

文章编号:1000-582X(2009)12-1425-06

消弧线圈接地系统暂态能量选线新方法

周念成, 刘家伟, 赵 渊, 彭 静, 王 斌, 谭桂华

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:针对现有利用暂态量的选线方法在电压过零附近时故障灵敏度低的问题,通过把消弧线圈支路作为一条健全线路,利用其暂态能量与其他所有线路暂态能量之和为零的关系,提出了一种基于消弧线圈暂态能量的谐振接地电网故障选线新方法。此选线方法无需判断故障合闸角,也无需整定,不仅能克服在电压过零附近故障选线灵敏度低的缺点,还能适应消弧线圈接地系统各种变化,具有很强的抗干扰能力及自适应性。大量的数字仿真结果表明,该方法有效、可靠。

关键词:消弧线圈接地系统;单相接地故障;消弧线圈;暂态能量

中图分类号:TM773

文献标志码:A

Novel method for fault line selection in arc suppression coils system using transient energy

ZHOU Nian-cheng, LIU Jia-wei, ZHAO Yuan, PENG Jing, WANG Bin, TAN Gui-hua

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: In order to overcome low sensitivity of the protection based on transient components when the faulty voltage passes zero, regarding arc suppression coil branch as a healthy feeder line, using the relation of its transient energy and all feeders of transient energy amounting to zero, this paper presents an improved fault line selection method in arc suppression coils system using transient energy. This method has no requirements of detection fault close angle and pre-setting, has a good anti-interference ability and adaptability to various faults occurred in the systems with arc suppression coils. Large amount of digital simulation results show that the proposed method is effective and reliable.

Key words: resonance grounding system; single phase-to-earth fault; arc suppression coil; transient energy

我国配电网广泛采用小电流接地方式,即中性点不接地,经高阻接地或经消弧线圈接地^[1]。当小电流接地系统中发生单相接地故障时,由于故障电流较微弱,电弧不稳定,从而使基于稳态量的各种故障选线方案在实际应用时效果不理想^[2-4]。近年来,一些学者依据故障暂态量比稳态量大若干倍的特点,相继提出基于暂态电压电流比较的选线方法,不

仅具有灵敏度较高的优点而且不受消弧线圈的影响^[5-7]。但是暂态信号极性关系成立的时间非常短(远小于暂态过程),检测可靠性不高,加上现有信号采集和处理技术较难满足要求,基于暂态信号的方法一直没有得到很好的应用。另一方面,利用暂态信号选线方法大多集中在小波变换等新兴分析工具的应用上^[8-10],而对于暂态信号特性和利用方式缺

收稿日期:2009-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607021)

作者简介:周念成(1969-),男,重庆大学副教授,博士,硕士生导师,从事电力系统继电保护、配电自动化和可靠性方面的研究工作,(E-mail)nczhou@163.com。

乏深入研究。

虽然实际中大多数单相接地故障为绝缘击穿故障,故障时刻的相电压不在零附近,可以产生明显的暂态信号,但也有发生在电压过零附近故障的可能,此时高频暂态电容电流分量很小,考虑到各种干扰,基于暂态电容电流选线方法可能失效,而此时却产生了较大的暂态电感电流分量。暂态电感电流分量为一衰减直流分量,利用此衰减直流分量的选线研究已经取得了一些研究成果^[11-12]。在故障合闸角较大情况下暂态电感电流分量比重较小且不易从暂态电容电流中分解出来,使得针对衰减直流分量的选线方法在此时失效,必须辅以其他暂态选线方法^[12]。

谐振接地系统发生单相接地故障时,故障电流中的暂态电感电流分量由故障线路和消弧线圈对地形成回路而不流过非故障线路,故障后流过消弧线圈的暂态电流只有衰减直流分量而不含有暂态电容电流分量,目前对于谐振接地系统中故障选线的研究都没有利用到消弧线圈的此特性。本文在详细分析了谐振接地电网发生单相接地故障时的暂态电流特性的基础上,提出了一种利用消弧线圈和所有线路(包括故障线路)暂态能量关系来构成判据的改进暂态能量选线新方法。该方法不仅在任意故障相角发生单相接地故障都具有很高的灵敏度,而且还能克服过渡电阻的影响,无需判断故障合闸角,有很好的抗干扰能力和自适应性。

1 故障电流暂态特性分析

谐振接地系统发生单相接地故障时,在故障点有衰减较快的暂态电容电流和衰减较慢的暂态电感电流流过,两者在频率和幅值上都不相同,其特性随两者的具体情况而定。电网中暂态接地电流分布见图 1。

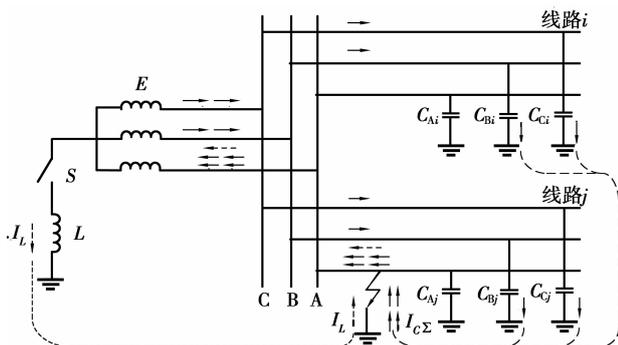


图 1 配电网单相接地时电流故障分量的分布

暂态接地电流的表达式为^[1]:

$$i_d = I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} \sin(\omega_f t + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_C}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (1)$$

式中: I_{Cm} 为电容电流的幅值; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; τ_C 为电容回路的时间常数; I_{Lm} 为电感电流衰减直流分量的幅值; τ_L 为电感回路的时间常数。

由式(1)可以得到,故障线路的零序暂态电流是由全部非故障线路非故障相的容性暂态电流和消弧线圈的暂态电感电流所组成。其中 $I_{Lm} \cos \varphi$ 为故障后暂态电感电流的最大幅值,与接地瞬间电源电压的相角 φ (故障合闸角)有关;而 τ_L 为暂态电感电流的衰减系数,在电弧接地故障中,此系数受到过渡电阻的影响,接地过渡电阻越大,此衰减直流分量的衰减速度越快。当接地故障发生在相电压最大值附近时,暂态电感电流接近为零,暂态电容电流最大,由非故障线路对地电容与故障线路故障接地点形成回路(如图 1 右虚线所示)。当接地故障发生在相电压经过零值的附近时,暂态电感电流达到最大值,由故障线路和消弧线圈对地形成回路而不流过非故障线路(如图 1 左虚线所示),其中的感性衰减直流分量较明显,此时暂态零序电流的特性主要取决于暂态电感电流,不论是故障线路还是非故障线路,其零序电流中高频暂态电容电流分量都较小^[2]。考虑到各种干扰的情况下,目前利用高频暂态电容电流分量选线的方法可能失效。

由以上电感电流特性分析可以得知故障后流过消弧线圈上的电流为母线流向电源侧的零序电流,其暂态分量只有衰减直流分量,此特征量在消弧线圈支路上可以直接获取(增加一个零序电流互感器),无需从其他暂态信号中分离出来,如果能利用到消弧线圈的此特性,将有利于暂态信号选线的研究。

2 利用消弧线圈暂态能量的选线方法

2.1 选线原理分析

谐振接地系统在单相接地故障暂态过程中,电感电流是由工频交流分量和衰减直流分量组成,它与暂态电容电流的频带存在差异;在稳态时,它从原理上起到抵消电容电流分量的作用,即补偿作用,使得接地点残流变小,达到了消弧的目的。根据叠加原理,由发生故障后故障点假定电压源和传输网络

组成的故障系统的集中参数简化故障零序等值电路如图 2 所示。

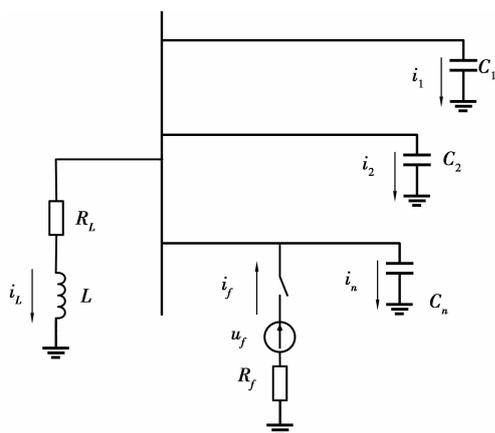


图 2 谐振接地电网故障零序等值电路

当线路或是母线发生单相接地故障时,中性点电压 U_0 为此时母线上的零序电压,大小为系统正常运行时的相电压 E 。此时由于中性点电压的变化消弧线圈上产生了感性电流,而无论故障线路还是健全线路都出现零序电流,如果把母线看成一个电流汇集节点(如图 2),根据基尔霍夫电流定律,由母线流向消弧线圈的零序电流 i_L 与母线出口所有线路(包括故障线路)零序电流瞬时值 $3i_{0j}$ 在任意时刻的代数和都为零,即

$$i_L + \sum_{j=1}^n 3i_{0j} = 0. \quad (2)$$

式中: i_L 为消弧线圈上电流瞬时值; $3i_{0j}$ 为第 j 条出线的零序电流瞬时值,即三相电流瞬时值之和;

n 为出线总数。

对上式乘以对应时刻的母线零序电压瞬时值 u_0 ,即得到瞬时功率,有:

$$u_0 i_L + u_0 \sum_{j=1}^n 3i_{0j} = 0. \quad (3)$$

式(3)的物理意义为消弧线圈支路以及各条线路(包括故障线路)的零序电流与母线零序电压构成的瞬时功率在故障后的任何时刻都为零。

考虑到电网中电容和电感只存储能量而不消耗能量,零序电流与电压乘积在一定时间内的积分值就是零序电流中阻性分量所消耗的能量^[13]。定义线路 j 的零序暂态能量 W_j 以及消弧线圈支路上的暂态能量 W_L :

$$W_j = \int_0^T u_0 3i_{0j} dt, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

$$W_L = \int_0^T u_0 i_L dt. \quad (5)$$

式中: T 为电网工频周期; u_0 为中性点电压瞬时值。

一般系统正常运行时不平衡度电流较小,在不考虑负荷不对称的情况下,无论故障线路还是非故障线路其零序电流与零序电压的稳态工频分量相角相差 90° ,两者在整数倍工频周期内的乘积积分必然为 0,所以由式(4)计算出的 W_j 是第 j 条线路上过滤掉稳态分量的暂态零序能量。

为了结合以上暂态能量的定义来构造出选线判据,对式(3)在一个周期内的积分,得:

$$\int_0^T u_0 i_L dt + \sum_{j=1}^n \int_0^T u_0 3i_{0j} dt = 0. \quad (6)$$

由式(4)、式(5)及式(6)得:

$$W_L + W_f + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq f}}^n W_j = 0. \quad (7)$$

上式从物理意义上讲,即消弧线圈支路以及各条线路(包括故障线路)的暂态电流在一个工频周期所产生的暂态能量代数和为零。在故障后的零序网络中,就可以把消弧线圈支路看成一条线路(如图 2),它与其他健全线路一样消耗了由故障点电源电流所产生的总的暂态能量 W_f 。消弧线圈支路上的暂态能量 W_L 由故障电流中的衰减直流分量产生,其值与暂态电流中的电感电流分量大小成比例。

2.2 选线判据

根据零序电流的参考方向和零序阻性电流的特点,可得暂态电容电流在故障线路产生的能量为负,在非故障线路产生的暂态能量为正。但是因消弧线圈的补偿作用,故障线路的零序电流方向和非故障线路的方向可能相同(倒相过程),因此仅比较各条线路零序电流产生的暂态能量方向很难做到可靠的选线。

根据式(7)可得故障线路暂态能量绝对值等于所有非故障线路及消弧线圈支路能量绝对值之和。因此,故障线路的暂态能量与所有健全线路(包括消弧线圈)暂态能量之差,必然是最小,且接近于零。因此,本文提出利用消弧线圈暂态能量的选线判据如下:

$$\Delta W_i = ||W_i| - |W_L| - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |W_j||, \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

通过式(8)计算出各条线路的 ΔW_i ,选出 ΔW_i 最小的线路 L_f ,判断线路 L_f 暂态能量 W_f 是否为负值,若 $W_f < 0$ 则线路 L_f 发生故障,否则判断为母线故障。

在相电压最大值附近发生故障时,系统的暂态零序电流主要是由暂态电容电流组成,因而消弧线圈支路所消耗的暂态能量 $|W_L|$ 就较所有非故障线路产生暂态能量小很多。如果忽略 $|W_L|$,式(8)就表现为类似于传统的利用高频电容电流分量的暂态能量选线方法^[14]。

当故障未发生在相电压最大值附近时,故障线路以及消弧线圈中就含有明显的衰减直流分量,此时消弧线圈支路所消耗的暂态能量 $|W_L|$ 就起到了不可忽视的作用。特别在相电压过零附近时发生单相接地故障,暂态零序电流中衰减直流分量的比重达到最大,此时笔者所提出暂态能量选线判据式(8)就自适应的变化为利用暂态衰减直流分量选线。它不仅弥补了传统基于暂态能量选线方法在电压过零点附近故障选线灵敏度不足的缺点,而且此方法无需判断故障合闸角,且在任意合闸角发生故障都有较好的选择性,从此看出本选线方法具有非常强的自适应性。

2.3 选线算法流程

基于以上故障选线原理的分析,当配电网发生单相接地故障时,利用改进暂态能量选线方法判别某条馈线是否为故障线路的具体流程简单并易于实现,如图 3 所示。

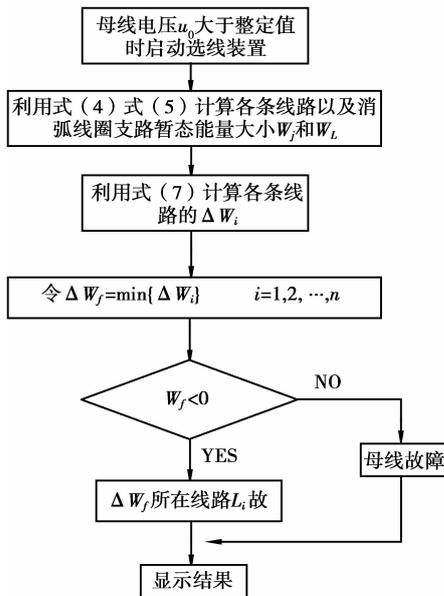


图 3 故障选线流程

3 仿真实验

仿真系统采用文献[15]提供的配电网模型,如图 4 所示,本文利用 MATLAB 中的 Simulink 来模

拟谐振接地系统单相接地故障,仿真中采样频率为 10 kHz,具体电气参数如下:

(1) 线路参数:正序阻抗 $Z_1 = 0.17 + j0.38 \Omega/\text{km}$,正序对地导纳 $b_1 = j3.045 \mu\text{s}/\text{km}$,零序阻抗 $Z_0 = 0.23 + j1.72 \Omega/\text{km}$,零序对地导纳 $b_0 = j1.884 \mu\text{s}/\text{km}$,各线路的长度 L_1 为 4 km, L_2 为 4 km, L_3 为 5 km, L_4 为 3 km, L_5 为 10 km。

(2) 负荷参数:为简便起见,各条线路等效负荷统一采用 $Z_L = 400 + j20 \Omega$ 。

(3) 消弧线圈参数:谐振接地系统设为 8% 过补偿,根据线路参数及长度可计算出消弧线圈电感为 $L = 5.62 \text{ H}$;其串联电阻的阻值按消弧线圈感抗值的 10% 考虑,即 $R_L = 176 \Omega$ 。

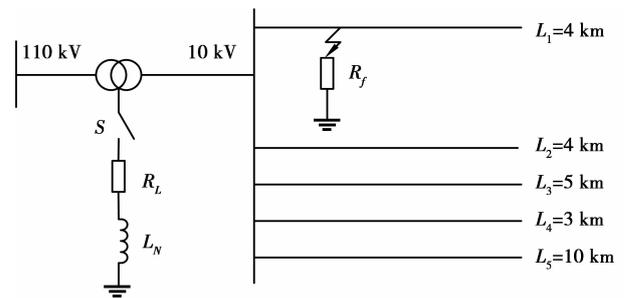


图 4 MATLAB 仿真用配网系统

在线路 L_1 不同故障位置、不同故障合闸角,过渡电阻为 20Ω 、的情况下,A 相接地故障的选线结果如表 1 所示。

表 1 线路 L_1 故障选线结果

$x_f / \varphi /$ km (°)	$W_L /$ J	$W_1 /$ J	$\Delta W_i / \text{J}$			选线 结果	
			$\Delta W_1 / \text{J}$	$\Delta W_3 / \text{J}$	$\Delta W_5 / \text{J}$		
0.5	0	170.66	-173.47	1.15	345.84	343.82	正确
	30	148.39	-297.50	1.69	521.26	474.66	正确
	60	92.54	-618.25	3.40	975.65	814.44	正确
	90	60.65	-805.58	4.83	1241.32	1013.54	正确
3.5	0	156.22	-163.32	1.21	323.51	320.25	正确
	30	140.36	-251.00	1.43	450.43	413.82	正确
	60	90.01	-540.91	2.98	870.44	724.70	正确
	90	56.71	-736.49	4.07	1153.93	934.91	正确

由于篇幅所限,现仅列出线路 1,3,5 的 ΔW_i 的仿真结果。由于电弧接地一般会形成高阻接地,给单相接地选线带来了极大的困难。为验证此方法能克服高阻接地故障对选线的影响,在过渡电阻为

1 kΩ、线路 L_1 不同故障位置、不同故障合闸角的情况下,故障的选线结果如表 2 所示。

表 2 线路 L_1 高阻接地故障选线结果

$x_f / \varphi /$ km (°)	$W_L /$ J	$W_1 /$ J	$\Delta W_i / J$			选线 结果	
			$\Delta W_1 / J$	$\Delta W_3 / J$	$\Delta W_5 / J$		
0.5	0	205.38	-381.43	2.28	675.05	621.14	正确
	30	269.19	-272.99	2.05	544.44	541.83	正确
	60	224.24	-352.55	2.73	640.06	604.98	正确
	90	110.65	-548.75	3.01	876.18	753.45	正确
3.5	0	178.83	-367.43	2.11	640.76	583.19	正确
	30	245.56	-253.95	1.76	504.15	500.25	正确
	60	214.47	-309.84	1.98	571.45	543.73	正确
	90	111.59	-487.81	2.79	786.70	676.44	正确

由于消弧线圈支路所消耗的暂态能量 W_L 的大小不仅与故障电流中衰减直流分量的初始值有关,还与其衰减系数成正比。当故障发生在高阻接地时,虽然故障接地电流较小,但是暂态电感电流回路的阻尼率增大,使得衰减直流分量的衰减系数变大,因而消弧线圈支路所消耗的暂态能量 W_L 受过渡电阻的影响较小,利于选线(如表 2 所示)。

当母线发生故障时,此方法同样能够正确选线,选线结果如表 3 所示。

表 3 母线故障选线结果

R_f / Ω	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta W_f / J$	W_f / J	$W_f < 0?$	选线结果
20	0	173.08	14.16	NO	正确
	30	210.71	64.97	NO	正确
	60	306.01	223.16	NO	正确
	90	360.82	312.98	NO	正确
1k	0	278.4	70.08	NO	正确
	30	273.16	19.03	NO	正确
	60	282.46	52.27	NO	正确
	90	297.41	175.99	NO	正确

上述仿真都是在线路 L_1 上发生单相接地故障进行的,对于其他线路也进行了相似的故障选线仿真(不再罗列仿真数据)。所有这些仿真都表明新方案能正确、灵敏地进行单相故障选线,并且不受故障位置、过渡电阻、故障合闸角以及故障线路的影响。

为了说明所提出的改进暂态能量选线方法在相

电压过零附近时发生单相接地故障具有更高的选线裕度以及灵敏度,比较了过去所提出的暂态能量选线方法与本方法在相电压过零附近时相同条件下单相接地故障的仿真数据,如表 4 所示。

表 4 改进暂态能量方法的故障选线结果比较

$x_f / R_f / \varphi /$ km Ω (°)	$\Delta W_i^* / J$			$\Delta W_i / J$			
	$\Delta W_1^* / J$	$\Delta W_3^* / J$	$\Delta W_5^* / J$	$\Delta W_1 / J$	$\Delta W_3 / J$	$\Delta W_5 / J$	
20	0	58.89	58.39	57.72	1.15	345.84	343.82
	30	49.46	124.29	108.76	1.69	521.26	474.66
0.5	0	68.46	156.56	138.58	2.28	675.05	621.14
	30	89.73	91.75	90.88	2.05	544.44	541.83
20	0	52.07	55.77	54.68	1.12	323.51	320.25
	30	46.79	103.37	91.15	1.43	450.43	413.82
3.5	0	59.61	153.98	134.79	2.11	640.76	583.19
	30	81.85	86.20	84.90	1.76	504.15	500.25

注:带(*)项为本文选取文献[14]所提出的暂态能量选线判据的仿真编程计算结果。

由上表看出在相电压过零附近时发生单相接地故障,虽然传统的暂态能量选线判据的仿真结果正确,但是选线裕度较低,影响到选线的灵敏性,如果考虑到实际系统中信号干扰以及其他不定因素,就可能会出现误选。而笔者提出的改进暂态能量方法自动利用了此时产生的衰减直流分量来选线,由表 4 可以看出此时本文提出的改进暂态能量选线方法优势明显。

4 结 论

在谐振接地系统,当在相电压最大时发生单相接地故障,可以产生明显的高频暂态信号,而在相电压过零附近故障时,暂态电容电流分量很小,再考虑到各种干扰的情况下,目前利用高频暂态电容电流分量选线的方法灵敏度不足且可能失效。但此时接地点与消弧线圈构成的电感电流回路会产生很大的衰减直流分量,消弧线圈上的暂态电流只有衰减直流分量而不含暂态电容电流且更易获取。在故障分量系统中各条线路(包括故障线路)以及消弧线圈支路的零序电流在一定时间段内所产生的暂态能量代数和必然为零。笔者根据这一特性提出了把消弧线圈支路作为一条健全线路,利用其暂态能量与其他所有线路暂态能量之和为零的原理构成选线判据

的自适应选线新方法,本方法为一种独立应用的选线方法,且无需判断故障合闸角,无论在相电压最大附近还是在过零点附近发生单相接地故障都具有很高的灵敏度。该方法适用于能有效获取消弧线圈电流的配电变电站。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [3] ZHANG Y X, JIN Z Q, DAI F X. New line-selection method for single phase grounding fault in distribution networks with two phase's current transformers[C]//Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China. Nanjing, China: DRPT, 2008;2281-2285.
- [4] WANG W C, ZHU K, ZHANG P, XU W. Identification of the Faulted Distribution Line Using Thyristor-Controlled Grounding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 24(1):52-60.
- [5] SUONAN J L, SONG G B, XU Q Q, et al. Time-domain fault location for parallel transmission lines using unsynchronized currents [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(4):253-260.
- [6] SONG G B, SUONAN J L, XU Q Q, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4):2396-2406.
- [7] SONG Y D, YUAN S, ZHAO C F. Neural Network Faulty Line Detection Method in Small Current Grounding Systems Based on Rough Set Theory[C]//International Conference on Macaronis and Automation, August 5-8, 2007, Harbin, China. Harbin, China: Macaronis and Automation, 2007: 3735-3739.
- [8] NORDMAN M M, KORHONEN T. Design of a concept and a wireless ASIC sensor for locating Earth faults in unearthed electrical distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1074-1082.
- [9] CHAARIO, MEUNIER M, BROUAYE F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution system relaying [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [10] ZHAO J P, ZHENG Y P, WANG Z P. Detection of the transmission line short-circuited fault based on lifting wavelet[C]//Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9 2008, Nanjing, China. Nanjing, China: DRPT, 2008;1663-1666.
- [11] 束洪春,刘娟,司大军,等. 自适应消弧线圈接地系统故障选线实用新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 29(13):64-68;83.
SHU H C, LIU J, SI D J, et al. New adaptive method for fault line selection in non-solidly grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 29(13): 64-68, 83.
- [12] 束洪春,司大军. 一种利用衰减直流分量的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力系统, 2006, 29(2):1-4.
SHU HONG-CHUN, SI DA-JUN. New approach for fault line selection in distribution system with arc suppressing coil grounding using decaying DC component[J]. Electric Power, 2006, 29(2):1-4.
- [13] 朱丹,贾雅君,蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3):75-78.
ZHU DAN, JIA YA-JUN, CAI XU. Transient energy to detect single-phase earthling fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3):75-78.
- [14] 束洪春,刘娟,王超,等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72-76.
SHU HONG-CHUN, LIU JUAN, WANG CHAO, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.
- [15] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2):195-199.
XUE YONG-RUI, FENG ZU-REN, XU BING-YIN. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'An Jiaotong University, 2004, 38(2):195-199..

(编辑 张小强)