中性点位移电压在谐振接地电网中的应用

为解决谐振接地电网在运行时出现的跟踪失灵、调谐过多、补偿和接地故障不相匹配而造成残流过大等问题，提出了利用中性点位移电压的检测、分析和计算来解决问题的新思路。首先，对中性点位移电压的特性进行了分析，然后将其应用在跟踪灵敏度定值的计算上，有效解决了跟踪失灵、调谐过多的问题；接着，利用中性点位移电压变化量的特点，可以将运行方式改变和系统扰动区分开来；最后，计算得到高阻接地与低阻接地对应的中性点位移电压取值范围，由此可将这两种故障形式显著地区分开来，从而实现了消弧线圈的智能补偿。仿真和实验室高压模拟试验验证了上述结论，有效地解决了谐振电网运行中出现的相关问题。

陈忠仁　何业军　黄　健／中山职业技术学院机电工程学院

陈忠仁／副教授

关键词／Keywords
中性点位移电压·
谐振接地电网·
应用研究·
跟踪·
调谐·

配电网在中性点接入消弧线圈之后即成为谐振接地电网。消弧线圈的接入使得配电网出现了一些新的特征，如在消弧线圈接入之前，中性点位移电压为系统的自然不对称电压，在接入消弧线圈之后，升高为中性点位移电压。电网运行方式的变化、单相接地故障的不同情况都能反应到中性点位移电压的数值变化之上，因此对中性点位移电压进行测量、分析和判断具有重要的现实意义。目前，自动消弧线圈运行中常常出现的跟踪失灵、调谐过多、补偿和接地故障不相匹配而造成残流过大等问题，均可从分析和应用中性点位移电压入手加以解决[1-3]。

中性点位移电压的测量、分析与计算

中性点位移电压的测量通常通过装设在中性点的TV将电压信号引入计算机测控系统，经信号调理和A－D转换得到。谐振接地电网如图1所示。在电网正常时，系统的零序等效回路为串联谐振电路，如图2所示，$3r$为三相线路对地的总绝缘电阻，$3C$为三相对地总电容，r_L为消弧线圈绕组导线电阻，L为消弧线圈的电感，电源由不对称电压U_{bd}提供[4]。

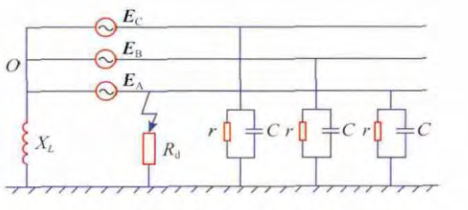

图1　谐振接地电网

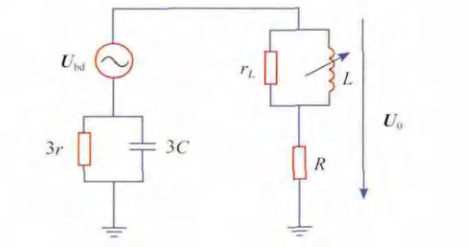

图2　电网正常时的零序等效电路

由图2可得

$$U_0=\frac{Y_C}{Y_C+Y_L}U_{bd}=\frac{j\omega 3C}{\frac{1}{R'}+j\omega 3C-j\frac{1}{\omega L}}U_{bd}$$

$$=\frac{1}{\frac{\omega 3C-\frac{1}{\omega L}}{\omega 3C}-j\frac{1}{R'\omega 3C}}U_{bd}$$

$$=\frac{U_{bd}}{\frac{I_C-I_L}{I_C}-j\frac{I_{R'}}{I_C}}=\frac{U_{bd}}{v-jd}$$

$$U_0=\frac{U_{bd}}{\sqrt{v^2+d^2}}=\frac{K_cE}{\sqrt{v^2+d^2}} \quad (1)$$

式中，R'为零序回路中的总电阻；K_c、v和d分别为电网的不对称度、脱谐度和阻

中山市科技计划项目（20123A346）。

中国知网 https://www.cnki.net

尼率。由式（1）可知，在电网已定（U_{bd}已定）的情况下，中性点位移电压随脱谐度和阻尼率的增加而减少。在系统运行方式发生改变，即线路发生增减的情况下，不对称度K_c发生增减，中性点位移电压亦将随之发生增减。

中性点位移电压在谐振电网的应用

1. 中性点位移电压在跟踪灵敏度中的应用

能够自动跟踪是自动消弧装置相对于老式消弧线圈最主要的进步，也是实现智能补偿的前提条件。在电网运行方式发生改变（线路发生投切）时，电容电流也发生了改变，此时如果消弧线圈还停留在原来的位置，则接地后的残流就会显著变大，不利于熄弧。因此在运行方式发生改变后需要及时的跟踪。对电网进行自动跟踪，有两种方式：①根据中性点位移电压的变化。②根据相位角的变化。后者需要引入参考的相电压，且相位的检测增加了硬件电路，对于一个实际电网，即使电容电流不变，相位角也会发生很大变化，这就给调谐带来误差，故跟踪的准确性较差[1]。而前者不需增加硬件，可以直接测得，作为自动跟踪判断的依据可以有很好的准确度，故多数自动调谐消弧线圈厂家都选用此种跟踪方式。由式（1），忽略电网的阻尼率，可得

$$U_{01}=\frac{U_{un}}{v_1} \tag{2}$$

$$U_{02}=\frac{U_{un}}{v_2} \tag{3}$$

$$\Delta U_0=U_{01}-U_{02}=\frac{U_{un}\Delta v}{v_1v_2}\approx\frac{U_{un}\Delta v}{v_1^2}=\frac{K_cE\Delta v}{v_1^2} \tag{4}$$

$$\Delta v=v_1-v_2=\frac{I_{C1}-I_L}{I_{C1}}-\frac{I_{C2}-I_L}{I_{C2}}\approx\frac{\Delta I_C}{I_{C1}} \tag{5}$$

式中，U_{01}、U_{02}、v_1和v_2分别为运行方式变化前后的中性点位移电压和脱谐度；I_{C1}、I_{C2}分别为运行方式变化前后的系统电容电流；I_L为补偿电流。

灵敏度的取舍要适当，既能有效地跟踪，又不能频繁地动作。设电容电流变化1 A进行跟踪，电网的不对称度K_c一般为0.2%～1.5%，对于10 kV系统，K_cE=12～90 V，v_1=－5%～－10%，根据式（4），对不同容量的消弧线圈的灵敏度的计算如下：①30 A。$\Delta v\approx\Delta I_C/I_C$=1/30，$\Delta U_0$=40～1 200 V。②50 A。$\Delta v\approx\Delta I_C/I_C$=1/50，$\Delta U_0$=24～720 V。③70 A。$\Delta v\approx\Delta I_C/I_C$=1/70，$\Delta U_0$=18～514 V。④90 A。$\Delta v\approx\Delta I_C/I_C$=1/90，$\Delta U_0$=13～400 V。

为了保证足够的灵敏度，以上计算取下限值，但不能比下限值更小，以避免灵敏度过高，装置频繁地调感。由上面的计算数据得到如表1所示的数据。

表1 不同容量消弧线圈的灵敏度选取

消弧线圈容量/A	30	50	70	90
跟踪灵敏度ΔU_0/V	40	24	18	13

其他容量和电压等级的消弧装置的灵敏度可参照上面的计算得到。对于10 kV电网，电容电流变化1 A，切合的线路约有40 km，而对于35 kV的电网，切合的线路约有10 km；选取电容电流变化1 A进行跟踪，灵敏度比较适中，装置既不会频繁地调感，又能够有效地跟踪系统运行方式的变化，经模拟试验和现场运行证明是可行的，也比较符合运行的实际。

2. 中性点位移电压在判别系统扰动时的应用

在实际运行的电网中，除了运行方式的改变会引起中性点位移电压变化外，扰动同样会引起中性点位移电压变化。电网中的扰动是经常遇到和大量存在的，如果将扰动引起的中性点位移电压变化误判为系统运行方式发生了改变，调感跟踪的次数就将大大增加，这对消弧装置和电网的运行都十分不利[5, 6]。因此必须对扰动进行判断，并在确认后闭锁消弧线圈。

假设在某一时刻t_0检测到的位移电压为U_{00}，在$t_0+1\times\Delta t$时间检测到的中性点位移电压为U_{01}（Δt一般设置为若干个工频周期），在$t_0+2\times\Delta t$时间检测到的中性点位移电压为U_{02}，依次类推，在$t_0+N\times\Delta t$时间检测到的中性点位移电压为U_{0N}。设置N为合适的数值（N过大响应慢，过小则有误判），则有

$$\Delta U_{01}=U_{01}-U_{00}$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{aligned}\Delta U_{02} &= U_{02} - U_{00}\\ &\vdots\\ \Delta U_{0N} &= U_{0N} - U_{00}\end{aligned} \tag{6}$$

若$\Delta U_{01} \approx \Delta U_{02} \approx \cdots \approx \Delta U_{0N}$，即中性点位移电压的变化量是稳定的，判断为运行方式改变；否则，判断系统处于扰动状态。

3. 中性点位移电压在区分低阻接地、高阻接地故障时的应用

当发生单相接地故障时，在接地点有一过渡电阻R_d存在，可根据过渡电阻R_d的大小将接地故障分为金属性接地、低阻接地和高阻接地。R_d在1～100 kΩ时认为是高阻接地，R_d在1 kΩ以下时认为是低阻接地；R_d为0 Ω时认为是金属性接地，金属性接地可视为特殊的低阻接地。单相接地时的零序等效回路如图3所示，当某一相接地（对应开关DL闭合）时，将一定数值的过渡电阻R_d接入[4]。

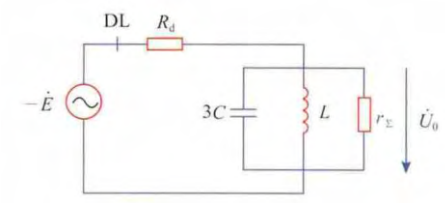

图3 单相接地零序等效回路

设接地故障时，过渡电阻R_d=1 kΩ，系统电容电流I_C=50 A，考虑到阻尼率最大的情况d=10%。E为10 kV系统的标准相电压（5 774 V），首先计算得到系统对地泄露电阻

$$r_\Sigma = \frac{E}{dI_C} = 1\ 154.8\ \Omega \tag{7}$$

消弧线圈一般处于全补偿状态（或接近于全补偿状态），$\omega L \approx \dfrac{1}{3\omega C}$，则相电压在过渡电阻$R_d$与泄露电阻$r_\Sigma$之间进行分压，计算此时的中性点位移电压为

$$U_{0LT} = \frac{Er_\Sigma}{R_d + r_\Sigma} = 3\,094.4\ \text{V} \tag{8}$$

在阻尼率d<10%的情况下，高阻接地（R_d=1 kΩ）的中性点位移电压$U_0 > U_{0LT}$，因此U_{0LT}可作为系统电容电流为50 A时区分低阻接地和高阻接地的中性点位移电压定值。系统电容电流不同，计算得到中性点位移电压定值亦不同。再计算R_d=100 kΩ的情况，即

$$U'_{0LT} = \frac{Er_\Sigma}{R_d + r_\Sigma} = 65.9\ \text{V} \tag{9}$$

由此可见，过渡电阻越高，则接地时的中性点位移电压越低。当过渡电阻$R_d \to \infty$时，即相当于故障点恢复绝缘，单相接地解除，则中性点位移电压$U_0 \to U_{bd}$（系统自然不对称电压）。这和中压配电网的实际运行情况相符。

表2为最大阻尼率（d=10%）下不同谐振电网（电容电流不同）发生高阻或低阻接地所得中性点位移电压的取值范围。自动消弧线圈可将此表中的数据作为判断发生高阻接地或低阻接地的主要依据。这是实现智能补偿的基础。

表2 不同谐振电网发生低阻接地或高阻接地的中性点位移电压取值范围

序号	系统电容电流/A	低阻接地中性点位移电压取值范围/V	高阻接地中性点位移电压取值范围/V
1	50	>3 094.4	860～3 094.4
2	100	>2 113.5	860～2 113.5
3	150	>1 604.9	860～1 604.9

仿真和试验

为了验证上述结论，利用Matlab/Simulink软件进行了仿真。在搭建了电容电流为50 A的谐振接地系统的仿真模型之后，分别进行了金属性接地和高阻接地的仿真。在t=0.04 s时闭合接地故障开关，得到中性点位移电压波形分别如图4、图5所示。

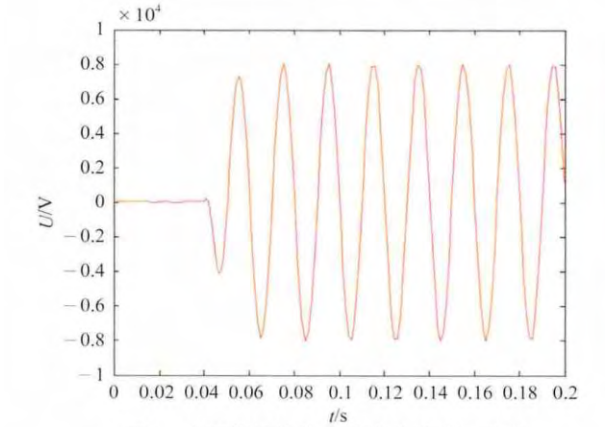

图4 金属性接地的中性点位移电压波形

中国知网 https://www.cnki.net

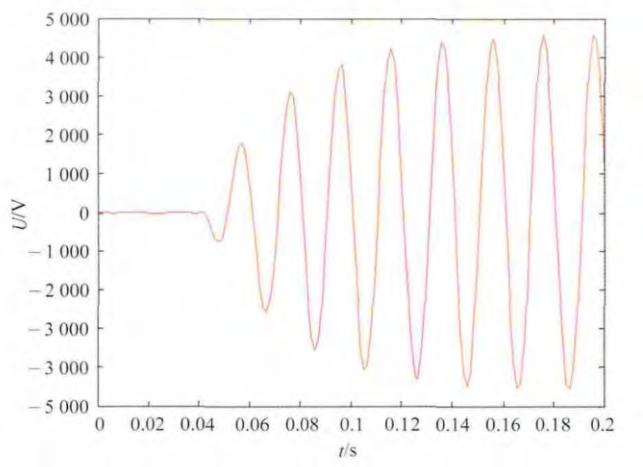

图5　高阻接地的中性点位移电压波形

仿真得到金属性接地的中性点位移电压为5 707 V，约等于系统标准相电压，这和实际运行情况相符。仿真得到高阻接地（R_d=1 kΩ）的中性电压为3 092.3 V，非常接近于式（8）的计算值。当增加过渡电阻使R_d=2 kΩ时，中性点位移电压下降为2 150.8 V，说明随着过渡电阻的增大，中性点位移电压有下降的趋势。仿真验证了以上计算的正确性，说明自动消弧线圈能够通过对中性点位移电压的检测和判断，正确地识别出低阻和高阻接地故障。

在实验室用调压器、升压变压器和高压电容器建立了等效的模拟电网，以电容器（集中参数）模拟线路分布电容，用升压变压器升压到10 kV的额定电压，进行跟踪和扰动试验，试验结果如表3所示。可见，通过对中性点位移电压的检测和判断，能够将正常中性点位移电压波动、运行方式改变和扰动准确地区分出来，并采取相应的动作。

表3　跟踪和扰动试验数据（灵敏度设定24 V）

序号	ΔU_{01}/V	ΔU_{02}/V	ΔU_{03}/V	ΔU_{04}/V	ΔU_{05}/V	判断与处理
1	10	8	7	11	12	正常中性点位移电压波动，闭锁
2	61	65	58	55	59	运行方式改变，跟踪调谐
3	320	1 532	270	2 641	628	扰动、闭锁
4	693	2 529	547	1 982	489	扰动、闭锁

结束语

本文在对中性点位移电压进行了推导和计算，并将其应用在谐振电网中可以得到以下结论：①由中性点位移电压的变化可以计算出跟踪的灵敏度，能够使消弧线圈得到合理有效的调谐，解决了跟踪失灵、调谐过多的问题。②根据中性点位移电压的变化量的特点，可以将系统扰动和运行方式改变准确地区分开来。③根据过渡电阻的不同计算得到低阻接地和高阻接地中性点位移电压取值范围，由此可以将低阻接地、高阻接地区分开来，从而实现消弧线圈的智能补偿。并进行了Matlab/Simulink仿真和实验室高压模拟试验，验证了以上结论。

参考文献

[1] 陈忠仁，吴维宁，陈家宏，等．自动调谐式消弧线圈测量跟踪问题的研究［J］．继电器，2004，32（18）：24-28.

[2] 李晓波，王崇林．零残流消弧线圈综述［J］．电力自动化设备，2011，31（6）：116-121.

[3] 曲轶龙，董一脉，谭伟璞，等．基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究［J］．继电器，2007，35（3）：29-33.

[4] 要焕年，曹梅月．电力系统谐振接地［M］．北京：中国电力出版社，2001.

[5] 陈忠仁，吴维宁，张勤，等．调匝式消弧线圈自动调谐新方法［J］．电力系统自动化，2005，29（24）：75-78.

[6] 蔡旭，刘勇，胡春强，等．新型偏磁式谐振接地与保护［J］．中国电机工程学报，2004，24（6）：44-49.

（收稿日期：2014－03－13）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网　https://www.cnki.net