

文章编号:1671-6833(2005)02-0051-04

谐振接地电网的电容电流自动跟踪测量

连鸿波, 裴善鹏, 曲铁龙, 谭伟璞, 杨以涵

(华北电力大学电气工程学院, 北京 102206)

摘 要:随着系统电容电流的不断增大,越来越多的电网采用谐振接地方式.谐振接地方式有效地抑制了单相接地故障电弧的重燃和弧光过电压的发生,这使得中压电网的运行可靠性得到了很大的提高.谐振接地方式推广的一个重要技术难点是系统电容电流的自动跟踪测量问题.针对这一问题,在对现有的几种自动跟踪测量方法进行分析比较的基础上,提出了一种改进 E_0 法.10kV 高压物理模拟实验表明:该方法可有效识别系统是处于过补偿状态还是欠补偿状态,并可在线实时校正 E_0 法的值.

关键词:谐振接地; 接地电容电流; 自动跟踪; 改进 E_0 法

中图分类号: TM 711; TM 727 **文献标识码:** A

0 引言

我国的 6~66kV 中压电网普遍的采用小电流接地方式,当系统的电容电流超过一定值时,为了更加有效地熄灭电网发生的各种弧光接地故障,通常的办法是对电网加装消弧线圈补偿设备,以补偿接地点的电容电流.因此,中性点有消弧线圈的电网也被称作补偿电网.另外,由于补偿电网中存在电感和电容的配合,因此形成了并联谐振(或电流谐振)和串联谐振(或电压谐振),这两种谐振方式共同构成了谐振接地的基本原理^[1].因此,这样的电网又称为谐振接地电网.在谐振接地系统中,因为补偿后的接地残流很小,可有效抑制单相接地故障电弧的重燃和弧光过电压的发生,这使得中压电网的运行可靠性得到了很大的提高.在实际应用中,由于电网运行方式的每一次改变都将相应地引起电网对地电容电流值的改变,为了保证在任何运行方式下的残流在规程允许范围之内,必须使消弧补偿装置的电感电流对电网电容作跟踪调整,即实现自动跟踪补偿.但是,由于消弧线圈不能自动跟踪调谐或者消弧线圈调谐不当导致事故扩大的事例时有发生,人们越来越希望研制出能够准确、实时地跟踪测量谐振接地电网电容电流的自动跟踪补偿装置,这成了谐振

接地电网运行的重要课题.它的关键点在于在系统正常运行中,准确快速实时地测量出系统对地电容的容抗,据此计算出单相接地电容电流.本文作者介绍了几种测量单相接地电容电流的方法,并提出改进 E_0 (不平衡电压)法的新方案.

1 在线测量单相接地电容电流方法简介

在线测量单相接地电容电流的方法主要用于自动跟踪补偿消弧系统中,其主要特点是利用系统固有的各部件,通过微机采集相应的各电气量数据,计算出系统的单相接地电容电流.目前国内外通常采用的在线监测电容电流的原理有:位移电压原理^[2],调档、调隙、调磁计算原理,相位原理和注入电流原理等.测量的基本原理基本都是利用谐振接地电网在正常运行时是一个串联谐振(或称电压谐振)电路的性质来实现的.由于注入电流原理不是利用系统本身的固有信号,故本文作者暂不介绍这种方法.

1.1 位移电压原理^[2]

通过对谐振接地电网的等值分析,我们可以得到谐振接地系统正常运行时的零序等值网络如图 1 所示.

由于在谐振接地电网中, $U_0 = -E_0 / (\omega - j d)$, 从而 $U_0 = E_0 / \sqrt{ \omega^2 + d^2 }$, 式中 U_0 为中性点电

收稿日期:2005-01-06; 修订日期:2005-03-17
基金项目:华北电力大学博士学位基金(2003 年度)
作者简介:连鸿波(1978-),男,福建省仙游县人,华北电力大学博士研究生,主要从事中压电网的分析与控制方面的研究.

压, E_0 为系统不平衡电压, ν 为系统脱谐度, d 为系统阻尼率.

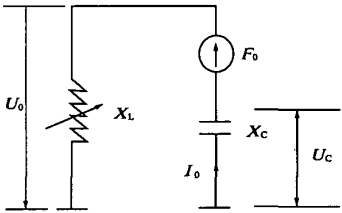


图 1 谐振接地电网零序等值电路图(不带阻尼电阻)
Fig. 1 Equivalent zero sequence circuit of the resonant grounded system (without damping resistor)

当系统中 X_C 、 d 一定时(取 $d=4\%$), 调节消弧线圈 L , 则可得到中性点位移电压 U_0 与谐振电网脱谐度 ν 的关系曲线, 称为位移电压曲线, 见图 2.

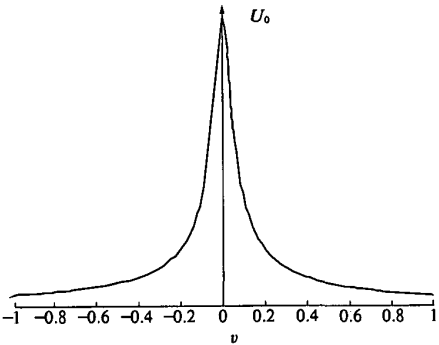


图 2 位移电压曲线
Fig. 2 displacement voltage curve

根据位移电压曲线可知, 当 $\nu=0$ 时, 中性点位移电压 U_0 最高, 消弧线圈感抗等于系统电容容抗, 从而计算出系统的接地电容电流.

这种测量方法的前提是消弧线圈必须串联或并联阻尼电阻. 否则, 谐振时中性点位移电压很高, 将大大超过规程规定的允许值. 在不对称度很低的情况下, 由于谐振点不明显, 会给测量带来很大误差, 且在线测量起来很不方便.

1.2 两点法

这是一种比较常用的方法, 应用时调节消弧线圈至某一档, 测得中性点位移电压 U_{01} , 再调节消弧线圈至相邻档位, 测得中性点位移电压 U_{02} , 假定调档过程中 E_0 不变, 在关联参考方向下, 则有

$$E_0=U_0+U_C \tag{1}$$

若采用标量形式, 则可建立方程组:

$$\begin{cases} Xd_{01}+E_0=U_{01} \\ Xd_{02}+E_0=U_{02} \end{cases} \tag{2}$$

可得 $X_C=(U_{02}-U_{01})/(I_{02}-I_{01})$.

如果消弧线圈提供了为各档位相应的电流值 I_L (以 U_φ 为基准), 则, 上式可以变为

$$I_C=U_\varphi/X_C=(U_{02}I_{L2}-U_{01}I_{L1})/(U_{02}-U_{01}) \tag{3}$$

上面这个方法, 优点是准确度高, 但对于现在普遍采用的自动调匝式消弧线圈来说, 就意味着必须在测量时调节有载分接开关, 开关调节频繁, 减少了开关的使用寿命; 而且测量周期不能很短, 实时性差, 因此当系统接地电容发生变化时, 不能及时发现并实现最佳补偿. 这种方法仅适用于不加阻尼电阻的谐振电网中.

1.3 三点法

在传统的利用位移电压变化检测电容电流的方法中, 忽略了电网阻尼率, 这就使得这种方法的检测精度降低. 对此文献 [4] 提出了相对值三点法, 意在提高两点法的测量精度, 其基本原理如下: 电网正常运行时, 补偿电网中性点位移电压为

$$U_0=E_0/\sqrt{\nu^2+d^2} \tag{4}$$

式中: E_0 为电网自然不平衡电压; d 为补偿电网的阻尼率; ν 为电网脱谐度, $\nu=(I_C-I_L)/I_C=1-I_LX$ (其中: I_C 、 J_L 分别为额定电压下电网电容电流和消弧线圈对应于额定电压下的电感电流, $X=1/I_C$), 故

$$U_0=E_0/\sqrt{d^2+(1-I_LX)^2} \tag{5}$$

调节消弧线圈使之分别工作在 3 个点上, 将相应的电感值和中性点位移电压数值代入式 (5), 即可联立方程组计算出电网单相接地电容电流. 但是这种方法由于测量量较多, 计算复杂, 给本来就是小信号的测量量引入了更多的测量和计算误差, 因此其精度有待验证.

1.4 中性点位移电压(电流)相位角法

对于串联阻尼电阻的气隙可调铁芯式和在线调匝式消弧线圈, 文献 [3] 提出了一种位移电压(电流)相位角法的自动跟踪方法. 和图 1 类似, 可以作出该系统的等值电路图, 如图 3 所示. 根据测量时消弧线圈是否进行调节, 我们又可以分别给出系统零序回路阻抗三角形关系图, 如图 4、图 5 所示.

以下就消弧线圈有调节跟踪和消弧线圈无调节跟踪分别进行讨论

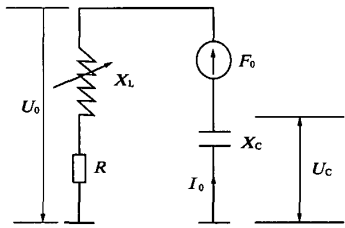


图3 谐振接地电网零序等值电路图(带阻尼电阻)
Fig.3 Equivalent zero sequence circuit of the resonant grounded system (with damping resistor)

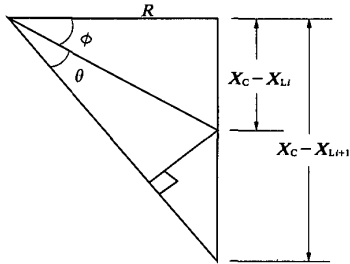


图4 带阻尼电阻时的零序阻抗三角图(调消弧线圈时)
Fig.4 Zero sequence impedance triangle figure with damping resistor (arc suppression coil adjusted)

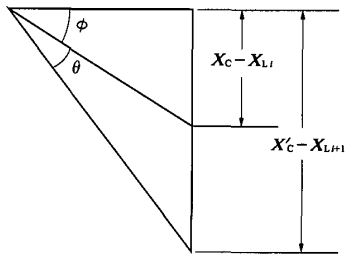


图5 带阻尼电阻时的零序阻抗三角图(不调消弧线圈时)
Fig.5 Zero sequence impedance triangle figure with damping resistor (arc suppression coil non-adjusted)

1.4.1 消弧线圈调档时的测量

设 X_{Li} 、 I_i 是上一档的电抗和电流, X_{Li+1} 、 I_{i+1} 是下一档的数值; θ 为两档下的电流夹角, ϕ 为同档电压和电流的角. 由图4零序阻抗三角图, 可知

$$\operatorname{tg} \phi=\left(Z_{i+1}-Z_i \cos \theta\right) / Z_i \sin \theta,$$

其中, $Z_{i+1}=E_0 / I_{i+1}$, $Z_i=E_0 / I_i$, 可得 $\operatorname{tg} \phi=\left(I_i-I_{i+1} \cos \theta\right) / I_{i+1} \sin \theta$. 也就是说 $\operatorname{tg} \phi$ 可以通过两档电流之间的角得到. 又因为

$$\operatorname{tg} \phi=\left(X_C-X_{L i}\right) / R,$$

$$\operatorname{tg}(\phi-\theta)=\frac{X_C-X_{L i}}{R}=\frac{\operatorname{tg} \phi-\operatorname{tg} \theta}{1+\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \theta},$$

根据以上公式,可推出 X_C :

$$X_C=\frac{\left(X_{L i}-X_{L i+1}\right)\left(\operatorname{tg} \phi-\operatorname{tg} \theta\right)}{\operatorname{tg}\left(1+\operatorname{tg}^2 \phi\right)}+X_{L i} \quad(6)$$

由式(6)可以得到系统的电容电流大小,从而实现消弧线圈的自动跟踪调谐.

1.4.2 消弧线圈不调档时的测量

由图5零序阻抗三角图,可知

$$\left\{\begin{array}{l} \operatorname{tg}(\phi+\theta)=\left(X_C^{\prime}-X_{L i}\right) / R \\ X_C^{\prime}=R \operatorname{tg}(\phi+\theta)+X_{L i} \end{array}\right. \quad(7)$$

θ 为消弧线圈不调时,因系统电容电流的变化引起的两次电流采样值之角.

由 $I_C=U_{\varphi} / X_C^{\prime}$, 可得 I_C , 从而得到系统的电容电流大小,实现消弧线圈的自动跟踪调谐.

2 改进 E_0 法

文献[3]提出了一种利用消弧线圈退出运行时测得的不平衡电压 E_0 来实时跟踪谐振接地电网电容电流的方法,该方法然后每隔一定时间(3s)测量一次 U_{φ} 、 U_0 、 I_0 3个电气量来实时跟踪系统电容电流的变化.这种方法适用于不加阻尼电阻的谐振电网的电容电流自动跟踪测量.而且,测量过程中不需进行调档操作,减少了有载开关操作次数;测量周期短,只要系统对地电容发生变化,在不大于3s时间内,装置可测量出系统的对地电容,并根据测量值调节分接头.

但是该文献提到的 E_0 法由于相量关系不清楚,在实际应用中常常出现很大偏差,对此,我们针对正常运行时补偿度设置在15%左右的消弧线圈[3],提出了改进 E_0 法,该方法基于相量分析,并完全采用标量计算,解决了复杂的相位计算带来的误差,而且由于脱谐度较小,各个变量相对较大,减小了测量上的误差.目前,我们已经完成自动跟踪检测装置的研制开发,该装置和消弧线圈的调节控制以及自动选线功能组合成一体,装置引入各线路的零序电容电流、消弧线圈回路的电感电流、零序电压和系统三相线电压,实现了对消弧线圈补偿的完全控制.

采用关联参考方向,并标记 E_0 、 U_0 、 U_C 、 I_0 分别为 E_0 、 U_0 、 U_C 、 I_0 的模值.

由图6相量关系图,有

$$E_0=U_0+U_C,$$

他们之间的相量关系如图6所示.可以建立标量形式的跟踪方程: $U_C=U_0+E_0$; 即 $I_0 / (\omega C)=U_0+E_0$, 从而有

$$I_C=U_{\varphi} / X_C=\omega C U_{\varphi}=U I_0 /\left(U_0+E_0\right) \quad(8)$$

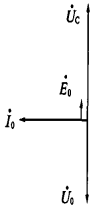


图 6 谐振电网等值串联回路相量关系图
Fig.6 Phase relationship of the equivalent serial circuit in the resonant grounded system

通过式(8)中完全的标量计算式,我们可以非常方便地对系统的电容电流进行实时有效的跟踪.

在消弧线圈的运行中,由于系统时刻都在不断变化中,系统不平衡度也是不断变化的,这两者的变化都可能导致中性点电压的变化,即 $U_0 = f(E_0, \psi)$, 其中,不平衡电压又是由于系统电容容抗的变化导致的,也就是说,系统总电容容抗的变化,将导致中性点不平衡电压、系统脱谐度和中性点电压产生相应的变化.文献[3]中提出的 E_0 法假定不平衡 E_0 不变,但事实上, E_0 会因系统总电容容抗的变化而变化,因此,必须对 E_0 值进行校正,使之与电网的变化同步,如此方能客观准确地反应系统的总电容容抗值.式(2)中两点法可以计算出系统的不平衡电压 E_0 , 而由改进 E_0 法我们也可以根据消弧线圈两端的电压值以及由 E_0 法系统电容容抗的测量值计算出当前的脱谐度,得到当前系统的不平衡电压值,这两者可以根据不同的情况用来校正 E_0 法中的 E_0 . 同时根据这个不平衡电压值和消弧线圈调谐的第一原则即中性点电压不得超过相电压的 15% 这样一个原则,

可以定出应有的脱谐度 $\nu \geq E_0 / (0.15U_\phi)$, 从而根据这个脱谐度要求调整消弧线圈到指定位置.

华北电力大学的 10kV 高压物理模拟实验室的测试表明,这种改进 E_0 法很好地解决了谐振接地电网的电容电流的自动跟踪问题,从而实现了对消弧线圈补偿的完全控制.

3 结束语

本文简要介绍了目前测量谐振接地电网电容电流的几种常用方法,针对不加阻尼电阻的消弧线圈运行方式,首次提出了改进 E_0 法,该方法可有效识别系统是处于过补偿状态还是欠补偿状态,同时可以在线实时地校正 E_0 法的值,真正做到了实时跟踪,10kV 高压物理模拟试验系统表明,这种方法非常有效.我们研制的自动调谐消弧线圈样机及其控制设备即将挂网运行,最终达到实用化的目的.

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] 李润先.中压电网系统接地实用技术[M].北京:中国电力出版社,2000.
[3] 唐艳波,孔令赞.10~35kV 电网单相接地电容电流测量方法研究[J].山东电力技术,1999,26(3):28~31.
[4] 蔡旭,刘杰.偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J].电力系统及其自动化,2002,15(1):53~56.
[5] LIAN Hong-bo, YANG Yi-han, ZHU Xu-kai, et al. Research on the Compensation Mode and New Principal auxiliary Arc suppression Coil in the Resonant Grounded System[R].Singapore:Power Conference, 2004.

Automatic Tracing of Grounding Capacitance Current in Resonance Grounding Power Systems

LIAN Hong-bo, PEI Shan-peng, QU Yi-long, TAN Wei-pu, YANG Yi-han

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the increase of grounding capacitance of the power system, more and more MV systems become resonant grounded systems to suppress grounded arcs more effectively. The installation of arc suppression coil could greatly increase the reliability of MV power system. It is a key technology to follow up quickly with the change of grounding capacitance currents in the MV power systems. To solve this problem, this paper first proposes several automatic following methods used now. And at the same time a new method, called improved E_0 method, is proposed in this paper, which can follow up the variety of network and get self revised. Results acquired in the 10kV physical simulation system are good.

Key words: resonance grounding; grounding capacitance current; automatic follow; improved E_0 method