

基于磁通控制消弧线圈的 注入式选线新方法

李建山¹, 陈乔夫¹, 张宇¹, 姚建光²

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 泰州供电公司 输配电运行部, 江苏 泰州 225300)

摘要: 提出了一种谐振注入式接地故障选线新方法, 可用于谐振接地系统单相接地故障选线。该选线方法充分利用了基于磁通控制消弧线圈的运行特点以及谐振频率电流能够突出故障信息的特点, 可注入较大幅值的谐振频率电流以增强故障信息。其原理是在接地故障发生前后分别通过消弧线圈二次侧的逆变器注入相同的谐振频率电流, 对电力系统零序参数形成 2 次快照, 采用比值法及增补判据对 2 次快照的电流值、电压值进行分析, 判定不满足相关判据的回路为故障线路。理论研究和仿真证实, 该方法可以在消弧线圈补偿的同时进行选线, 可以有效地检测高、低阻接地故障。

关键词: 选线; 比值法; 谐振注入; 磁通控制; 消弧线圈

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0061-04

0 引言

目前, 自动跟踪消弧线圈技术取得长足进步, 并以其实时对地电容检测、迅速准确补偿接地电流、使瞬时接地电弧迅速熄灭、有效抑制过电压并有助于绝缘恢复而在中低压配电网中得到了广泛的应用。中性点采用自动跟踪消弧线圈接地的系统发生单相接地故障时允许继续运行 1~2 h, 一般不影响对负荷的正常供电, 可以有效地消除占绝大部分的瞬间单相接地故障, 但仍应及时选出故障线路以防止接地故障扩大^[1-2]。选线与消弧线圈对接地电流的要求是矛盾的: 接地故障点补偿的残流越小, 越有利于熄弧, 接地电流越大, 越有利于准确选线。所以采用自动跟踪补偿消弧线圈接地的系统对接地故障选线提出了新的要求。为此, 本文在分析中性点经基于磁通控制的消弧线圈接地的补偿电网发生单相接地故障前后特点的基础上, 提出了利用注入谐振频率电流进行接地选线的新方法。

目前, 应用于谐振接地系统的选线方法一般是残流增量法^[3-4]。这种方法是通过改变消弧线圈补偿的脱谐度并比较改变脱谐度前后各回线零序电流的变化量进行选线。在这种方法中, 增大脱谐度易使电弧重燃, 减小脱谐度容易引起谐振过电压; 不能在消弧线圈补偿的同时选线; 在高阻接地的时候, 故障线路零序电流变化量不能保证最大, 从而容易误判。文献[5-8]分别采用了注入 220 Hz、70 Hz、谐振频率等信号进行选线的方法, 这些方法注入的信号很小, 在大电流背景下有很大的测量误差。本文提出的注入式选线方法是结合现有基于磁通控制消弧线圈而

采用的配套选线技术, 充分利用了本消弧线圈独特的运行特点, 能注入幅值较大的电流, 保证选线的精度, 追加的设备较少。

1 基于磁通控制消弧线圈的工作原理

基于磁通控制的消弧线圈系统以可调电抗器为核心, 配合对地电容检测, 实现快速响应、自动调谐的功能^[9]。

可调电抗器是一个双边励磁的变压器。根据文献[9], 在带气隙的变压器二次侧采用 IGBT 逆变器注入一个与一次侧电流频率相同且相位相反的电流时, 若注入电流的幅值连续变化, 则变压器的主磁通也随之连续变化, 从而使变压器的一次侧绕组在一次回路中呈现连续可调的等效电抗。将二次侧设计成匝数、几何尺寸完全相同的多绕组形式时, 若在每个二次侧绕组中都注入完全相同的电流, 与二次侧只有一个绕组的情形等效。现有基于磁通控制的大容量消弧线圈就是二次侧采用多绕组的形式实现的。

消弧线圈的对地电容检测是复用二次侧的一个绕组, 采用频率扫描法实现^[10]。在未出现接地故障时, 消弧线圈运行于对地电容检测状态, 由逆变器向该绕组注入频率可变的恒幅电流, 利用谐振原理实现对谐振频率的捕捉和系统对地电容的实时计算与存储; 当接地故障发生时, 消弧线圈运行于补偿状态, 该绕组与其他二次侧绕组都按一定控制规律注入补偿电流来共同调节一次侧等效电抗。图 1 所示为对地电容检测等效原理图, 二次侧某一绕组注入的变频恒幅电流 I_{2f} , 其频率从初始设定值按一定步长 (如 0.1 Hz) 递增到设定的最大值, 如此循环变化。若变到某频率 f^* 时, 回路出现谐振, 其特征是 U_{1f} 与 I_{2f}

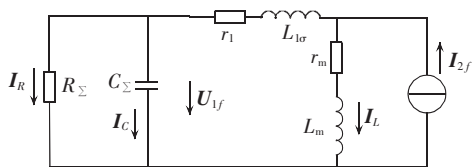


图 1 对地电容检测等效原理图

Fig.1 Equivalent circuit of ground-capacitance detection

同相位并且 U_{1f} 突然急剧升高,系统立即将这一频率储存并由公式计算此时系统总的对地电容值 C_Σ ,考虑到对地电容可能再出现变化,系统继续扫描和更新储存谐振频率。

可见,基于磁通补偿的消弧线圈在补偿时是通过在变压器二次侧注入工频电流的方法调节其在工频频率下的等效电抗值,并不改变其物理结构。根据叠加原理,若在消弧线圈投入补偿的同时,叠加入此前检测到的谐振频率电流,消弧线圈对这一电流仍呈现其原来的电感参数,该电流仍为谐振电流,不需要再次检测谐振频率;对谐振频率电流而言,不论消弧线圈投入补偿与否,在发生接地故障前后系统的零序电路参数仅有接地点附加接地电阻一处改变;本消弧线圈副方采用的大功率 IGBT 逆变器可以注入较大幅值的电流;系统零序回路在谐振状态会出现明显的特征,这一特征有利于突出故障信息,可为选线所用。

2 谐振注入式选线方法

本文提出的谐振注入式选线方法与基于磁通控制消弧线圈的工作原理紧密相关。

2.1 选线原理

当消弧线圈系统运行于对地电容检测状态时,一旦检测到谐振频率,系统不但存储谐振频率并计算系统对地总电容值,而且同时检测并存储流过每回线的谐振频率电流值以及系统中性点处谐振频率电压值,所存储的数据完整记录了系统当时的电路参数,形成了故障前的系统快照,循环检测时,快照实时更新;在消弧线圈进入补偿状态的同时,叠加入最新检测到的谐振频率的幅值相同的电流,再次检测并存储每回线的谐振频率电流值以及中性点处的谐振频率电压值,形成故障后的快照。2 次快照的间隔时间很短,可认为系统对地电容以及泄漏电阻参数基本不变。就谐振频率电流而言,2 次快照的电路参数改变仅仅是在故障点处增加了一个接地电阻,因此可以通过 2 次快照的对比,检测出因附加接地电阻而导致接地故障的故障线路。

2.2 比值型选线判据

图 2 为基于磁通控制原理的自动调谐消弧线圈在系统中的应用示意图,为简单起见,图中没有画出各回线对地泄漏电阻。当消弧线圈运行于对地电容检测状态时,消弧线圈系统通过逆变器在变压器二次侧的一个绕组注入变频恒幅电流 I_{2f} ,记

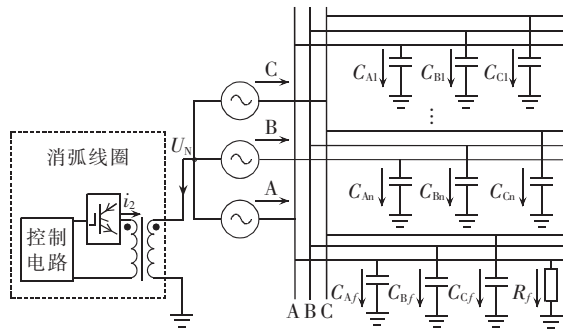


图 2 消弧线圈在电力系统应用示意图

Fig.2 The application of arc suppression coil in power network

故障前最后一次检测到并存储的谐振频率为 f^* ,对应的注入电流为 I_{21}^* ,其在变压器一次侧即中性点处感应的电压为 U_{11}^* ,并记此时第 i 条回线检测到的谐振频率电流为 I_{i1} 。消弧线圈根据系统中性点工频位移电压 U_N 是否超过消弧线圈的启动电压来判断是否发生接地故障,一旦 U_N 越限,消弧线圈立即进入补偿状态,逆变器控制系统根据最新检测的对地电容值迅速注入一定幅值的工频电流来调节消弧线圈的等效电感 L ,使其按照设定的脱谐度补偿故障点电流,达到消弧的目的。

当消弧线圈处于补偿状态,即注入一定幅值的工频 50 Hz 电流时,同时叠加入频率为 f^* 的电流 I_{22}^* , I_{22}^* 的幅值与 I_{21}^* 相同,其在变压器一次侧感应的电压为 U_{12}^* 。记此时第 i 条回线检测到的谐振频率电流为 I_{i2} 。根据叠加原理, U_{12}^* 所在回路的电气参数不受消弧线圈工频补偿电流的影响,但因附加了接地电阻,使 $U_{12}^* < U_{11}^*$ 。假定线路 m, n 均为正常线路,故障前后 2 条线路的参数没有变化,故

$$U_{11}^*/I_{m1} = U_{12}^*/I_{m2} = Z_m \quad (1)$$

$$U_{11}^*/I_{n1} = U_{12}^*/I_{n2} = Z_n \quad (2)$$

式中 Z_m 与 Z_n 分别为第 m, n 条线路在谐振频率 f^* 下的对地阻抗。

可以推知任意 2 条正常线路的电流关系满足

$$I_{m1}:I_{m2}=I_{n1}:I_{n2} \quad (3)$$

假定线路 j 为故障线路,故障后的线路参数是在故障前的基础上并联接地电阻 R_f ,该线路上的电压、电流关系满足: $U_{11}^*/I_{j1}=Z_j, U_{12}^*/I_{j2}=Z_j//R_f, Z_j//R_f$ 表示 Z_j 与 R_f 的并联等效电抗。根据前面的几个公式可以推知:

$$I_{j1}:I_{j2} \neq I_{m1}:I_{m2} \quad (4)$$

所以根据各回线在故障前后检测到的谐振频率电流之比是否满足式(3),就可以选出故障线路。

根据谐振原理及注入的谐振频率电流所在回路的等效电路可知, U_{12}^* 主要由 I_{22}^* 和 R_f 决定。当 R_f 较大时, U_{12}^* 较高,某一回线检测到的 I_{i2} 较大,相对误差较小,应用比值法的误差也较小;当 R_f 较小时, U_{12}^* 较低,采用比值法会造成较大误差。可见检测误差

与 U_{12}^* 的高低有很大关系。若在补偿状态注入的电流 I_{22}^* 的幅值根据 $U_{12}^*=U_{11}^*$ 确定,频率仍为 f^* ,则比值法的判据相应改为正常线路的谐振频率电流幅值不变,即

$$I_{m2}=I_{m1} \tag{5}$$

对于故障线路则

$$I_{j2}\neq I_{j1} \tag{6}$$

这种方法是比值法的延伸,其实质是通过注入较大的谐振频率电流保证正常线路上谐振频率电流幅值不变,理论上对于接地电阻不为 0 时都能适用,但在实际应用中当 R_f 较小时,逆变器难以注入幅值很大的谐振频率电流来维持 $U_{12}^*=U_{11}^*$,需要改进在 R_f 较小时的判据。当 R_f 小于某一设定的阈值 R^* 时,相应的判据可在下述 5 种形式中选择或综合应用。

a. 幅值判据。注入的电流 I_{22}^* 的幅值与频率保持和 I_{21}^* 相同,在 R^* 远小于任意一条线路 i 在谐振频率下对地电抗 Z_i 时, I_{22}^* 感应到变压器一次侧的电流大部分流过 R_f ,在故障线路检测到的 I_{j2} 远远大于正常线路的 I_{m2} ,因此可以通过比较各条回线检测到的谐振频率电流幅值确定故障线路。 R_f 可以由故障时刻中性点工频位移电压近似估算,若中性点工频位移电压较高,则 R_f 较小。

b. 混合比值判据。在一定脱谐度下,低阻接地时流过故障线路的工频零序电流比较明显,因此改为检测各回线工频零序电流 I_{bi} 的大小。假定消弧线圈补偿时中性点工频位移电压为 U_b ,对于正常线路, $U_b/I_{bm}=Z_{bm}$,忽略线路对地泄漏电阻(一般为对地容抗的 10 倍以上)时, $Z_m=kZ_{bm}$, k 为基波频率与谐振频率之比。可以推知:

$$kI_{m1}:I_{bm}=U_{11}:U_b \tag{7}$$

为此

$$I_{n1}:I_{bn}=I_{m1}:I_{bm} \tag{8}$$

则任意 2 条正常线路的零序电流值之比满足式(8);故障线路则不满足此公式。

c. 相位判据。在故障线路检测到的电流 I_{j2} 含有较大阻性分量,正常线路的 I_{m2} 是容性的,因此故障线路的 I_{j2} 与 U_{12}^* 相位差小于某一整定值 φ^* ,而正常线路的 I_{m2} 与 U_{12}^* 的相位差接近 90° 。可见,通过比较各回线的谐振频率电流相位可以判定故障线路。

d. 作为验证判据的电容值判据。设对地电容检测状态消弧线圈检测到的谐振频率为 f^* ,注入的电流为 I_{21}^* ,变压器一次侧感应的电压为 U_{11}^* ,对地电容检测到的系统对地总电容为 C_Σ ,仍记此时第 i 条回线检测到的谐振频率电流为 I_{i1} 。根据公式 $U_{11}^*=I_{i1}\cdot Z_i$ 可知,在忽略系统中较大的对地泄漏电阻的情况下,各回线的谐振频率电流之比等于各回线的对地电容之比。根据总电容与各回线电容之比,可以近似算出每一回线的对地电容。针对消弧线圈在补偿状态可能出现的因 U_{12}^* 较小而导致检测精度不够的问题,可以通过 U_{11}^* 与各回线对地的容抗值之比验证各回

线的谐振频率电流 I_{i2} 的准确度。

e. 可进一步减小误差的增量比值法。误差理论表明,2 次电流测量的增量 $I_{m1}-I_{m2}$ 不受仪器误差的影响,因而若将比值判据改为

$$I_{m1}:(I_{m1}-I_{m2})=I_{n1}:(I_{n1}-I_{n2}) \tag{9}$$

则可有效提高在较小电流时比值法的准确度。

经分析可知,本文提出的谐振注入式选线方法可以在消弧线圈补偿的时候同时选线;可以注入较大幅值的电流;低阻接地时有多种判据供选择,高阻接地时能保证较高准确度;根据近似估算的每回线对地电容值,可以验证检测电流值的准确度。

3 仿真验证

本文采用 Matlab 仿真软件,对谐振注入式选线方法进行了仿真验证。消弧线圈容量为 $800\text{ kV}\cdot\text{A}$,一次侧电感值为 0.824 H ,系统有 24 条回线,对地总电容为 $62.415\text{ }\mu\text{F}$,谐振频率 22 Hz ,仿真注入电流为 0.5 A ,接地电阻为 $1\text{ k}\Omega$ 时的情形。仿真考虑了系统对地泄漏电阻以及线路电感。

图 3 所示为仿真时截取的 4 条线路在接地故障(图中 1.0 s 时刻发生接地故障)发生前后的零序电流(谐振频率)的波形,自上而下依次为线路 1~4,电流 I_{i1} 与 I_{i2} 分别于 $t=0.5\text{ s}$ 和 $t=2.0\text{ s}$ 时刻在图中读出。其记录数据如表 1 所示,通过比值比较可以断定线路 4 为故障线路。经样机实验证实,当扫频出现谐振时 U_{11}^* 约为 $600\sim 700\text{ V}$,但是在谐振点附近电压并不高,可见扫频仅仅引起瞬时的脉冲过电压,不会影响系统正常供电。

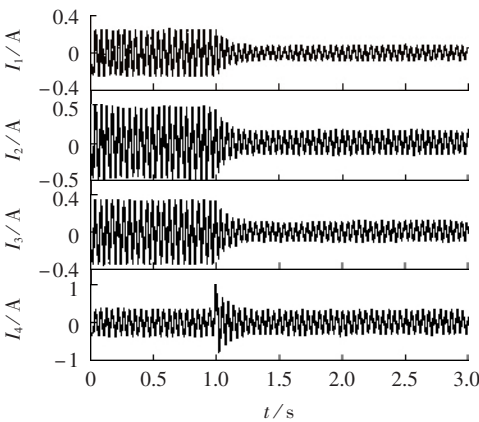


图 3 4 条回线在接地前后谐振电流波形
Fig.3 Waveforms of selected 4 lines before and after grounding fault

表 1 接地电阻为 $1\text{ k}\Omega$ 时各回线记录数据
Tab.1 The record data of each line when the grounding resistance is $1\text{ k}\Omega$

线路	$C/\mu\text{F}$	I_{i1}/A	I_{i2}/A	U_{11}^*/V	U_{12}^*/V	$I_{i1}:I_{i2}$
1	1.980	0.24	0.08	887	284.09	3.00
2	3.735	0.46	0.15	887	284.09	3.01
3	2.790	0.34	0.11	887	284.09	3.09
4	2.835	0.35	0.31	887	284.09	1.13

4 结论

中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障的准确选线是一个技术难题^[1],理论和仿真研究表明,本文提出的谐振注入式选线方法充分利用了现有消弧线圈的运行特点,通过相关判据的联合应用,对高、低阻接地故障均能保证选线准确度。

参考文献:

- [1] 齐郑,杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):1-5.
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [2] 要焕年,曹梅月. 谐振接地技术新发展[J]. 中国电力,2000,33(10):55-57,80.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. New development of resonant neutral earthing technology [J]. Electric Power, 2000, 33(10): 55-57, 80.
- [3] 郑鹏鹏. 小电流接地选线的工程实践与技术探讨[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):82-85.
ZHENG Peng-peng. Engineering practices and discussion of weak current grounding wire selection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 82-85.
- [4] 桑在中,潘贞存. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术[J]. 电网技术,1997,21(10):50-53.
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun. A new approach of fault line identification, fault distance measurement and fault location for single phase to ground fault in small current neutral grounding system [J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 50-53.
- [5] 张慧芬,潘贞存,田质广,等. 基于注入法的配电网接地故障检测方法[J]. 济南大学学报:自然科学版,2004,18(2):164-168.
ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, TIAN Zhi-guang, et al. Research of fault detection based on additional diagnostic signal in MV / LV distribution systems [J]. Journal of Jinan University: Sci & Tech, 2004, 18(2): 164-168.
- [6] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-32,36.

ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32, 36.

- [7] GRIFFEL D, HARMAND Y, LEITLOFF V, et al. A new deal for safety and quality on MV networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428-1433.
- [8] 王慧,范正林,桑在中. “S注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备,1999,19(3):18-20.
WANG Hui, FAN Zheng-lin, SANG Zai-zhong. The “S signal injection method” and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location [J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [9] 盛建科,陈乔夫,熊娅俐,等. 基于磁通可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 电工技术学报,2005,20(2):88-93.
SHENG Jian-ke, CHEN Qiao-fu, XIONG Ya-li, et al. A new type automatic resonant arc-suppressing coil based on controllable magnetic flux [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 88-93.
- [10] 熊娅俐,陈乔夫,盛建科,等. 基于注入信号的消弧线圈电容检测方法[J]. 高电压技术,2005,31(3):36-38.
XIONG Ya-li, CHEN Qiao-fu, SHENG Jian-ke, et al. Measurement system of auto-tuning ARC based on injecting current signal [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 36-38.
- [11] ZIVANOVIC R, SCHEGNER P, SEIFERT O, et al. Identification of the resonant grounded system parameters by evaluating fault measurement records [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004, 19(3): 1085-1090.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

李建山(1979-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:miolan@sina.com);

陈乔夫(1946-),男,湖北公安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为FACTS技术,包括有源滤波器、有源可变电抗器、特种变压器(E-mail:chenqiao@mail.hust.edu.cn);

张宇(1980-),男,湖南衡阳人,博士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:flowby@163.com);

姚建光(1982-),男,江西宜春人,助理工程师,从事电网调度自动化方面的研究。

Grounding fault line detection based on magnetic-flux controllable arc suppression coil using current injection technology

LI Jian-shan¹, CHEN Qiao-fu¹, ZHANG Yu¹, YAO Jian-guang²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Taizhou Electric Power Supply Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: A novel approach of grounding fault line detection is proposed for single-phase grounding fault of resonant grounding system. It takes full advantage of the magnetic-flux controllable arc suppression coil and the fault information in resonant current. The fault information can be amplified by injecting heavy current. It takes two snapshots of power network zero-sequence currents before and after grounding fault by injecting same resonant current. Proportion method and supplementary criterions are used to analyze and determine the fault line by comparing shot currents and voltages. Theoretic study and simulation show that the approach works well during compensation and effectively detects faults with high or low grounding resistance.

Key words: grounding fault line detection; proportion method; resonant current injection; magnetic-flux control; arc suppression coil