

小电流接地系统单相接地与谐振状态辨识技术

吴骏¹, 卢刚²

(1. 江西九江供电公司, 江西 九江 332000; 2. 山东电力集团公司, 山东 济南 250001)

摘要: 小电流接地系统在发生单相接地和谐振状态时, 都表现为零序电压升高, 现象非常相似。传统选线装置仅依靠零序电压和零序电流启动不能有效辨识单相接地和谐振状态, 容易造成误动。经过理论研究, 重点分析了消弧线圈断线谐振和 PT 铁磁谐振的特征, 详细对比了单相接地与谐振状态两种情况下三相电压及零序电压的差异, 并在此基础上提出了综合对比零序电压和相电压的辨识技术。通过现场实际运行数据对该方法进行了验证, 表明该方法能够有效提高选线装置的动作可靠性, 满足实用要求。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地; 故障选线; 消弧线圈断线谐振; 铁磁谐振

Virtual grounding identification technology in neutral point non-effectively grounded system

WU Jun¹, LU Gang²

(1. Jiujiang Power Supply Company, Jiujiang 332000, China; 2. Shandong Electric Power Corporation, Jinan 250001, China)

Abstract: Zero-sequence voltage will rise when single-phase-to-earth occurs in neutral point non-grounded system. So it is with the resonance in the above said system. Traditional line selection equipment will start only when zero-sequence voltage and current exceed set value. As they could not tell the difference between single-phase-to-earth and resonance, malfunction may be caused. After study of theory, characteristics of PT ferroresonance and line broken resonance of arc-suppression coil are emphatically analyzed, three-phase voltage and zero-sequence voltage in case of single-phase grounding and resonance are compared with each other in detail. On this basis, the technology is put forward based on comprehensive comparison of zero-sequence voltage and three-phase voltage. The technology is verified by field data, which reveals that the technology could effectively increase the reliability of line selection equipment and therefore could satisfy the practical requirements.

Key words: neutral point non-grounded system; single-phase-to-earth; fault line selection; line broken resonance of arc-suppression coil; ferroresonance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0144-04

0 引言

我国 3~60 kV 配电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式, 称为小电流接地系统。小电流接地系统发生单相接地故障后, 必须尽快查明故障线路。经过多年的研究, 目前已研究出许多故障选线方法并开发出多种型号的故障选线装置, 这些选线装置的一个共同特征就是依靠零序电压和零序电流超过设定阈值进行启动。在实际运行中, 小电流接地系统在谐振状态下可能出现零序电压长时间升高的现象, 系统将出现幅值较高的零序电压和零序电流, 此时传统选线装置容易发生误动, 按单相接地故障进行选线处理, 给运行人员带来错误结论。

在谐振状态中, 最常见的有两种: 消弧线圈断线谐振和 PT 铁磁谐振, 这两种情况与单相接地现象非常相似。文献[1]提出利用注入高频信号的方法进行辨识, 但仅适用于接地电阻低的情况, 如果发生高阻接地, 则该方法失效。文献[2-4]分析了如何抑制铁磁谐振, 文献[5-6]分析了如何避免消弧线圈断线谐振, 但是都没有分析如何区分接地故障和谐振状态。

本文经过理论研究, 重点分析了消弧线圈断线谐振和 PT 铁磁谐振的特征, 详细对比了这两种情况与单相接地情况下三相电压及零序电压之间的差异, 并在此基础上提出了综合对比零序电压和三相电压的辨识技术。通过现场实际运行数据对该方法进行了验证, 表明该方法能够有效辨识谐振状态,

提高小电流接地选线装置的动作可靠性, 满足实用要求。

1 消弧线圈断线谐振

中性点经消弧线圈接地电网正常运行时的零序等值电路是一个串联谐振电路, 图 1 为忽略系统阻尼情况下的等效电路。

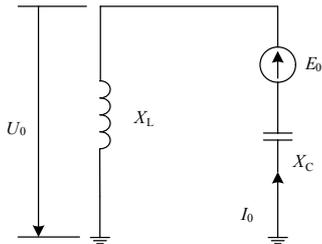


图 1 消弧线圈断线谐振等效回路

Fig.1 Equivalent circuit of arc-suppression coil series resonant

\dot{E}_0 为系统三相不平衡电压, 即不接入消弧线圈时的中性点电压; X_L 为消弧线圈感抗, X_C 为系统对地容抗; \dot{U}_0 为接入消弧线圈之后的中性点电压。不平衡电压 \dot{E}_0 的计算公式为:

$$\dot{E}_0 = -\frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \cdot \dot{E}_A = -K_{C0} \cdot \dot{E}_A \quad (1)$$

其中: \dot{E}_A 为电源相电势; K_{C0} 为系统的不对称度。由图 3 可得:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_0 X_L}{X_L - X_C} = -\frac{K_{C0} \cdot \dot{E}_A}{1 - X_C/X_L} = -\frac{K_{C0} \cdot \dot{E}_A}{\gamma} \quad (2)$$

其中 γ 表示系统的脱谐度。由式 (2) 可以分析, 中性点经消弧线圈接地系统的中性点电压幅值取决于两个因素: 系统不对称度 K_{C0} 以及消弧线圈的脱谐度 γ 。当电网断线故障时, K_{C0} 增大, 引起不平衡电压增大, 同时断线故障将导致系统接近全补偿, 此时 γ 很小, 最终使 U_0 显著提高。

设 A 相电容为 C_A , BC 两相电容 $C_B = C_C = C$, 由式 (1) 可得:

$$\dot{E}_0 = \frac{C - C_A}{C_A + 2C} \cdot \dot{E}_A \quad (3)$$

由式 (3) 可知不平衡电压与 A 相的电势相位相同。进一步由式 (2) 可得:

$$\dot{U}_0 = \frac{C - C_A}{C_A + 2C} \cdot \frac{\dot{E}_A}{\gamma} \quad (4)$$

由式 (4) 可知当消弧线圈处于过补偿时, $\gamma < 0$,

此时 \dot{U}_0 和 \dot{E}_A 反相; 当消弧线圈处于欠补偿时, $\gamma > 0$, 此时 \dot{U}_0 和 \dot{E}_A 同相。图 2 为三相电压的相量图。图中 \dot{U}'_0 为欠补偿电网的中性点电压, \dot{U}'_A 、 \dot{U}'_B 、 \dot{U}'_C 为三相电压, 此时 A 相电压升高, 其它两相电压降低; \dot{U}''_0 为过补偿电网的中性点电压, \dot{U}''_A 、 \dot{U}''_B 、 \dot{U}''_C 为三相电压, 此时 A 相电压降低, 其它两相电压升高。如果 BC 两相电容不相等, 由于在断线故障时 BC 两相电容与 A 相电容的差将远大于 BC 两相电容之间的差, 因此相电压与零序电压的变化趋势不受影响, 只是相量起点在图 2 所示的虚线区域内。

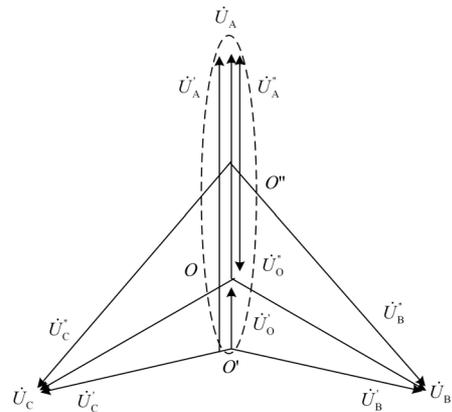


图 2 消弧线圈断线谐振电压向量图

Fig.2 Voltage phasor figure of arc-suppression coil line broken resonant

2 PT 铁磁谐振

在中性点不接地系统, 母线上通常接有 Y_0 接线的电磁式电压互感器 (PT), 由于 PT 具有饱和特性, 当系统受到冲击使 PT 电感饱和时, 电感参数与电网对地电容参数匹配, 将发生铁磁谐振, 使中性点产生较高的位移电压。由于 PT 电感可能在不同的频率下与电容发生谐振, 因此谐振频率不唯一, 具体包括基频谐振、倍频谐振和分频谐振。

通过分析零序电压的频率可以辨识倍频谐振和分频谐振。但是由于基频谐振产生的零序电压为工频 50 Hz, 因此仅分析零序电压是无法进行辨识的。

母线安装 Y_0 接线 PT 的中性点不接地系统等效电路如图 3 所示。设系统三相电源及三相对地电容对称, 图中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为三相电源电势; \dot{U}_0 为中性点电压即零序电压; L_A 、 L_B 、 L_C 为 PT 各相励磁电感; C_0 为电网各相对地电容。

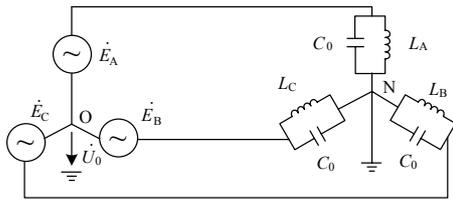


图 3 PT 等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of PT

由图 3 可知，中性点电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (5)$$

其中 Y_A, Y_B, Y_C 为各相的等值导纳。

当 PT 发生基频铁磁谐振时，有如下两种饱和的情况。

(1) 一相饱和

此时饱和相的电抗值减小，该相的等值导纳可能为容性或者感性。设 A 相 PT 轻度饱和时，其导纳支路用等值电容 C_X 表示；B、C 相为非饱和相，其导纳支路用等值电容 C 表示。由式 (5) 得中性点位移电压为：

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A(C_X - C)}{C_X + 2C} \quad (6)$$

设 A 相 PT 重度饱和时，其导纳支路用等值电感 L 表示；B、C 相为非饱和相，其导纳支路用等值电容 C 表示。由式 (5) 得中性点位移电压为：

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A(\frac{1}{\omega L} + \omega C)}{\frac{1}{\omega L} - 2\omega C} \quad (7)$$

式 (6)、(7) 分别对应图 4 (a)、(d)，此时一相电压升高、两相电压降低。

(2) 两相饱和

此时有两相发生饱和，两相的等值导纳可能为容性或者感性。设 B、C 相轻度饱和时，其导纳支路用等值电容 C_X 表示；A 相为非饱和相，其导纳支路用等值电容 C 表示。由式 (5) 得中性点位移电压为：

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A(C - C_X)}{C + 2C_X} \quad (8)$$

设 B、C 相重度饱和时，其导纳支路用等值电感 L 表示；A 相为非饱和相，其导纳支路用等值电容 C 表示。由式 (5) 得中性点位移电压为：

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A(\omega C + \frac{1}{\omega L})}{\omega C - \frac{2}{\omega L}} \quad (9)$$

式 (8)、(9) 分别对应图 4 (b)、(c)，此时一相电压降低、两相电压升高。

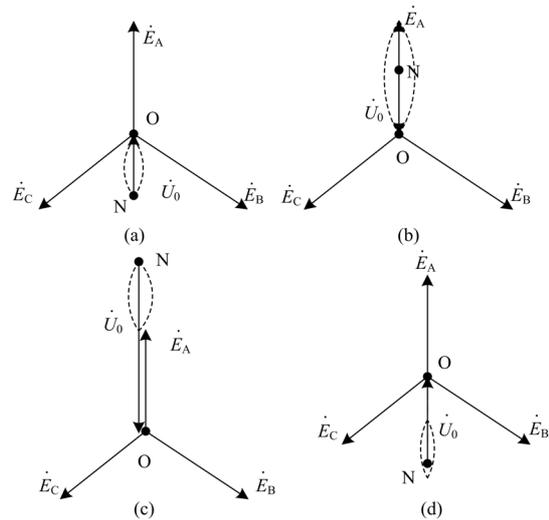


图 4 基频谐振电压相量图

Fig.4 Voltage phasor figure of base frequency ferroresonance

在一相饱和或者两相饱和时，如果 BC 两相参数不相同，由于在铁磁谐振时 BC 两相参数与 A 相参数的差将远大于 BC 两相参数之间的差，因此相电压与零序电压的变化趋势不受影响，只是相量起点在图 4 所示的虚线区域内。

3 谐振状态辨识技术

单相接地故障时中性点电压相量的起点位于以接地相电压相量为直径的半圆周上，而 PT 基频铁磁谐振或消弧线圈断线谐振时，虽然具体情况有很多种，但共同特征是中性点电压相量的起点接近某相电压相量或其两侧的延长线上。

因此当系统相电压和零序电压满足如下条件时，就可以判断系统发生基频铁磁谐振或者消弧线圈断线谐振而非单相接地：

- (1) 零序电压与某相电压接近同相或反相。
- (2) 两相电压同时升高，且超过线电压。
- (3) 在一相电压降低但不为零的情况下，其他两相电压同时升高，且幅值接近。
- (4) 两相电压同时降低，且幅值接近。

根据以上分析，设计虚拟接地辨识软件流程如图 5 所示。

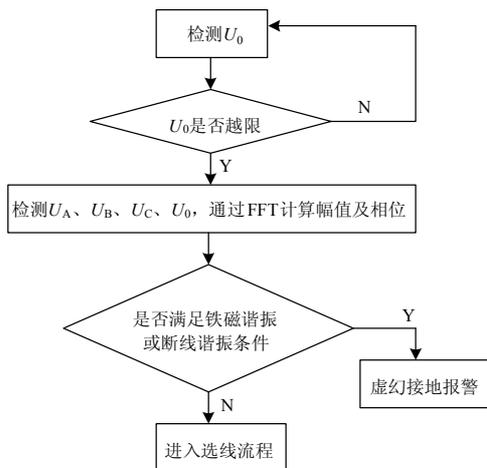


图 5 虚拟接地辨识软件流程

Fig.5 Software flow of virtual grounding identification

对于多数情况, 上述条件可以辨识 PT 基频铁磁谐振或消弧线圈断线谐振。但是如果消弧线圈断线谐振中 $\frac{C-C_A}{C_A+2C} \cdot \frac{1}{\gamma} = -1$, 由式(4)得 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_A$, 与 A 相金属性接地一致, 此时必须增加其他判据。

4 现场故障数据分析

本文提出的方法已通过现场实际数据进行了验证。图 6 为某 10 kV 不接地系统发生基频铁磁谐振的波形图, 相电压及零序电压如表 1 所示。

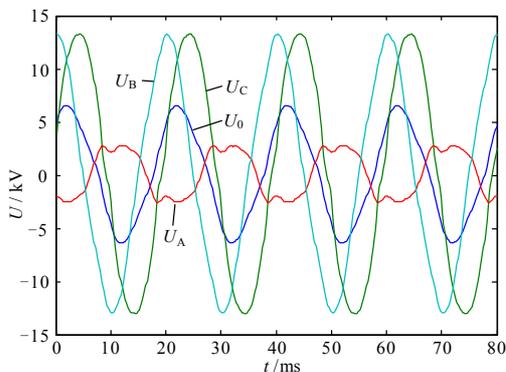


图 6 基频铁磁谐振电压波形

Fig.6 Voltage waveform of base frequency ferroresonance

表 1 电压数据

Tab.1 Voltage data

	电压/kV
A 相电压	2.1
B 相电压	9.2
C 相电压	9.2
零序电压	3.9

图中 B、C 相电压升高, 有效值相等; 零序电压与 A 相电压相位相反; 零序电压与 BC 两相电压的相位差相等。波形特征与分析结论一致, 验证了辨识方法的正确性。显然该情况属于基频谐振的第二种类型, 为 BC 两相 PT 轻度饱和。

图 7 为某 10 kV 谐振接地系统发生断线谐振的波形, 相电压及零序电压如表 2 所示。

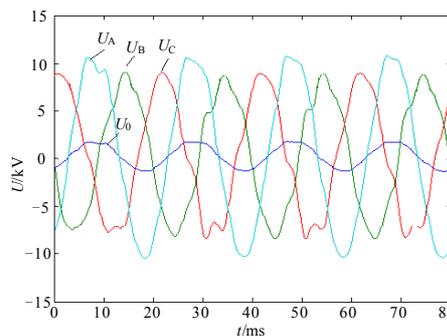


图 7 消弧线圈断线谐振电压波形

Fig.7 Voltage waveform of arc-suppression coil line broken resonant

表 2 电压数据

Tab.2 Voltage data

	电压/kV
A 相电压	7.7
B 相电压	5.6
C 相电压	5.5
零序电压	1.7

断线后系统处于欠补偿, 断线相 A 相电压升高, B、C 相电压降低, 零序电压和 A 相电压同相, 符合分析结果, 验证了辨识方法的正确性。

5 结论

传统选线装置仅依靠零序电压和零序电流启动不能有效辨识虚拟接地, 容易造成误动。本文经过理论研究, 提出了基于零序电压和三相电压综合对比的虚拟接地辨识技术, 该技术通过对比零序电压和三相电压的幅值及相位信息, 能够有效判断 PT 铁磁谐振和消弧线圈断线谐振。通过现场实际运行数据对该方法进行了验证, 表明该方法能够有效区分接地故障和虚拟接地, 提高小电流接地选线装置的动作可靠性, 满足实用要求。

参考文献

[1] 曾祥君, 于永源, 周有庆, 等. 配电网谐振状态与单相接地状态的辨识[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 41-43.

(下转第 150 页 continued on page 150)

$U_{CA} = 86.48 \text{ V}$
 第 2 点: $U_{AB} = 96.51 \text{ V}$ $U_{BC} = 98.02 \text{ V}$
 $U_{CA} = 86.38 \text{ V}$
 第 3 点: $U_{AB} = 96.29 \text{ V}$ $U_{BC} = 97.89 \text{ V}$
 $U_{CA} = 86.06 \text{ V}$

由上述计算结果可知: A、C 异地两相接地短路期间, 110 kV 变电所 35 kV 母线电压高于母差电压闭锁定值 70 V。

根据该变电所 35 kV 母差保护原理图, 母差继电器动作后, 除 35 kV 母联开关外, 其他出线开关均通过低压闭锁回路跳闸。因此在 35 kV II 段母差保护动作后, 只有 35 kV 母联开关可以作用跳闸, 而 35 kV II 段母线其他开关由于电压闭锁未能跳闸。

2.5 35 kV 肇东一变主变两侧开关跳开

肇东一变 A 相接地故障点位于主变高压侧套管与开关之间, 属于差动保护动作区。主变差动保护动作, 两侧开关跳闸后, A 相接地故障点被切除, 系统由 A、C 异地两相接地转变为 35 kV 朝五乙线母线侧 C 相接地。数分钟后, 朝五乙线路名称标示牌彻底脱落, 掉入 35 kV 开关场, 35 kV C 相接地故障点消除, 系统接地消失。

3 结论

此次故障是由 110 kV 变电所 35 kV 母线单相接地引起, 另外两相电压升高造成系统薄弱点肇东一变主变高压侧电缆 A 相绝缘击穿, 形成 A、C 相异地两相接地短路。故障点均在保护动作区内, 110 kV 变电所 35 kV II 段母差保护、35 kV 肇东一变主变差动保护动作正确。35 kV II 段母差保护只跳开母联开关的异常动作行为是由于保护电压闭锁的设计造成。但通过此次事故可以看出:

- 1) 该变电所对运行设备的管理还不到位, 没有及早发现线路名称标示牌脱落事故隐患;
- 2) 下级变电所肇东一变主变高压侧电缆头的施工制作存在质量问题, 当系统发生单相接地、其它两相电压升高时, 造成对地绝缘击穿。

参考文献

[1] 邱关源. 电路[M].四版. 北京: 高等教育出版社, 1999. QIU Guan-yuan. Electrocircuit[M]. Fourth edition. Beijing: Higher Education Press, 1999.

收稿日期: 2009-08-26; 修回日期: 2009-09-23

作者简介:

王力飞 (1980-), 男, 工程师, 硕士, 从事电网继电保护运行管理、整定计算工作。E-mail: wanglfei@cnpcc.com.cn

(上接第 147 页 continued from page 147)

ZENG Xiang-jun, YU Yong-yuan, ZHOU You-qing, et al. On-line distinguishing between resonance and one-phase grounding in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (8): 41-43.

[2] 王亮, 施围, 沙玉洲, 等. 电压互感器三相励磁特性对铁磁谐振的影响[J]. 继电器, 2005, 33 (2): 35-42. WANG Liang, SHI Wei, SHA Yu-zhou, et al. Influence of three phases' excitation characteristics of PT on ferroresonance[J]. Relay, 2005, 33 (2): 35-42.

[3] 刘增良, 李铁玲, 刘国亭. 对电压互感器饱和引起的电位偏移与铁磁谐振的分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (11): 21-23. LIU Zeng-liang, LI Tie-ling, LIU Guo-ting. Voltage shift and ferroresonance caused by voltage transformer saturation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (11): 21-23.

[4] Graovac M, Irvani R, WANG Xiao-lin, et al. Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (1) : 158-163.

[5] 李嗣明, 何婧, 张熙军, 等. 消弧线圈投入后引起系统电压不平衡原因分析及解决办法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (4): 124-128. LI Si-ming, HE Qing, ZHANG Xi-jun, et al. Causing analysis and design solution of system voltage's unbalance when ARC-suppression coil goer line[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (4): 124-128.

[6] 杜永忠, 阎国强, 韩加凌. 自动调谐调匝式消弧线圈阻尼电阻的选取原则分析[J]. 继电器, 2005, 33 (12): 40-43. DU Yong-zhong, YAN Guo-qiang, HAN Jia-ling. Selecting principle analysis of damping resistance for automatic-tuning multi-tap arc-suppression coil[J]. Relay, 2005, 33 (12): 40-43.

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

吴 骏 (1978-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护工作; E-mail: wjjgd@163.com
 卢 刚 (1966-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护工作。