faults from transient faults in some cases, a distinguishing method of single-phase adaptive reclosure for the asymmetrical three-phase transmission lines is proposed. The equivalent circuit of the asymmetrical three-phase transmission lines is established, and the calculation formula of recovery voltage of fault phase is derived, and the factors of influencing recovery voltage amplitude are analyzed under permanent faults or transient faults. The results show that the recovery voltage amplitude is affected by transient faults or permanent faults, the direction and size of the power flow, the fault phase and the fault location. So the new method which uses corresponding threshold in different conditions is proposed. The EMTP simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed method and it can improve the success rate of reclosing.

This work is supported by Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province (No. 2014JM7293) and Natural Science Research Plan of Education Department of Shanxi Province (No. 15JK1513).

Key words: asymmetrical three-phase transmission lines; single-phase adaptive reclosure; transient fault; permanent fault; recovery voltage

0 引言

由于具有良好的社会经济效益, 自动重合闸在输电线路得到了广泛应用。但重合于永久性故障(即故障点绝缘未恢复)时, 短路电流会对系统和电气设备再次造成冲击, 保护将再次动作切除故障, 恶化了断路器的工作环境。因此, 20世纪80年代葛耀中教授提出了自适应重合闸的概念^[1-2], 即重合前预先对故障性质进行判断, 瞬时性故障时重合断路器, 永久性故障则闭锁重合闸。国内外学者针对自适应重合闸开展了大量研究工作^[3-9]。目前, 继

电保护的发展也为自适应重合闸的实现提供了基础^[10-14], 单相自适应重合闸已进入到实用化阶段。单相重合闸的故障性质判别方法多利用恢复电压特性实现。瞬时性故障、二次电弧熄灭, 断开相恢复电压幅值较高; 而永久性故障, 断开相恢复电压幅值较低。因此, 可根据恢复电压幅值大小判别故障性质。

一般情况下, 电力系统要求输电线路进行三相换位以平衡不对称电流。但由于我国经济发展的区域不平衡导致在经济发达地区的负荷分布越来越密集, 使得某些区域内变电站林立, 许多输电线路根本达不到规程所规定的换位长度。另外一些输电线路因为地理条件、施工等因素导致换位布置复杂, 造价高昂, 从而不换位。输电线路不换位将导致线

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM7293); 陕西省教育厅自然科学研究项目资助(15JK1513)

路三相参数不对称^[15-16]。当不同相故障、故障相断路器跳开，断开相恢复电压将存在差异，影响基于恢复电压的永久性故障判别元件的可靠性。

本文分析了三相不换位输电线路在不同相故障时恢复电压的影响因素，提出了基于潮流方向和大小、故障相别的故障性质判别方法。该方法首先判断潮流方向和大小，进而分相设定故障性质判别门限值。本文利用 ATP-EMTP 建立了 500 kV 三相不对称输电线路模型，进行了不同相单相接地故障仿真，结果表明本文方法正确、有效，能够提高重合闸成功率。

1 三相不换位输电线路恢复电压特性

1.1 三相不对称输电线路

三相不对称输电线路集中参数等效电路如图 1 所示。图中， Z_A 、 Z_B 、 Z_C 分别为各相自阻抗； M_{AB} 、 M_{AC} 、 M_{BC} 为相间互感； C_{AB} 、 C_{BC} 、 C_{AC} 是相间电容， C_{A0} 、 C_{B0} 、 C_{C0} 为相对地电容。由于线路三相不换位，线路的相间电感和电容不完全相等。

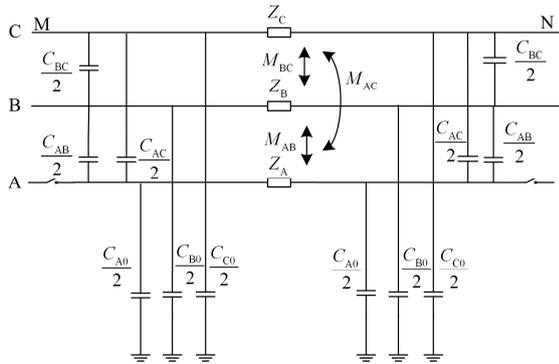


图 1 三相不对称输电线路集中参数等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of concentrated parameters of the asymmetrical three-phase transmission lines

1.2 瞬时性故障

以 A 相接地故障为例，瞬时性故障(即二次电弧已熄灭)，线路转入非全相运行状态。健全相与故障相之间的电磁耦合产生了恢复电压，其工频量是电容耦合电压和电感耦合电压的矢量和。

由图 1 可知，断开相 A 相电容耦合电压为^[1]

$$\dot{U}_{yA} = \dot{U}_B \frac{C_{AB}}{C_{A0} + C_{AB} + C_{AC}} + \dot{U}_C \frac{C_{AC}}{C_{A0} + C_{AB} + C_{AC}} \quad (1)$$

式中： \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 为健全相电压相量； \dot{U}_{yA} 为瞬时性故障时断开相电容耦合电压。

线路两端，电压存在相角差，则电容耦合电压也存在相角差。该相角差与负荷传输功率有关。

断开相 A 相电磁耦合电压为^[1]

$$\dot{U}_{xL} = \dot{I}_B M_{AB} + \dot{I}_C M_{AC} \quad (2)$$

式中： \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 为健全相电流相量； \dot{U}_{xL} 为瞬时性故障时断开相电磁耦合电压。

由式(2)可见，健全相中潮流方向和大小会影响电磁耦合电压的大小。

断开相 A 相的恢复电压 \dot{U}_{mA} 可表示为^[1]

$$\dot{U}_{mA} = \dot{U}_{yA} + \dot{U}_{xL}/2 \quad (3)$$

由式(1)一式(3)可见，恢复电压与线路电容、电感有关，而三相参数不对称时，线路电容、电感三相不完全相等，因此恢复电压幅值还和故障相别有关。

综上所述，三相不对称输电线路瞬时性故障状态，恢复电压幅值与故障相别、潮流方向和大小有关。

1.3 永久性故障

若故障为永久性故障，二次电弧未熄灭，线路对地电容可靠放电。恢复电压受线路电容影响不大，主要取决于电感耦合电压，如式(4)所示。

$$\dot{U}_{x\alpha} = (\dot{I}_B M_{AB} + \dot{I}_C M_{AC})\alpha \quad (4)$$

式中： α 为故障点至重合闸安装处的距离占线路全长的百分比； $\dot{U}_{x\alpha}$ 为永久性故障时恢复电压。

由式(4)可见，永久性故障状态，不同故障位置，恢复电压不同。

1.4 三相不对称线路故障性质判别问题

由 1.2、1.3 节分析可见，三相不对称输电线路不同相单相接地故障，恢复电压幅值与相别、潮流方向和大小、故障位置等因素有关。因此在某些潮流方向、大小及故障位置下，会出现故障性质判别灵敏度不足，甚至无法判别。第 3 节的仿真计算也验证了这一结论。

2 三相不对称线路故障性质判别流程

2.1 故障性质判别判据

现有的恢复电压永久性故障判据为^[1]

$$U_m \geq U_{set} \quad (5)$$

$$U_{set} = K_k U_{x\alpha} \quad (6)$$

式中： U_m 是断开相的恢复电压； U_{set} 是整定值。当 $U_m > U_{set}$ 时，判为瞬时性故障，开放重合闸； $U_{x\alpha}$ 为永久性故障状态下的最大恢复电压。

对于三相不换位线路，由于不同相故障时断开相恢复电压幅值不同， U_{set} 不易整定。整定值过大，可能造成误闭锁；过小可能导致重合失败。

由于恢复电压与相别有关，因此本文针对不同断开相设定不同动作门限值。

$$U_{\varphi set} = K_k U_{\varphi x\alpha} \quad (7)$$

式中： $U_{\varphi x\alpha}$ 为永久性故障时恢复电压幅值； K_k 为

可靠系数, 一般取 1.1~1.2^[1]; φ 为 A、B、C。

2.2 三相不对称输电线路自适应重合闸方案

针对三相不对称线路, 本文提出的单相自适应重合闸流程如图 2 所示。其中, 三相永久性故障判断不再采用统一的整定值, 而是根据潮流方向和大小、故障相别采用相应的门槛值。

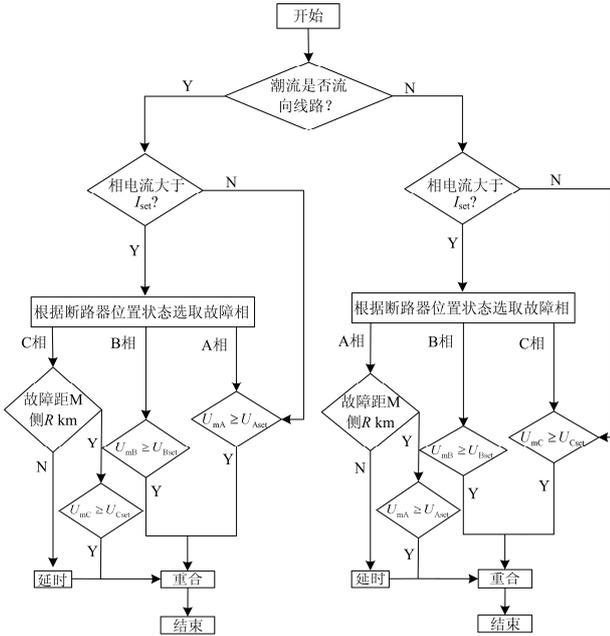


图 2 故障性质判别流程

Fig. 2 Flow chart of distinguishing permanent faults from transient faults

图 2 中, 首先利用方向元件判别潮流方向, 再判别相电流是否大于门槛值 I_{set} 。当相电流小于门槛值, 按躲过不同相别永久性故障状态时的最大恢复电压整定。大量仿真表明, 当潮流由母线流向线路时, C 相故障点距本侧保护安装处较远处(如 R km 以外)时, 利用恢复电压无法区分永久性故障状态和瞬时性故障状态。在 3 节仿真模型中, R 为 75。而潮流由线路流向母线时, A 相故障点距本侧较远时, 利用恢复电压无法区分永久性故障状态和瞬时性故障状态。图中的延时模块按传统重合闸时间 (0.6~1.5 s) 整定; 重合模块按 100 ms 延时来整定, 以躲过故障点去游离、绝缘恢复时间^[17]。

3 仿真实证

以某 500 kV 不换位输电线路为例进行仿真实证, 采用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真程序进行了故障仿真, 不换位线路全长 150 km, M 侧系统阻抗 $X_{1m} = 92.7245 \Omega$; $X_{0m} = 47.4902 \Omega$, N 侧系统阻抗 $X_{1n} = 148.093 \Omega$; $X_{0n} = 45.946 \Omega$, 不换位线路

的导纳矩阵为

$$Y = j \begin{bmatrix} 3.637 & -0.6249 & -0.1693 \\ -0.6249 & 3.836 & -0.6249 \\ -0.1693 & -0.6249 & 3.637 \end{bmatrix} \mu S/km$$

阻抗矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} 0.06706+j0.5682 & 0.04831+j0.3066 & 0.04829+j0.2631 \\ 0.04831+j0.3066 & 0.06706+j0.5682 & 0.04831+j0.3066 \\ 0.04829+j0.2631 & 0.04831+j0.3066 & 0.06706+j0.5682 \end{bmatrix} \Omega/km$$

仿真中 0.04 s 时发生单相接地故障, 故障持续 60 ms, 0.1 s 时断路器跳开。瞬时性故障, 二次电弧随即熄灭; 永久性故障, 二次电弧始终存在。根据 0.14~0.16 s 的采样数据, 利用傅里叶算法计算恢复电压幅值。

根据图 2, 判别故障性质时, 首先判断潮流方向。表 1 为不同潮流方向时单相接地故障、电弧熄灭后 M 侧的恢复电压。

表 1 瞬时性故障不同潮流方向下线路 M 侧恢复电压仿真结果

Table 1 Simulation results of recovery voltage of line M side in different power flow directions under transient fault

故障相	潮流方向	
	母线流向线路	线路流向母线
A	83.125	34.464
B	70.271	63.253
C	41.232	79.335

由表 1 可见, 对于 M 侧, 母线流向线路时 A 相接地故障恢复电压大于 C 相接地故障时的恢复电压; 而线路流向母线时, 结果相反。因此, 对于不换位输电线路故障性质的判别需要考虑潮流方向的影响。

潮流大小对恢复电压幅值大小的影响如表 2 所示。仿真过程中, 通过改变线路两侧系统相位差改变潮流大小, 故障位置为距 M 侧母线 90 km 处。

表 2 不同潮流大小情况下的恢复电压仿真结果

Table 2 Simulation results of recovery voltage under different power flow sizes

故障相	kV					
	M 侧超前 N 侧 0°		M 侧超前 N 侧 30°		M 侧超前 N 侧 60°	
	瞬时性	永久性	瞬时性	永久性	瞬时性	永久性
A	63.205	3.313 3	75.571	21.507	83.125	40.315
B	66.603	2.930 1	69.074	24.858	70.271	45.182
C	64.121	2.098 9	53.405	22.301	41.232	41.503

由表 2 可见,对于不换位线路,不同相单相接地故障、瞬时性故障时恢复电压幅值不同,且随着潮流的增大,不同相恢复电压差异越明显。当线路两侧相位角为 60° 时, A 相故障时恢复电压约为 C 相故障时恢复电压幅值的 2 倍。永久性故障时,由于主要取决于电感耦合电压,所以与故障相别关系不大。

由表 2 可见,当潮流较小时,虽然不同相别故障时恢复电压幅值不等,但永久性故障和瞬时性故障恢复电压差异明显,利用恢复电压幅值大小可判别故障性质。但当潮流较大时,个别相(如本例中 C 相)在一定区域单相接地故障时瞬时性故障和永久性故障恢复电压幅值接近,无法判别故障性质。

大量仿真结果表明,本例中两侧系统相角差大于 35° 时无法判别故障性质,即相电流大于 890.79 A ,因此图 2 中的 $I_{\text{set}} = 890.79\text{ A}$ 。

故障位置不同也会对恢复电压幅值造成影响, M 侧超前 N 侧 30° 和 60° 时仿真结果分别如表 3、表 4 所示。

表 3 M 侧超前 N 侧 30° 时不同故障位置恢复电压仿真结果

Table 3 Simulation results of recovery voltage in different fault positions when the M side is 30 degrees ahead of the N side

故障位置/%	故障性质	kV		
		A	B	C
0	瞬时性	75.371	70.029	53.259
	永久性	2.378 9	2.548	1.880 6
20	瞬时性	75.966	69.289	53.384
	永久性	8.095 7	9.482 3	8.249 0
40	瞬时性	75.971	69.149	53.420
	永久性	14.551	16.498	15.259
60	瞬时性	75.571	69.074	53.405
	永久性	21.507	24.858	22.301
80	瞬时性	76.428	69.070	53.783
	永久性	27.944	31.865	30.086
100	瞬时性	75.994	69.631	53.309
	永久性	34.261	39.557	36.652

由表 3 可见,瞬时性故障时,不同故障位置对于恢复电压影响不大,但永久性故障时,故障位置对恢复电压的影响较大,随着故障位置的增加,两种不同性质的故障恢复电压差距在缩小,尤其是随着系统潮流的增大,故障位置对恢复电压影响更大。

由表 4 可见,当线路潮流较大时,当故障位置

距 M 侧长度小于 75 km 时,恢复电压判据仍然适用,但当故障位置距 M 侧长度大于 75 km 后,永久性故障恢复电压甚至大于瞬时性故障状态时,无法判别故障性质。

表 4 M 侧超前 N 侧 60° 时不同故障位置恢复电压仿真结果

Table 4 Simulation results of recovery voltage in different fault positions when the M side is 60 degrees ahead of the N side

故障位置/%	故障性质	kV		
		A	B	C
0	瞬时性	83.347	71.213	42.664
	永久性	2.750 9	2.893	2.0739
20	瞬时性	82.869	70.449	43.677
	永久性	14.218	16.004	14.561
40	瞬时性	82.907	70.130	42.853
	永久性	26.983	30.058	28.012
60	瞬时性	83.125	70.271	41.232
	永久性	40.315	45.182	41.503
80	瞬时性	82.776	71.125	42.638
	永久性	52.925	60.062	55.290
100	瞬时性	83.237	71.450	44.996
	永久性	65.684	71.223	68.701

过渡电阻的存在也会影响恢复电压幅值。不同过渡电阻的仿真结果如表 5 所示。由仿真结果可见,过渡电阻的存在会使瞬时性时恢复电压与永久性故障时差异更加明显,即有利于故障性质的判别。

表 5 不同过渡电阻故障电压仿真结果

Table 5 Simulation results of fault voltage under different transition resistances

过渡电阻/ Ω	故障性质	kV		
		A	B	C
0.01	瞬时性	74.25	69.09	54.06
	永久性	10.45	13.7	11
100	瞬时性	75.49	69.22	53.4
	永久性	14.19	16.37	14.43
300	瞬时性	75.784	69.175	53.415
	永久性	21.318	23.889	19.720

4 结论

针对不换位输电线路三相参数不对称导致的不同相别单相接地故障后断开相恢复电压不同,基于恢复电压的永久性故障判别方法灵敏度不足的

问题, 本文分析了不换位线路恢复电压幅值的影响因素, 提出了基于潮流方向和大小、故障相别的单相自适应重合闸故障性质判别方法, 并通过 ATP-EMTP 进行了仿真验证, 结果表明:

1) 潮流方向不同, 瞬时性故障时断开相恢复电压差异明显。对于不换位输电线路故障性质的判别需要考虑潮流方向的影响。

2) 潮流大小对恢复电压幅值大小影响明显, 随着潮流的增大, 瞬时性故障和永久性故障的恢复电压均增大, 但永久性故障增幅更大。当潮流大于一定数值, 个别相在一定区域内故障甚至无法判别故障性质。

3) 潮流由母线流向线路时, 故障位置与保护安装处距离的增加, 不同故障性质的恢复电压差距在缩小。

4) 过渡电阻的存在有利于故障性质的判别。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] GE Yaozhong, SUI Fengha, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [3] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 140-147.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [4] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 61-67.
LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 61-67.
- [5] 周超, 黄纯, 江亚群, 等. 基于改进 ITD 边际谱熵的单相自适应重合闸[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 24-30.
ZHOU Chao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Single-phase adaptive reclosure based on marginal spectrum entropy using improved ITD[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(10): 24-30.
- [6] 罗勋华, 黄纯, 潘志敏, 等. 基于序分量无功功率的单相自适应重合闸[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 149-156.
LUO Xunhua, HUANG Chun, PAN Zhimin, et al. Single-phase adaptive reclosure based on reactive power of sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 149-156.
- [7] 赵庆明, 李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 50-54, 60.
ZHAO Qingming, LI Bin. A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 50-54, 60.
- [8] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.
SUONAN Jiale, SUN Dandan, FU Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.
- [9] 石光, 邵文权, 郭耀珠, 等. 带并联电抗器输电线路单相故障性质识别判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 53-58.
SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 53-58.
- [10] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [11] 陈妍君. 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网继电保护相配合的仿真分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 53-59.
CHEN Yanjun. Simulation of coordination of resistive-type superconducting fault current limiter and relay protection in 10 kV distribution network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 53-59.
- [12] 杨新伟, 郭彩霞. 基于主频零序功率的配电网故障选线新方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016,

- 44(5): 33-37.
- YANG Xinwei, GUO Caixia. A new method of fault line selection for distribution on network based on zero sequence power of the main frequency[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition). 2016,44(5): 33-37.
- [13] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16):1-7.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.
- [14] 汪溢, 黄曙, 马凯. 继电保护在线校核技术研究[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 87-93.
- WANG Yi, HUANG Shu, MA Kai. Relay protection online verifying technology[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 87-93.
- [15] 李新, 许中, 席世友, 等. 不对称耦合电感对三相电路暂态过程影响分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 666-671.
- LI Xin, XU Zhong, XI Shiyu, et al. Analysis about influence of asymmetric coupled-inductors on transient process of three-phase circuit[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 666-671.
- [16] 李晓华, 谢金泉, 罗龙波, 等. 地区电网采用不换位架设方式的高压输电线路潜供电流分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1501-1508.
- LI Xiaohua, XIE Jinquan, LUO Longbo, et al. Analysis of secondary arc current on un-transposed high voltage transmission lines in regional power grid[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1501 -1508.
- [17] 索南加乐, 梁振锋, 宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 37-41.
- SUONAN Jiale, LIANG Zhenfeng, SONG Guobing. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc extinction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 37-41.

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-08-25

作者简介:

梁振锋(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; Email: lzf@xaut.edu.cn

崔若巍(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

杨宁宁(1979—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制、非线性系统建模与控制。

(编辑 姜新丽)