

基于故障过程分析的补偿电网接地与串联谐振辨识

岳云峰¹, 蔡旭²

(1.广东省电力设计研究院, 广东 广州 510000; 2.上海交通大学电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对中压配电网谐振接地系统发生单相接地故障和串联谐振故障引起的零序电压升高现象进行分析, 从故障过程整体的特征入手, 通过定义故障过程各个状态和状态量, 提出了一种基于过程分析的辨识方法, 并编写算法通过仿真数据和实验数据验证, 证明该算法具有很高的识别率和可靠性, 并在现有的故障选线硬件平台上实现。

关键词: 串联谐振; 单相接地; 过程分析; 状态量

Identification of series resonant and grounding fault based on process analysis of zero sequence voltage in the compensation network

YUE Yun-feng¹, CAI Xu²

(1.Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510000,China; 2.Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240,China)

Abstract: Single-phase-to-ground faults and Petersen coil series resonant can make zero sequence voltage rise in the resonant grounding system of distribution network. In this paper, an analysis of this phenomenon is made and an identification method is proposed based on the analysis of the fault process. The algorithm is come up using the state and status of the value of the fault data to conduct identification, and validated by the experimental data and simulation data of EMTP. The results show that the algorithm has a high accuracy and reliability and has been realized on the existing hardware platform.

Key words: series resonant; single-phase-to-ground; process analysis; state of value

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)07-0049-05

0 引言

我国配电系统大部分为经消弧线圈接地或中性点不接地系统, 也称为中性点非有效接地系统或小电流接地系统^[1]。随着生产技术的发展, 对配电网供电的可靠性和安全性要求也随之增高, 在电网中有故障发生时要求能够快速、可靠地检测出故障并且能够在较短时间内切除故障。目前, 对于接地故障选线以及故障定位的研究比较多而且取得了一定的成就^[2-9]。但是, 引发电网零序电压升高的原因有很多, 如何对这类故障进行辨识, 判别故障是否属于接地故障国内外目前没有系统的研究。解决故障辨识问题是进行接地故障选线和消弧线圈控制的前提。

从故障波形的识别角度, 单相接地与串联谐振故障特征相似, 因此无法单纯从稳态量或某一种状态的量进行数值上的辨识。本文对两类故障发展过程进行分析, 发现故障过程存在不同状态, 从而提

出基于状态顺序和状态量的辨识算法, 并通过 ATP 仿真数据和 10 kV 系统模拟网实验数据论证该方法的正确性和可靠性。

1 单相接地与串联谐振对比分析

1.1 零序电压的稳态对比分析

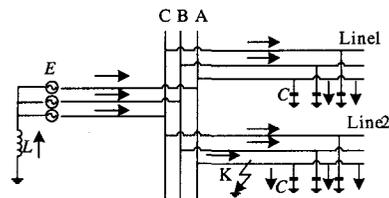


图1 谐振接地系统单相接地故障示意图
Fig.1 Ground fault in the resonance system

如图1所示在谐振接地系统中 A 相发生单相接地故障, 假设系统完全对称, 线路每相对地电容为 C , 接地电阻为 R_g , 消弧线圈电感为 L , 忽略线路对地电阻影响, 接地后零序稳态电压为^[10]:

$$\dot{U}_{0a} = \frac{-\dot{U}_A}{1 + R_g \times [j3\omega C - \frac{1}{\omega L}]} = \frac{-\dot{U}_A}{1 + jR_g^*} \quad (1)$$

式中： $R_g^* = R_g(3\omega C - 1/(\omega L))$ ，设 $\dot{U}_A = U_A \angle 0$ 为参考向量，随着 R_g^* 从 $-\infty \sim +\infty$ 变化， \dot{U}_{0a} 变化轨迹是以 $-U_A$ 为直径的圆，当B相和C相故障时，同理得到B相C相故障时零序电压轨迹如图2所示。

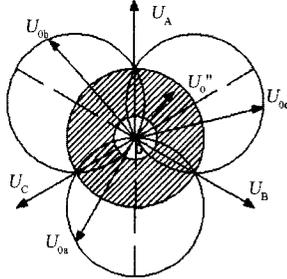


图2 零序电压偏移的轨迹

Fig.3 Vector track of neutral point voltage

在实际谐振系统电网中，三相对地电容互不相等，中性点存在一定数值的不对称电压，消弧线圈投入运行后，三相对地电容与消弧线圈的电感构成谐振回路，零序电压为：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{00}}{\sqrt{\nu^2 + d^2}} \quad (2)$$

其中： \dot{U}_{00} 为不对称电压， d 为电网阻尼率， ν 为消弧线圈补偿度，当电网处于谐振状态时 $\nu \approx 0$ ，不对称电压由线路电容的不对称情况决定，一般为 $0.5\% \sim 1.5\% U_A$ ^[1]， d 一般为 $3\% \sim 7\%$ ^[1]。由公式2得到串联谐振零序电压变化范围 $7\% \sim 50\% U_A$ 。其轨迹是半径从 $7\% \sim 50\% U_A$ 圆环面，如图2所示。

在向量图2中，故障电压低于 $50\% U_A$ 的阴影部分，单相接地和串联谐振零序电压存在相等的可能，所以这部分无法单纯利用零序稳态电压条件进行辨识。

1.2 零序电压的暂态过程分析

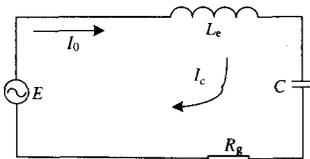


图3 单相接地暂态电流的等值回路

Fig.2 Equal circuit of transient current after single-phase earth faults

单相接地故障暂态等效电路如图3， L_e 三相线路和电源变压器等在零序回路中等值电感；故障暂态自由振荡频率一般较高，所以消弧线圈电感

$L \gg L_e$ ，可以不予考虑，得到单相接地故障零序暂态电压：

$$u = u' + u'' = \quad (3)$$

$$\frac{E}{Z\omega C} \sin(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}) + Ee^{-bt} [\frac{\cos(\varphi - \psi)}{Z\omega C \sin \alpha} \sin(\omega_1 t + \alpha) - \frac{1}{Z\omega_1 C} \sin(\psi - \varphi) \sin(\omega_1 t - \alpha)]$$

式中： u' 是以电源频率 ω 变化的强制分量， u'' 是以 ω_1 振荡的自由分量。

传统的固定补偿消弧线圈通常整定在谐振点附近过补偿运行。线路电容变化引起串联谐振暂态等效电路如图4所示。

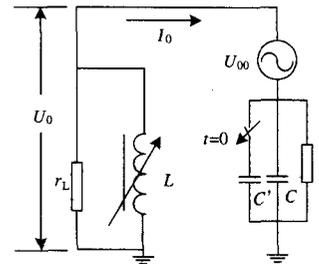


图4 传统消弧线圈串联谐振等值回路

Fig.4 Equal circuit of resonance in series caused by the traditional arc-suppression coil

当切除部分线路引发串联谐振，忽略消弧线圈电感等效电阻 r_L ，零序电压为：

$$u_c = u'_c + u''_c \quad (4)$$

$$u_c = e^{-bt} \frac{\sqrt{\omega^2 u_{c0} + (i_{c0} + b u_{c0})^2}}{\omega} \sin(\omega t - \theta) + \frac{\omega_0^2 E}{\sqrt{4b^2 \omega_1^2 + (\omega_1^2 - \omega_0^2)^2}} \sin(\omega_1 t + \varphi - \psi)$$

式中： i_{c0} 、 u_{c0} 为系统初始状态，串联谐振发生时 $\omega_0 = \omega_1$ ， u'_c 是以电源频率 ω 变化的强制分量， u''_c 是以 ω_1 振荡的自由分量。

综上单相接地故障和固定补偿消弧线圈串联谐振故障都存在电压暂态量，暂态量的大小由接地条件和故障时间有关，所以无法从暂态上进行有效辨识。

自动调谐消弧线圈接地系统中，预调式消弧线圈工作时处于全补偿状态，通过接入阻尼电阻 R 抑制串联谐振。单相接地故障发生后，由控制器发出信号切除阻尼电阻实现对电容电流的最佳补偿。随

调式消弧线圈远离谐振点工作, 单相接地故障发生后消弧线圈被调节到靠近谐振点的状态以实现对电容电流的补偿。接地故障消失后, 预调式消弧线圈的阻尼电阻仍处于切除状态或者随调式消弧线圈仍在谐振点运行, 则导致串联谐振^[11], 这种串联谐振状态与单相接地状态无法用简单的方法辨别。

1.3 零序电压故障过程对比分析

1.3.1 单相接地故障过程

单相接地故障包括: 瞬时接地, 短时接地, 间歇性接地和永久性接地故障。

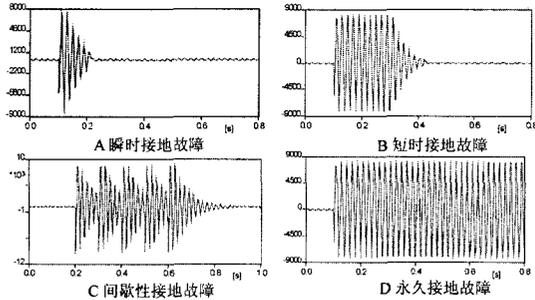


图5 谐振系统单相接地零序电压故障过程比较

Fig.5 Neutral voltage waveform single phase to earth fault

如图5所示, 单相接地故障都是由接地瞬间暂态、接地故障稳态和接地故障消失的过渡态三个状态组合构成。在以上四种单相接地故障过程中, 这三种状态的顺序和时间长度各不相同。

1.3.2 自动调谐消弧线圈串联谐振过程

自动调谐消弧线圈产生串联谐振的原因是接地故障消失后, 消弧线圈仍然处于故障时的工作状态。预调式与随调式消弧线圈的调节方式不同, 但产生串联谐振故障发展过程相同。

在单相接地故障消失后, 零序电压逐渐衰减到零。由于不平衡电压的存在, 消弧线圈电感与线路电容发生串联谐振, 零序电压上升。由于存在消弧线圈从接地时并联谐振到接地消失后串联谐振的过渡, 体现为零序电压先下降后上升, 如图6所示。

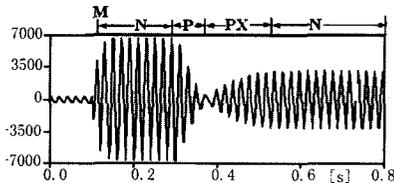


图6 自动谐振系统串联谐振故障零序电压情况

Fig.6 Zero sequence voltage of series resonant fault

1.3.3 固定补偿消弧线圈故障过程

如图7所示, 消弧线圈固定补偿系统串联谐振故障过程与单相接地故障相似。由式(3)与式(4)可以看出, 产生相同零序稳态电压的暂态过程不同, 可

通过对暂态量的区分达到辨识的目的。

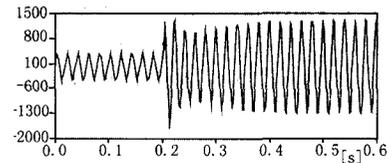


图7 传统谐振系统串联谐振零序电压

Fig.7 Zero sequence voltage of series resonant fault in traditional Petersen coil system

由以上分析可知, 单相接地和串联谐振无法完全单纯依靠某一种状态来实现对两种故障的辨识。两种故障在发展过程不同。即两类故障过程有不同的状态顺序和状态量, 所以通过识别状态顺序和状态量可以实现故障辨识。

2 基于零序电压发展过程的接地和串联谐振故障辨识

2.1 故障发展过程各状态的定义及特征描述

如图6所示, 定义连续三个周波以上有相同变化规律的波形为一个状态, 将故障发展过程分成四种状态:

M:故障暂态。故障发生瞬间, 零序电压幅值突变, 存在大量暂态分量。

N:接地故障稳态。电压幅值变化小, 电压稳定, 有少量谐波存在。

P:故障下降暂稳态。故障结束零序电压向正常状态下过渡, 电压逐渐降低。

PX:故障上升暂稳态。串联谐振形成, 零序电压经过渡过程进入消弧线圈串联谐振状态, 零序电压逐渐升高。

2.2 故障发展过程各状态辨识及状态量提取

2.2.1 M 状态起点确定和状态量提取

单相接地暂态突变点可以用小波分析容易地检测出来^[12]。奇异点检测是小波变换的突出优点。通过小波变换, 每进行一个尺度的小波分解, 就会提取出一个频段的信号分量^[13], 本文采用紧支撑正交小波 Daubechies 提出的阶数为 5 的小波(简称 db5 小波)来检测:

$$W(2^j, 2^j k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{\mathbb{R}} 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k) x(t) dt \quad (5)$$

其中: $\psi(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k)$ 为离散化的小波簇, $x(t)$ 为故障信号。小波尺度 $a=2^j$, 位移 $b=2^j k$ 。计算尺度 3 中最大值 W_M 出现的时刻 t_m 为 M 状态的起始时刻, 定义此时 W_M 为 M 状态的状态量。

2.2.2 N、P、PX 状态起点确定和状态量提取

这三种状态的不同为电压幅值的变化趋势不同。所以可以通过变化率 Δ 的不同来划分三种状态的时间节点，找出 Δ 相同的时间段，即作为一个状态。

用梯形法数值积分计算工频半周期电压均值 S_m ：

$$S_m = \frac{1}{2f_s} \sum_{n=0.01mf_s}^{0.01(m+1)f_s} (|f(x_n)| + |f(x_{n+1})|) \quad (5)$$

其中： f_s 为采样频率， m 为工频周波数。对 $[S_m]$ 再应用三次样条函数中计算节点导数的三转角方程，用自然边界条件计算导数数组 $[S'_m]$ ，所以状态变化率为 $\Delta = S'_m$ ，设定变化率阈值 $S'_0 = S'_n = 0$ δ ：

- 当 $m \geq 3, |\Delta| \leq \delta$ 的时间段 (t_{m0}, t'_{m0}) 为状态 N，
- 当 $m \geq 3, \Delta < -\delta$ 的时间段 (t_{m1}, t'_{m1}) 为状态 P，
- 当 $m \geq 3, \Delta > \delta$ 的时间段 (t_{m2}, t'_{m2}) 为状态 PX。

定义平均变化率 $W_P = \sum \Delta / m$ 为 P 和 PX 状态的状态量，定义 $W_N = S_m$ 为 N 的状态量。

2.3 补偿电网接地与串联谐振辨识方法

首先通过 1.3 节对故障特征的分析建立故障过程特征库如表 1，例如自动消弧线圈串联谐振故障状态顺序描述为：MNPPXN。间歇性接地故障描述为：MPMP...Mn P ($n \geq 1$) 等。

表 1 谐振接地系统接地类故障过程特征表

Tab.1 Process characteristics of ground like fault of resonant grounding system

故障	故障类型	状态顺序特征	状态量辨识条件
串联谐振	固定消弧线圈	M P X N、M PN、MN	$W_N < 27.3, 50 < W_M < 110$
	自动消弧线圈	M N P P X N	—
	单相接地引起故障	M...Mn ($n \geq 1$) P P X N	$W_N < 27.3, 0 < W_M < 10$ 或 $W_N > 27.3$
单相接地	单相瞬间接地	M P	—
	间歇性接地	M P M P...Mn P	—
	单相稳定接地	($n \geq 1$) M N、M N P	$W_N < 27.3, 0 < W_M < 10$ 或 $W_N > 27.3$

注：表中 M...Mn ($n \geq 1$) 表示多个暂态过程。

然后应用故障过程辨识算法对故障数据进行处理，辨识各个状态时间节点和状态量，将各状态按时间节点进行排序，得到故障特征顺序。最后与故障过程状态库进行比较得出故障结论。

固定补偿电网可以进一步通过状态量的比较进行辨识。通过仿真和实验数据得到：固定补偿消弧线圈串联谐振故障和单相高阻接地故障比较，当零

序电压大小落在图 2 的阴影部分时，即稳态状态量 $W_N < 27.3$ ，串联谐振故障的 M 状态的状态量远大于单相接地故障中 M 状态的状态量。比较公式(3)和 (4)发现，固定补偿串联谐振故障是由零序回路电容的突变引起，而单相接地故障零序回路中存在大电阻，所以突变量小于前者。设定固定补偿消弧线圈串联谐振暂态 M 状态量范围 $50 < W_M < 110$ ，单相接地故障暂态 M 状态量范围 $0 < W_M < 10$ 。

3 算例

3.1 自动补偿系统串联谐振故障算例

为验证算法有效性，在上海交通大学高压实验室进行实验，实验用模拟电网由 380 V/10 kV 变压器和六条馈线构成，预调式消弧线圈补偿，电容电流大 35 A，阻尼率 6%。实验采用 4.2 Ω 接地电阻模拟单相接地引起串联谐振，接地时间约 4 s，得到的零序电压如图 8 所示。

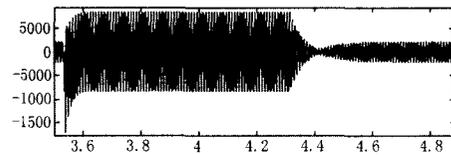


图 8 谐振系统串联谐振实验零序电压波形
Fig.8 Neutral point voltage experimental waveform of series resonant

数据辨识程序得到表 2，故障辨识结果：单相接地故障后串联谐振故障。

表 2 串联谐振实验数据处理结果

Tab.2 Processing results of series resonant experimental data

状态	M	N1	P	PX	N2
状态	$t_M = 3.54$	(3.6,	(4.31,	(4.41,	(4.66, 5)
时间		4.31)	4.41)	4.66)	
状态特征	M N P P X N				
状态量	$W_M = 2000.4$	$W_N = 54.6$	$W_P = -5.18$	$W_{PX} = 0.81$	$W_{N2} = 13.51$

3.2 固定补偿系统串联谐振故障算例

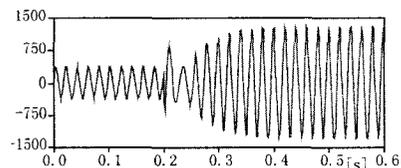


图 9 固定补偿系统串联谐振零序电压仿真波形
Fig.9 Neutral point voltage experimental waveform of series resonant

仿真数据采用上海某变电站线路数据模型, 35/10 kV 变压器, 线路由电缆和架空线混合构成, 共计对地电容电流为 14.43 A, 不对称度为 1.5%, 电网阻尼率 5%, 消弧线圈补偿度为欠补偿 10.84%, 线路电容电流减小引起串联谐振, 零序电压如图 9 所示。

辨识程序得到表 3, 故障辨识结果: 固定补偿串联谐振故障。

表 3 串联谐振仿真数据处理结果

Tab.3 Processing results of series resonant data from simulation

状态	M	N	P	PX
状态时间	$t_m=0.2$	(0.38, 0.6)	-	(0.24, 0.38)
状态特征	M P X N			
状态量	WM=105	WN=8.12	-	WP=0.733

4 结论

本文提出了过程分析的故障辨识方法。通过定义故障发展过程的不同状态及状态量, 计算各状态的起始时刻及其状态量, 建立了单相接地故障与串联谐振故障的特征库, 实现了基于故障发展过程的补偿电网故障辨识, 通过实验数据及仿真数据的验证表明该方法较好地解决了单相接地故障和串联谐振故障的识别诊断问题。该方法已成功应用于小电流接地故障综合诊断系统进行接地故障诊断和选线。

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.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Power System Oscillation Grounding[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] Hänninen S. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks Characteristics, Indication and Location, Thesis[D]. Espoo (Finland): Technical Research Centre of Finland, 2001.
- [3] 蔡旭, 于乐中. 补偿电网增量函数法接地选线原理及应用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1273-1277.
CAI Xu, YU Yue-zhong. Protection and Its Application for Detecting Single Phase Earth Fault Feeder Based on Increment Function Principle in Resonant Grounded Power Distribution System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1273-1277.
- [4] 朱丹, 蔡旭. 小电流接地电网改进能量法接地选线原理[J]. 继电器, 2004, 32(10): 44-48.
ZHU Dan, CAI Xu. Improved Energy Function to Detect the Grounded Line in Neutral Point Indirect Grounded Network[J]. Relay, 2004, 32(10): 44-48.
- [5] 汪家城, 赵加峰, 蔡旭, 等. 基于 DSP 的暂态能量法选线系统[J]. 工业控制计算机, 2005, 18(2): 22-23.
WANG Jia-cheng, ZHAO Jia-feng, CAI Xu, et al. The Fault Line-detection System Based on Transient-energy Theory and Realized by DSP[J]. Industrial Control Computer, 2005, 18(2): 22-23.
- [6] 齐郑, 杨以涵, 林榕. 基于小波变换和维纳滤波技术的小电流接地系统单相接地故障选线研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 23-26.
QI Zheng, YANG Yi-han, LIN Rong. Study on Faulty Line Detection of Single Phase to Ground Fault in Small Current Neutral Grounding System Based on Wavelet Transform and Wiener Filter Technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 23-26.
- [7] 薛永端, 陈羽, 徐丙垠, 等. 利用暂态特征的新型小电流故障检测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 83-87.
XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic Transient Based Monitoring System for Earth Fault in Non-solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 83-87.
- [8] 尚秋峰, 杨以涵, 李士林, 等. Duffing 振子检测信号法用于配电网单相接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 64-68.
SHANG Qiu-feng, YANG Yi-han, LI Shi-lin, et al. Duffing Oscillator Signal Detection Method Applies to the Single-phase to Ground Fault Protection in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 64-68.
- [9] 严凤, 杨奇逊, 奇郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 38-44.
YAN Feng, YANG Qi-xun, QI Zheng, et al. Study on Faulty Location Scheme for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 38-44.
- [10] 蔡旭. 基于偏磁消弧线圈的综合增量法单相接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 68-72.
CAI Xu. Protection for Detecting Single Phase to Ground Fault Feeder Based on Synthesis Increment Principle in Resonant Grounded Power Distribution System with Arc-Suppression With Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 68-72.
- [11] 连鸿波, 谭伟璞, 裴善鹏, 等. 谐振接地电网预随调补偿方式及其实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 79-84.
LIAN Hong-bo, TAN Wei-pu, PEI Shan-peng, et al. Principle and Realization of Presetting and Following-setting Compensation Mode in Resonant Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 79-84.

(下转第 85 页 continued on page 85)

