

对地电容计算方法的仿真分析

柯远青, 陆 达, 唐 琦

(厦门大学计算机科学系 福建 厦门 361005)

摘要】 本文介绍了位移电压法计算对地电容的原理。利用 Matlab 仿真平台, 建立了中性点经消弧线圈接地的电网模型。在此模型基础上针对位移电压法的准确性进行了仿真实验。仿真结果表明利用位移电压法能够准确地计算出对地电容, 相对误差控制在 1% 以内。

关键词】 消弧线圈, 谐振接地, 对地电容, 仿真, Matlab

在我国, 10~66kV 的电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式。中性点经消弧线圈接地方式的特点是线路发生单相接地故障时, 可不立即跳闸, 按规程规定, 电网能带故障运行 2 个小时。

消弧线圈是一种铁心带有空气间隙的可调电感线圈, 其伏安特性是接近线性的, 它装设于配电网中性点。当发生单相接地时, 可形成与接地电流大小接近但方向相反的感性电流, 以补偿接地电流, 从而使接地处的电流变得很小或接近于零。当残流过零熄弧后, 消弧线圈还可减小故障相电压的恢复速度从而减小电弧重燃的可能性。

因此准确计算出对地电容或者对地电容电流是自调消弧线圈控制系统的关键。目前电容电流的间接测量方法主要包括: 位移电压法, 三点法, 注入信号法等。下文将着重介绍位移电压法。

1. 位移电压法

中性点位移电压大小为:

$$U_N = \frac{U_0}{\sqrt{v^2 + d^2}} \tag{1}$$

U_0 : 中性点未加消弧线圈时电网的自然不平衡电压

v : 电网脱谐度

d : 电网阻抗率

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{U_0 \omega C_{all} - \frac{U_0}{\omega L}}{U_0 \omega C_{all}} = \frac{\omega C_{all} - \frac{1}{\omega L}}{\omega C_{all}} \tag{2}$$

I_C : 对地电容电流

I_L : 电感电流

C_{all} : 对地总电容

L : 电感

当 $v \gg d$ 时, 将(2)代入(1)中, 得

$$U_N = \frac{U_0 \omega C_{all}}{\omega C_{all} - \frac{1}{\omega L}} \tag{3}$$

补偿系统中性点位移电压随着脱谐度的变化而变化, 所以在远离谐振点处, 当消弧线圈电感值为 L_1 时, 测得中性点位移电压 U_{N1} , 代入公式(3), 得

$$U_{N1} = \frac{U_0 \omega C_{all}}{\omega C_{all} - \frac{1}{\omega L_1}} \tag{4}$$

调整电感, 使其电感值为 L_2 时, 测得中性点位移电压 U_{N2} , 代入公式(3), 得

$$U_{N2} = \frac{U_0 \omega C_{all}}{\omega C_{all} - \frac{1}{\omega L_2}} \tag{5}$$

将公式(4)除以(5), 可得

$$C_{all} = \frac{\frac{U_{N1}}{U_{N2}} \omega L_1 - \frac{1}{\omega L_2}}{\omega \left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}} - 1 \right)} \tag{6}$$

可以利用上述原理实时计算电网对地电容, 以保证在发生单相接地故障时, 消弧线圈能起到理想的补偿和消弧作用。下文将给出一个谐振接地系统的仿真模型, 并对此计算方法进行验证。

2. 系统建模与仿真

2.1 仿真工具介绍

本文仿真采用的是 Matlab/Simulink 仿真软件。Matlab 提供的电力系统工具箱 (Power System Blockset), 是专用于 RLC 电路, 电力电子电路, 电机转动控制系统和电力系统仿真的模型库。模型库中包含了各种交直流电源, 大量电气元件和电工测量仪表等, 可以利用各种元件很方便地建立自己所需要的仿真对象。

2.2 消弧线圈的模型

本文研究的是中性点经消弧线圈接地的电力系统, 首先要建立消弧线圈的模型。但是电力系统工具箱没有提供消弧线圈这样的电器元件, 因此只能把消弧线圈简化为电感线圈, 电感值可以通过修改参数来确定。

2.3 接地点的建模

为了仿真单相接地的情况, 需要对接地点进行建模。这里采用的方法是将某一相通过 Breaker 模块与地连接, 该模型如图 1。当发生接地故障时, 这个 Breaker 模块就会变成连通状态, 使得该相发生单相接地。接地发生的时间通过 Breaker 模块内部参数 Switching times 来设定。



图 1 接地点模型

2.4 系统集成后的模型

本文采用的谐振接地系统在 Matlab 仿真平台下的模型如图 2 所示,

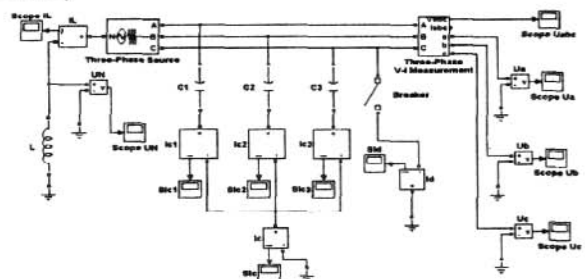


图 2 谐振接地系统模型

该模型中包含的模块有: 三相电源(Three-Phase Source), 三相电压电流测量(Three-Phase V-I Measurement), 电压测量模块, 电流测量模块, 示波器, 断路器(Breaker), 电容器, 电感线圈, 接地。

电流测量模块有: $I_L, I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_c, I_d$ 。

电压测量模块有: U_N, U_a, U_b, U_c 。

示波器有: Scope IL, Scope UN, Scope Uabc, Scope Ua, Scope

Ub, Scope Uc, S1c1, S1c2, S1c3, S1c, S1d.

电容器有: C1, C2, C3.

电感线圈为 L.

一些主要模块的作用: UN 用来测量中性点位移电压, IL 用来测量电感电流, Ic 用来测量对地电容电流, Id 用来测量残流.

3. 仿真实例

为了验证位移电压法测量对地电容的准确性, 我们利用该仿真模型, 对其进行仿真分析.

3.1 仿真参数设置

我们采用 220V 的相电压来进行仿真。由于对地电容是在电网正常运行时测量, 所以在测量对地电容的过程中, 模型中的断路器 (Breaker) 都是断开状态, 也就是说不让它发生单相接地故障。

三组电容器参数为: $C_1=5.1 \mu F$, $C_2=5.0 \mu F$, $C_3=5.0 \mu F$

采用 ode15s(Stiff / NDF) 算法, 仿真时间为 0.2 s.

3.2 仿真步骤

调节消弧线圈的电感 L 的值分别为 1.2H, 1.1H, 1.0H, 0.9H, 0.8H (其中 1.2H 远离谐振点处, 0.8H 靠近谐振点处, 且都处于欠补偿状态), 并将该 L 值作用下的中性点位移电压 UN 记录下来。将不同项两两取值代入公式 (6), 算出 C_{dl} , 记录在表中

同样地, 调节消弧线圈的电感 L 的值分别为 0.5H, 0.4H, 0.3H, 0.2H, 0.1H (其中 0.1H 远离谐振点处, 0.5H 靠近谐振点处, 且都处于过补偿状态), 做法与上述相同。

3.3 仿真结果分析

当电感取不同值时, 测得的中性点位移电压如表 1 所示, 电感 L 值 (μF) 中性点位移电压 UN (V)

电感 L 值 (μF)	中性点位移电压 UN (V)
1.2	3.304800
1.1	3.735574
1.0	4.428081
0.9	5.725463
0.8	9.034344
0.5	4.258849
0.4	2.150253
0.3	1.177987
0.2	0.618638
0.1	0.255254

表 1 不同电感值所对应的中性点电压

由于 $L=0.671H$ 是谐振点, 因此当 L 的取值越偏离谐振点时, 中性点位移电压就会越小。表 1 中的数据准确地体现了这一特性。利用已经测得的中性点位移电压, 就可以代入公式 (6) 来计算对地电容值了。

在欠补偿状态下, 即 0.8H-1.2H 之间, 将不同项两两取值代入公式 (6), 算出 C_{dl} , 结果如表 2 所示

	对地总电容 (C_{dl}) 单位: μF			
	L1=0.8H	L1=0.9H	L1=1.0H	L1=1.1H
L2=1.2H	15.10023	15.10036	15.10039	1.509976
L2=1.1H	15.10027	15.10050	15.10079	
L2=1.0H	15.10019	15.10034		
L2=0.9H	15.10014			

表 2 欠补偿处的点计算出的对地电容

由于 C_{dl} 的理论值是 $15.1 \mu F$, 由表 2 的数据可得相对误差最大为 0.00253%, 满足要求。

在过补偿状态下, 即 0.1H-0.5H 之间, 将不同项两两取值代入公式 (6), 算出 C_{dl} , 结果如表 3 所示

	对地总电容 (C_{dl}) 单位: μF			
	L1=0.1H	L1=0.2H	L1=0.3H	L1=0.4H
L2=0.5H	15.09636	15.09851	15.09880	1.509809
L2=0.4H	15.09442	15.09909	15.10032	
L2=0.3H	15.08821	15.09695		
L2=0.2H	15.07476			

表 3 过补偿处的点计算出的对地电容

由表 3 数据可得相对误差最大为 0.16715%, 满足要求。可见, 利用位移电压法, 可以准确地计算出对地电容。

注意: 在利用公式 (6) 计算对地电容时, 所取的两个 L 值必须是同为欠补偿处的值, 或是都为过补偿处的值, 因为欠补偿处与过补偿处的电气特性是不同的, 如果在欠补偿处取一点, 在过补偿处取另一点, 那么算出的结果是错误的。例如, 取 $L_1=0.8H$ (欠补偿处的点), $L_2=0.5H$ (过补偿处的点), 代入公式 (6), 计算得到的对地电容值 $C_{dl}=5.88818 \mu F$; 取 $L_1=1H$ (欠补偿处的点), $L_2=0.4H$ (过补偿处的点), 代入公式 (6), 计算得到的对地电容值 $C_{dl}=4.21485 \mu F$ 。显然, 这两个对地电容值都是错的。

4. 误差分析

现在我们来研究如何取值能够使误差最小。同样的, 我们调节电感 L, 使其分别为 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1H 时, 测得对地电容, 结果如表 4,

	L1=10H	绝对误差
	对地电容 (μF)	
L2=9H	15.07664	0.02336
L2=8H	15.08372	0.01638
L2=7H	15.08455	0.01545
L2=6H	15.09758	0.00242
L2=5H	15.09145	0.00855
L2=4H	15.09349	0.00651
L2=3H	15.09525	0.00475
L2=2H	15.09948	0.00052
L2=1H	15.10086	0.00086

表 4 不同电感值下计算的的对地电容

从表 4 得到的数据来看, 在不发生串联谐振的情况下, 当 L 的取值靠近谐振点时, 计算出的对地电容值越接近于准确值, 其绝对误差在数量级上体现了一个逐步减小的趋势, 误差在 0.00052-0.02336 μF 之间。因此, 在保证不发生串联谐振且中性点电压不超过相电压的 15% 的情况下, L 的值得越靠近谐振点, 计算出的对地电容值越接近于准确值, 误差越小。

实验证明, 通过位移电压法计算对地电容, 可以将相对误差控制在 1% 以内。因此, 我们可以将该方法计算得到的数值当作是实际的对地电容。

5. 结论

消弧线圈的控制依据以故障时的线路对地电容为准, 所以控制系统要求在线实时计算对地电容。位移电压法是对地电容计算方法的一种。本文对该方法进行了仿真实验。仿真结果表明, 该方法计算出的对地电容结果准确, 相对误差控制在 1% 以内, 满足电力系统的要求。因此可以利用位移电压法准确地实时计算电网对地电容值, 并以此调节自动调谐电抗器的励磁电流, 以达到快速补偿的目的。

参考文献:

1. 曹梅月. 电力系统谐振接地. 北京: 中国电力出版社, 2000.
2. 吴天明, 谢小竹, 彭彬. MATLAB 电力系统设计与分析. 北京: 国防工业出版社, 2004.
3. 洪乃刚等. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真. 北京: 机械工业出版社, 2006.
4. 贾雅君, 蔡旭. 偏磁式消弧线圈自动调谐新原理及应用. 继电器, 2004, 32(10): 1-5.
5. 陈亚, 任建文. 不同接地方式配电系统的单相接地故障仿真分析. 继电器, 2005, 33(5): 67-71.
6. 贾清泉, 简道深, 袁石文. 基于 Matlab 的一种新型消弧线圈的仿真. 继电器, 2006, 34(16): 49-53.
7. 蔡旭日, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 53-56.
8. 陈忠仁, 吴维宁, 张勤等. 调匝式消弧线圈自动调谐新方法. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 75-78.