

基于有源全补偿消弧控制的相似度单相接地故障选线方法

小电流接地故障选线问题是一直没得到彻底解决的技术难题。提出一种在有源全补偿消弧控制装置的基础上利用零序电流波形相似度判别故障线路的方法。该方法利用有源全补偿消弧控制装置替代消弧线圈，在补偿点前后两个短时间段内采集各条线路零序电流波形。利用故障线路与非故障线路零序电流波形的相似度要小于非故障线路间零序电流波形的相似度这一特征，在补偿的同时实现故障选线。对不同故障线路，不同接地电阻，不同故障位置等情况进行了仿真，证明了该方法在不影响补偿快速性条件下较消弧线圈系统的选线方法更加快捷。

张 杰/湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

郭晓霞 赵 威/国网湖北省电力公司随州供电公司

汪霄飞/国网湖南省电力公司电力科学研究院

0 引言

国内配电网大多采用小电流接地（中性点不接地或经消弧线圈接地）运行方式^[1-2]。而配电网在发生单相接地故障时，传统应对方法是在中性点处接入消弧线圈产生感性电流，与系统电容电流相抵消，从而减小接地电流，以达到熄弧的目的。为防止故障进一步扩大，及时并准确地判断出故障线路具有重要意义。由于故障电流微弱、电弧不稳定等原因，单相接地故障可靠检测一直比较困难。

近年来，随着电缆线路的大量使用，很多10 kV和6 kV电网逐渐改造为消弧线圈接地方式。目前，多种基于消弧线圈接地方式的选线方法受到国内外学者的关注。文献[3-7]利用小波原理分析暂态信号以实现选线判据，小波变换在频域和时域同时具有良好的局部化特

征，但由于小波基不易选取，至今仍没有一个理想的选取标准。文献[8-10]采用信号注入法，注入不同频率、不同波形的交流电流信号，用信号寻迹原理检测故障线路。但此方法是在补偿稳定后进行信号注入，会影响接地点处电流，严重时甚至导致重新燃弧。

消弧线圈接地故障选线可用的特征量较少，且每种故障特征都不是很可靠。本文提出一种基于有源全补偿消弧控制装置的相似度选线方法。系统发生单相接地故障时，在系统中性点处接入有源全补偿消弧控制补偿装置进行完全补偿。在补偿阶段线路零序电流存在明显特征，即非故障线路零序电流大小和方向均没有变化，而故障线路的幅值、相位均会发生变化。因此，利用补偿阶段故障线路与非故障线路零序电流波形相似度的巨大差异，可实现故障选线。

1 基于波形辨识的相似度理论

设 $x(n)$ 和 $y(n)$ 为两个离散的功率信号，它们的互相关函数 F_{xy} 定义为

$$F_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (1)$$

式中， N 为相关信号的记录长度或总采样点数。

分别对信号 $x(n)$ 、 $y(n)$ 做互相关运算，为了使相关运算的结果真正反映信号之间的相似性，需要排除信号幅值的影响，为此相关运算做归一化处理。

信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的方均根值记为



张 杰/副教授

关键词/Keywords

单相接地故障 ·
有源全补偿消弧控制 ·
故障选线 ·
相似度判别 ·

$$\delta_x = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\delta_y = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right]^{1/2} \quad (3)$$

互相关运算的归一化表示为

$$S_{xy} = \frac{F_{xy}}{\delta_x \delta_y} \quad (4)$$

$$S_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)y^2(n) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

称 S_{xy} 为互相关系数,其取值范围为 $[-1, +1]$ 。 $+1$ 表示两个确定信号完全正相似, -1 表示两个确定信号完全负相似,零值表示两个确定信号完全独立、毫无关系。

2 零序电流分析

对于简单出线多条线路的小电流接地系统,其简单无分支的线路可用 π 形模型等效,且线路的零序阻抗远小于其对地的电容电抗,可忽略不计,本系统基于有源全补偿消弧控制,补偿装置由直流侧电容、级联单相全桥逆变器和输出电感组成,故当接地系统第 j 条出线发生单相接地时,其简化的零序网络如图1所示。

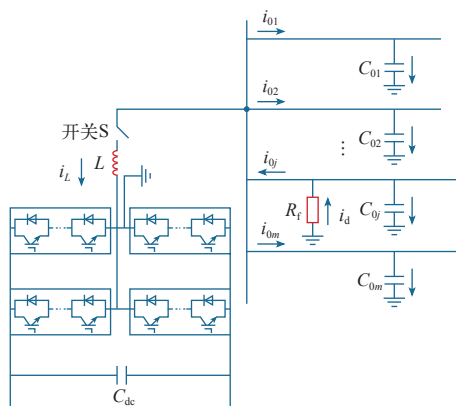


图1 配电网单相接地故障系统简化零序网络

图1中, C_{dc} 为直流侧电容; L 为输出电感; m 为系统出线数; C_{0j} 为第 j 条线路的零序分布电容; i_{0j} 为第 j 条线路的零序电流; i_d 为流过故障点的接地电流; i_l 为补偿电流; R_f 为接地电阻。

假设系统某一相发生接地故障，接地点处对地电压为零，分布电容被短接，其他两个非故障相的对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍。

故障发生后没有补偿时,即开关S断开时故障线路和非故障线路零序电流之间的关系参见图1。

在非故障线路*i*上，线路首端流过的零序电流有效值 I_{0i} 为

$$I_{0i} = 3\omega C_{0i}U \quad i = 1, \dots, m; i \neq j \quad (6)$$

式中, ω 为电源角频率; U 为电源相电压有效值。

即非故障线路首端零序电流为线路本身的电容电流,方向为母线流向线路。上述结论适用于每一条非故障线路。

故障点电流为

$$I_d = 3U\omega \sum_{i=1}^m C_{0i} = 3\omega CU \quad i=1, \dots, m \quad (7)$$

式中, C 为系统单相对地分布电容的总和。

系统的容性电流 $I_{C\Sigma}$ 与故障点电流相等,为

$$I_{C\Sigma} = 3\omega CU \quad (8)$$

在故障线路*i*首端流过的零序电流为

$$I_{0i} = 3\omega U(C - C_{0i}) \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知,非故障线路的暂态零序电流值主要与线路的零序分布电容相关。且故障线路 j 流过的零序电流大小等于非故障线路流过的零序电流总和,方向与非故障线路上的相反。

故障发生后,为了减小接地电流,图1中开关S闭合。非故障线路电容电流的大小、方向与中性点不接地系统相同。但对故障线路而言,接地点增加了一个电感分量的电流,从接地点流回的总电流为

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_L + \mathbf{I}_{C\Sigma} \quad (10)$$

式中, I_L 为补偿装置的补偿电流矢量。

为使故障点熄弧, 理想情况下需要使接地电流 $I_d = 0$, 即 $I_L = -I_{C\Sigma}$, 此时系统处于完全补偿状态。则电感电流有效值为

$$I_L = 3\omega CU \quad (11)$$

非故障线路首端零序电流仍然为线路本身的电容电流，方向为母线流向线路。

而在故障线路*i*首端流过的零序电流为

$$I_{0j} = 3\omega C_{0j}U \quad (12)$$

方向从原来的线路流向母线变为母线流向线路。

由此可知,补偿发生后,非故障线路零序电流大小不变,方向依然是从母线流向线路,而故障线路从原来线路流向母线转为从母线流向线路,其大小根据其故障线路本身的分布电容决定。

因此在系统补偿阶段,故障线路零序电流波形与非故障线路零序电流波形相似度小于非故障线路间的零序电流波形相似度。

3 选线判据

故障发生后,在补偿阶段,对各条线路零序电流波形进行两两相似度分析,得到一个相似度系数矩阵 R_{xy} ,即

$$R_{xy} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mm} \end{pmatrix} \quad (13)$$

将系数矩阵 R_{xy} 每一行求和,得到综合相似系数 k_j , $k_j = \sum_{i=1}^m S_{ji}$ ($j=1, \cdots, m$),则最小 k_j 所对应的线路 j 为故障线路。

为了计算互相关系数中两种功率信号的方均根值,最少需要1/4周期的信号波形。设投入补偿的时间为 t ,分别采集 t 之前的1/8个周波和 t 之后1/8个周波的零序电流分量,即总共采集补偿阶段1/4个周波的零序电流分量 $\sum_{n=1}^{N-1} i_{0jt}(n)$ ($j=1, \cdots, m$),则任意两条线路 p 、 q 零序电流的互相关系数为

$$S_{pq} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} i_{\text{opt}}(n) i_{\text{oqt}}(n)}{\left[\sum_{n=0}^{N-1} i_{\text{opt}}^2(n) i_{\text{oqt}}^2(n) \right]^{1/2}} \quad p=1,2,\cdots,m, \quad q=1,2,\cdots,m \quad (14)$$

4 仿真实验

在Matlab环境下,建一个含6条出线的小电流接地系统,补偿装置输出电感 $L=5\%/3\omega^2C$ 。系统模型如图2所示,线路参数如表1所示。仿真实验

分别模拟了故障合闸度为 0° 、 30° 和 90° 的情况,以下仿真实验数据呈现故障合闸度为 90° 的情况。设故障发生时间为0.04 s,补偿时间为0.046 s,采集补偿前1/8个周期和补偿后1/8个周期即共采集补偿阶段的1/4个周期。对于不同线路、不同位置 and 不同接地电阻等情况下发生的单相接地故障进行仿真分析,其选线结果如表2所示。表2中, L_j 为故障线路; R_f 为接地电阻; X_f 为故障点到母线的距离。

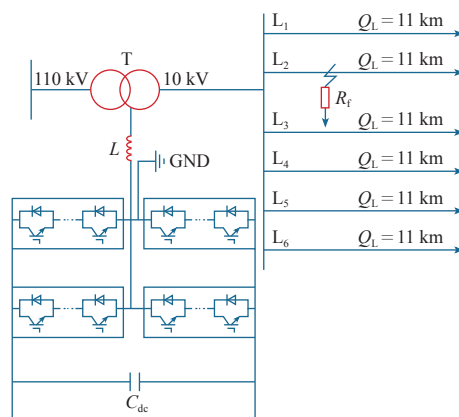


图2 有源全补偿消弧控制系统仿真模型

表1 线路参数

相序	电阻/(Ω/km)	电容/(μf/km)	电感/(mH/km)
零序	1.16	0.025	3.3
正序	0.048 4	0.03	1.1

表2 补偿阶段故障选线结果

L_j	X_f/km	R_f/Ω	综合相似系数 $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6]$	选线结果
L_1	2	20	$[-0.656\ 9, 1.505\ 4, 1.549\ 9, 1.268\ 4, -0.418\ 8, 0.737\ 5]$	正确
	7	250	$[1.009\ 3, 4.573\ 4, 4.597\ 3, 4.554\ 6, 4.372\ 4, 4.345\ 7]$	正确
L_3	3	20	$[0.312\ 4, 0.581\ 5, -0.304\ 7, 0.685\ 3, -0.242\ 3, 0.798\ 4]$	正确
	5	250	$[3.850\ 3, 3.684\ 3, 0.806\ 2, 3.745\ 6, 3.878\ 8, 3.578\ 7]$	正确
L_5	6	20	$[-0.328\ 3, 2.549\ 2, 2.599\ 1, 2.567\ 0, -1.209\ 0, 2.052\ 7]$	正确
	13	250	$[4.204\ 2, 4.431\ 2, 4.417\ 9, 4.349\ 7, 1.209\ 8, 3.664\ 9]$	正确

5 选线方法的适应性

为说明选线方法的适用性,本仿真在不同情况下对不同线路,不同故障位置进行相似度判断。

5.1 不同补偿度

由于补偿装置在补偿接地电流时通常采用过补偿, 因此在不同补偿度的情况下, 假设线路4发生接地电阻为180 Ω 、距母线的距离为7 km处的接地故障, 其选线结果如表3所示。表3中, ρ 代表补偿度。

表3 线路4不同补偿度故障选线结果

$\rho/(\%)$	综合相似系数 $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6]$	选线结果
5	[3.656 4, 4.013 3, 4.129 7, 0.110 1, 3.614 4, 3.800 3]	正确
8	[3.661 7, 3.990 4, 4.089 2, 0.155 2, 3.626 8, 3.727 3]	正确
10	[3.734 7, 4.071 0, 4.178 5, 0.150 1, 3.689 3, 3.862 9]	正确

5.2 叠加噪声

在实际工程中, 需要考虑外界噪声干扰对接地选线的影响。该方法同样具有很强的抗干扰能力, 在有不同噪声的情况下仍能正确选线。设置线路2和线路4分别在40 dB和80 dB噪声情况下发生接地电阻为250 Ω 的故障, 其选线结果如表4所示。表4中, n 代表分贝。

表4 添加噪声下的故障选线结果

L_j	n	X_f/km	综合相似系数 $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6]$	选线结果
L_2	40	2	[4.442 8, 1.598 1, 4.337 7, 4.350 6, 4.459 6, 3.593 1]	正确
	80	6	[4.531 0, 1.840 5, 4.466 3, 4.464 6, 4.571 0, 3.835 7]	正确
L_4	40	1	[4.524 8, 4.562 4, 4.569 5, 1.289 8, 4.556 6, 3.985 0]	正确
	80	5	[4.532 5, 4.579 1, 4.581 6, 1.536 9, 4.547 1, 4.068 4]	正确

以上仿真数据均是在故障合闸度为90°的情况下得到的。在故障合闸度为0°和30°的条件下, 仿真结果均表明了基于有源全补偿消弧控制的相似度选线判别方法的正确性。

6 补偿及选线方法的快速性

仿真表明, 根据补偿阶段零序电流波形相似度选线方法所用时间为8.5 ms (6 ms + 2.5 ms),

而传统消弧线圈系统所使用的选线方法至少为1个周期 (20 ms)。由此可见, 基于有源全补偿消弧控制装置的相似度选线判别方法较传统消弧线圈系统选线方法更加快速。

此外对传统经消弧线圈接地系统进行仿真, 线路参数不变, 设线路4发生故障, 接地电阻为250 Ω , 距离母线5 km, 合闸度为0°即0.035 s发生故障。消弧线圈电感为 $L = U/\omega i_L$, 则接地电流波形如图3所示。

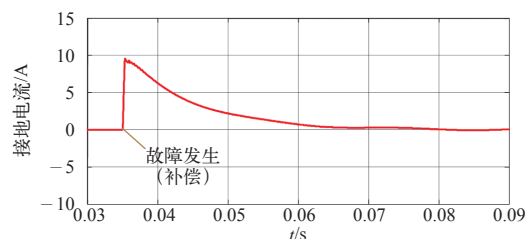


图3 经消弧线圈系统接地电流波形

而在基于有源全补偿消弧控制补偿装置下发生同样的故障, 在0.041 s进行补偿, 其接地电流波形如图4所示。

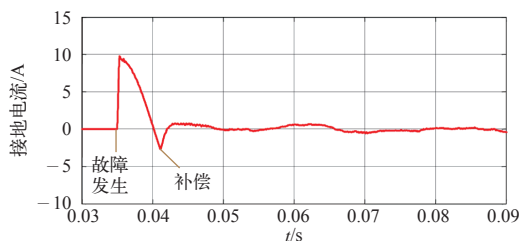


图4 有源全补偿消弧控制系统接地电流波形

由图3、图4可以看出, 传统经消弧线圈接地系统从故障发生到补偿稳定过渡过程时间为1.5个周期, 而本装置从故障发生到补偿稳定过渡过程时间不到1个周期, 比传统消弧线圈系统更加快捷。

仿真还模拟了合闸度为30°和90°的情况, 由于篇幅原因不在本文中展现。两种系统对比, 不同合闸度故障瞬间接地点尖峰电流值均相等, 而电流衰减曲线有差异。本装置电流衰减过程存在超调, 但过渡过程时间较消弧线圈系统快0.5个周期。

7 结束语

提出了一种基于有源全补偿消弧控制装置利用补偿阶段零序电流波形相似度判别故障线路的

方法。经过仿真分析,该方法能够将补偿和选线较好地统一起来,在系统故障后8.5 ms就能准确判断出故障线路,并且从故障发生后到补偿稳定所用的时间不到一个周期。该方法不仅提高了故障选线速度,而且避免了补偿稳定后其他选线方法对系统的扰动影响。

参考文献

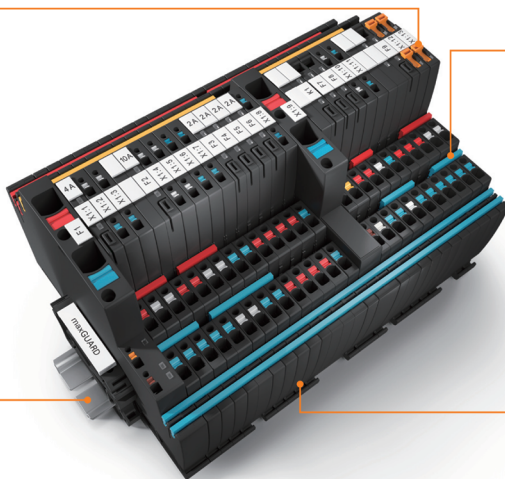
- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 郭清滔,吴田,等.小电流接地系统故障选线方法综[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):146-152.
- [3] 贾清泉,石磊磊,王宁,等.基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J].电工技术学报,2012,27(6):191-197.
- [4] 张伟刚,张保会,胡海松,等.应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J].电力系统自动化,2009,33(23):60-64.
- [5] 陈少华,桂存兵,雷宇,等.基于小波包的永久性单相接地故障的故障选线的仿真研究[J].继电器,2007,35(1):18-25.
- [6] 郭谋发,刘世丹,杨耿杰,等.利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J].中国电机工程学报,2013,33(19):183-190.
- [7] 庞清乐,孙同景,钟麦英,等.基于粗集理论的小电流接地系统故障选线[J].中国电机工程学报,2007,27(4):60-64.
- [8] 王楠,张利,杨以涵,等.10 kV配电网单相接地故障交直流信号注入综合定位法[J].电网技术,2008,32(24):88-92.
- [9] 樊淑娴,徐丙垠,张清周,等.注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J].电力系统自动化,2012,36(4):91-95.
- [10] 高志鹏,张慧芬,孙旭娜,等.注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(13):139-145.

(收稿日期:2015-07-27) EA



实用的测试杆
电源分配端子具有测试杆,可对负载回路进行手动通、断,用于线路试验或检测。

满足特殊定制需求
丰富的产品型号,多样的分线端子和附加组件能够始终确保提供客户特殊需求的解决方案。



适用横联件
可通过横联件进行负载监控回路连接,减轻负载监控和分线端子之间的接线任务。



节省大量空间
电子负载监控和分配器,单片6.1 mm宽。

Weidmüller

魏德米勒maxGUARD电子熔丝 ——负载监控与电压分配一体解决方案

魏德米勒创新的maxGUARD能够自动排除故障,易于维护,组成控制电压分配系统。maxGUARD系统整合了以往需独立安装的电子负载监测输出中的等电位分配端子,是24V DC电压控制分配系统的完整解决方案,帮助用户有效的节省时间、增加失效保护安全性、节省高达50%的端子导轨空间。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫,关注魏德米勒官方微信



Let's connect.