

# 位移电压法的改进与仿真分析

柯远青, 陆 达, 唐 琦

(厦门大学计算机科学系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 位移电压法是间接测量对地电容方法中的一种, 但该方法在计算对地电容时, 个别结果会出现较大误差. 针对这一问题, 本文提出了先估算谐振点电感值  $L$ , 然后以 2 倍的  $L$  值与 2.5 倍的  $L$  值分别调节电感, 再使用位移电压法计算对地电容的方法. 并利用 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, 对改进前后的位移电压法进行了仿真比较. 实验结果表明, 使用改进后的位移电压法计算出的对地电容更为准确, 误差小于 1%.

**关键词:** 消弧线圈; 谐振接地; 仿真; Matlab

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)02-0186-05

在我国, 10~66 kV 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, 可立即跳闸, 按规程规定, 电网能带故障运行 2 h.

消弧线圈是一种铁心带有空气间隙的可调电感线圈<sup>[1]</sup>, 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. 消弧线圈的控制依据应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. 只有在对地电容准确计算的情况下, 才可以保证消弧线圈理想的补偿和消弧作用.

位移电压法是对地电容检测方法中的一种. 使用该方法虽然能计算出对地电容值, 但是如果电感值选择不当, 就会影响到计算结果的准确性, 进而影响了消弧线圈的补偿作用. 因此, 需要对该方法进行改进, 才能保证计算出的对地电容值是准确值. 下文将介绍位移电压法<sup>[2]</sup>的原理.

## 1 位移电压法

中性点位移电压大小为

$$U_N = \frac{U_0}{\sqrt{b^2 + d^2}} \quad (1)$$

其中  $U_0$ : 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,  $d$ : 电网阻尼率.

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{U_0 \omega C_{dl} - \frac{U_0}{\omega L}}{\omega C_{dl}} = \frac{\omega C_{dl} - \frac{1}{\omega L}}{\omega C_{dl}} \quad (2)$$

其中  $I_C$ : 对地电容电流,  $I_L$ : 电感电流,  $C_{dl}$ : 对地总电容,  $L$ : 电感,  $\omega$ : 角频率.

当  $v \gg d$  时, 将式(2)代入式(1)中, 得

$$U_N = \frac{U_0 \omega C_{dl}}{\omega C_{dl} - \frac{1}{\omega L}} \quad (3)$$

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

$$U_{N1} = \frac{U_0 \omega C_{dl}}{\omega C_{dl} - \frac{1}{\omega L_1}} \quad (4)$$

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

$$U_{N2} = \frac{U_0 \omega C_{dl}}{\omega C_{dl} - \frac{1}{\omega L_2}} \quad (5)$$

将式(4)除以式(5), 可得

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

可以利用上述原理实时计算电网对地电容值, 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.

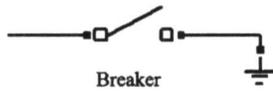


图 1 接地点模型

Fig.1 Ground fault model

## 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<sup>[3]</sup>. 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用的模型库. 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<sup>[4]</sup>.

### 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.

该模型中包含的模块有<sup>[5]</sup>: 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  $I_L, Scope U_N, Scope U_{abc}, Scope U_a, Scope U_b, Scope U_c, S_{Ic1}, S_{Ic2}, S_{Ic3}, S_{Ic}, S_{Id}$ .

电容器有:  $C_1, C_2, C_3$ .

电感线圈为  $L$ .

一些主要模块的作用:  $U_N$  用来测量中性点位移电压,  $I_L$  用来测量电感电流,  $I_c$  用来测量对地电容电流,  $I_d$  用来测量残流.

## 3 仿真实例

如果上述提出的位移电压法能够准确地计算出结果, 那么任意取两个值  $L_1, L_2$  分别进行调谐, 经过计

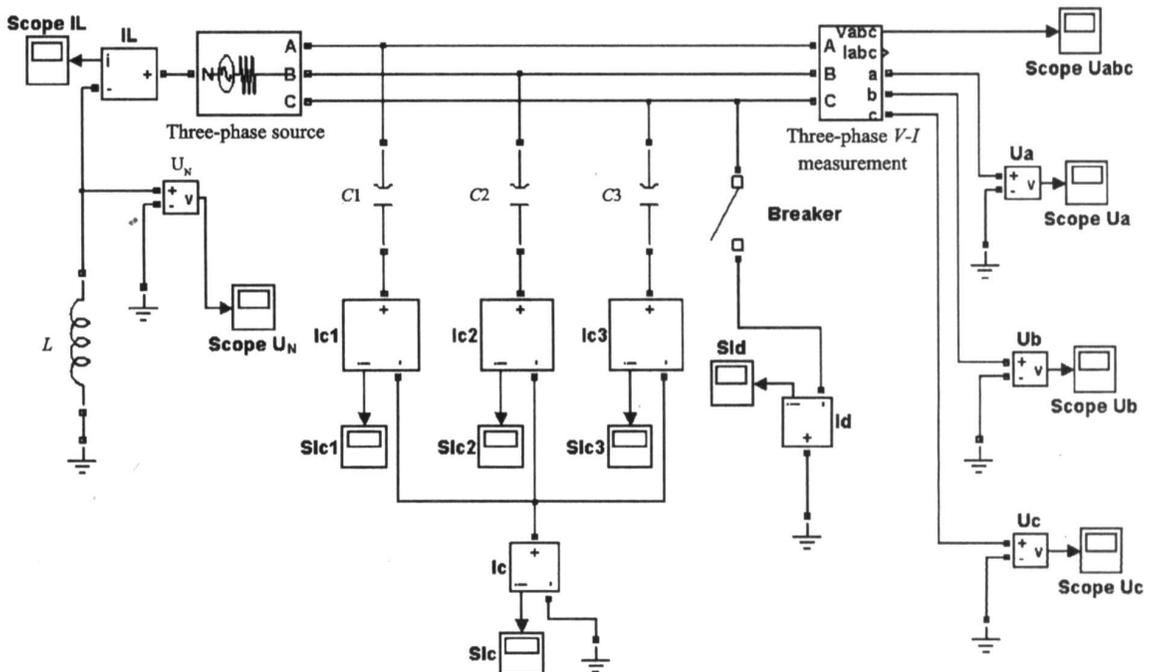


图 2 谐振接地系统模型

Fig.2 Model of resonant earthed system

算后, 就应该能得到对地电容的准确值. 为了研究其准确性, 我们利用该仿真模型, 对其进行仿真分析<sup>[6]</sup>.

### 3.1 仿真参数设置

我们采用 220 V 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, 也就是不让它发生单相接地故障. 采用 ode15s(Stiff / NDF) 算法, 仿真时间为 0.2 s.

### 3.2 仿真步骤

调节消弧线圈的对地电容值, 使  $C_1 = 1.1 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 1 \mu\text{F}$ ,  $C_3 = 1 \mu\text{F}$ . 调节消弧线圈的电感值分别为  $L_1 = 9 \text{ H}$ ,  $L_2 = 10 \text{ H}$  (都处于欠补偿状态, 且远离谐振点处)<sup>[7]</sup>, 并将该电感值作用下的中性点位移电压分别记录下来, 记为  $U_{N1}$ ,  $U_{N2}$ , 然后将它们代入公式(6), 算出  $C_{all}$ , 记录在表中.

同样地, 改变消弧线圈的对地电容, 使其对地总电容值  $C_{all}$  分别为 3.1、6.1、9.1、12.1、15.1、18.1、21.1 和 24.1  $\mu\text{F}$  (其中  $C_2 = C_3$ ,  $C_1 = C_2 + 0.1$ ), 做相同的操作.

### 3.3 仿真结果分析

实验数据如表 1 所示.

从表 1 中可以看到, 有些值计算得很准确, 但是有些值存在的误差比较大. 当  $C_{all} = 24.1 \mu\text{F}$  时, 测出的对地电容值相对误差较大, 达到了 10.687%. 假定我们算出的值是准确值, 即  $C_{all} = 21.52447 \mu\text{F}$ , 那么发生谐振时, 即全补偿,  $L = 0.47 \text{ H}$ . 我们以这个值来进行补偿, 为了更明显地看出补偿效果, 我们采用 35 kV 的相电压, 得到残流波形, 如图 3 所示.

从图 3 可以看到, 残流仍然很大, 消弧线圈没有起到应有的补偿作用. 因此, 如果在计算对地电容时, 出现如此大的误差, 那么将大大影响消弧线圈的消弧及补偿作用.

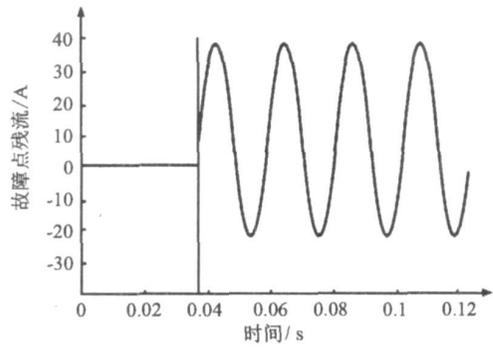


图 3 残流波形图

Fig.3 Residual current waveform

## 4 准确性研究

以上的方法通过任意取两个电感值进行调谐并进行计算, 虽然得到的结果有一些是准确的, 但是无法保证所有的结果都准确(比如取的两个点刚好位于谐振点的两侧, 或者这两点所对应的中性点电压值很接近). 这时我们就需要有选择性地选取电感值来进行调谐, 只有这样才能得到较为准确的对地电容值.

我们知道中性点位移电压在谐振点时, 即  $X_L = X_C$  时,  $U_N$  达到最大值, 而越偏离谐振点, 中性点位移电压  $U_N$  的值就会越小<sup>[8]</sup>, 如图 4 所示.

我们希望取的点既不要太靠近谐振点(要保证中性点电压不超过相电压的 15%), 也不要太远离谐振点, 因为太远离谐振点时, 中性点电压比较小, 而且取的两点要有一定的间隔, 使得中性点电压有较大变化, 这样计算的值才能准确.

以表 1 的数据为基础, 假定对地电容的计算值为准确值, 然后算出谐振时所对应的电感值  $L$ , 将其作为谐振点位置. 为了使所取的点对应的中性点电压满足要求( $U_N$  不超过相电压的 15%), 我们取  $L_1 = 2L$  进行

表 1 对地电容仿真实验结果

Tab.1 Simulation results for the capital

实际对地 总电容/ $\mu\text{F}$	$L_1 = 10 \text{ H}$ 时, 中性 点电压 $U_{N1}/\text{V}$	$L_2 = 9 \text{ H}$ 时, 中性 点电压 $U_{N2}/\text{V}$	对地电容 计算值/ $\mu\text{F}$	相对误差/ $\%$
3.1	10.4349483	11.1440578	2.782456	10.243
6.1	4.31441154	4.423026969	5.597647	8.235
9.1	2.72050756	2.759108238	9.060166	0.438
12.1	1.98437543	2.004806972	12.05983	0.332
15.1	1.56179351	1.574396707	15.07664	0.155
18.1	1.28762521	1.296148493	18.13328	0.184
21.1	1.09532669	1.101505832	21.08178	0.086
24.1	0.95292553	0.958184666	21.52447	10.687

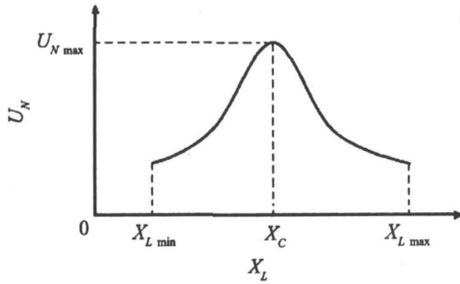


图 4  $U_N$  与  $X_L$  关系

Fig. 4 Relation between  $U_N$  and  $X_L$

调谐, 记录下此时的中性点位移电压  $U_{N1}$ , 然后取  $L_2 = 2.5L$  进行调谐, 记录下此时的中性点位移电压  $U_{N2}$ , 然后计算, 结果见表 2.

从表 2 可以看到, 计算的结果是很准确的, 与实际值相当接近. 与表 1 的数据相比, 表 2 中的数据更好, 没有出现误差很大的值.

将以上的做法归纳成一个算法. 假设消弧线圈的调节范围为  $(0, L_{max})$ , 则该算法的流程图见图 5.

该算法主要思想在于: 先通过测量远离谐振点的中性点位移电压(电压值比较小), 估算出谐振点的位置, 即谐振时电感  $L$  的大小; 然后利用估算的  $L$  值进一步去计算出准确的对地电容值. 从流程图中可以看到, 第 1 步到第 4 步做的事情就是估算出谐振时  $L$  的值, 第 5 步到第 6 步做的事情就是算出准确的对地电容值. 如果需要继续计算对地电容, 那么可以把第 6 步的计算结果  $C$  作为新的参数传给  $C_0$ , 然后跳转到第 4 步.

实验证明, 该方法可以将相对误差控制在 1% 以内. 因此, 可以将该方法计算得到的数值当作是实际的的对地电容值.

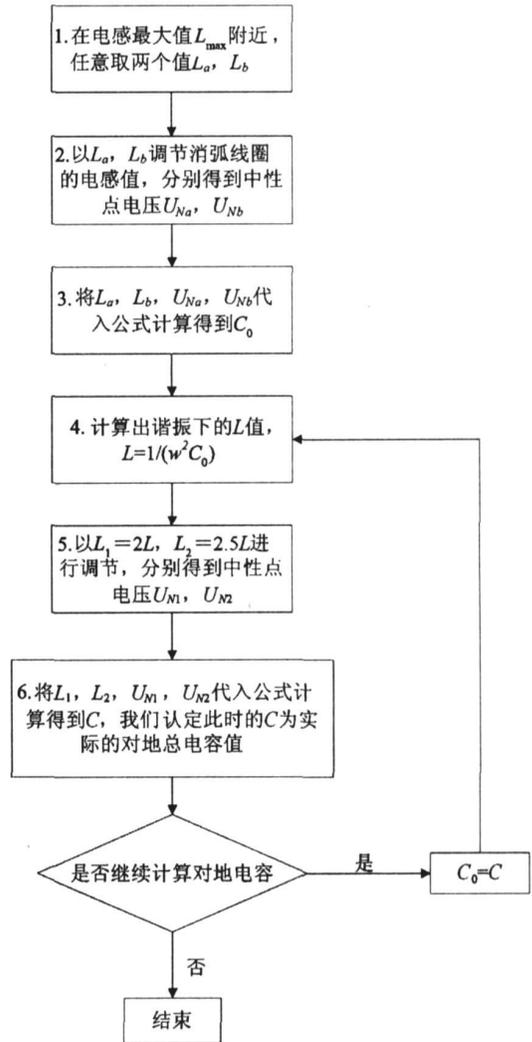


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the algorithm

表 2 对地电容仿真实验结果

Tab. 2 Simulation results for the capital

估算电容 值/ $\mu\text{F}$	电感值 $L/\text{H}$	$L_1 = 2L$ 时, 中性 点电压 $U_{N1}/\text{V}$	$L_2 = 2.5L$ 时, 中性 点电压 $U_{N2}/\text{V}$	对地电容 计算值/ $\mu\text{F}$	相对误差/ $\%$
2.782456	3.641	12.84987999	11.08030778	3.107026	0.227
5.597647	1.81	6.713104028	5.208822289	6.063007	0.606
9.060166	1.118	4.894692622	4.013532284	9.100642	0.007
12.05983	0.84	3.583061468	2.733839432	12.09985	0.001
15.07664	0.672	3.011114792	2.407070555	15.10176	0.012
18.13328	0.559	2.474952713	2.025315809	18.101630	0.009
21.08178	0.481	2.005890611	1.738262905	21.100270	0.001
21.52447	0.471	1.71309634	1.405218509	24.10377	0.016

注: 相对误差指的是对地电容计算值与实际对地电容值的误差. 两个调节点取为谐振电抗值的 2 倍和 2.5 倍, 目的是在保证中性点位移电压不超过相电压的 15% 的情况下, 又能使两个调节点所获得的中性点电压有明显变化, 这样计算的结果会更好.

## 5 结 论

位移电压法是对地电容检测方法的一种. 本文对该方法提出了改进, 并对改进前后的两种方法进行了仿真比较. 仿真结果表明, 改进后的方法计算结果更为准确, 相对误差控制在 1% 以内, 满足电力系统的要求. 因此可以利用改进后的位移电压法准确地实时测定电网对地电容值, 并用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] 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] 蔡旭, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 53- 56.
- [3] 吴天明, 谢小竹, 彭彬. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 贾清泉, 简道深, 袁石文. 基于 Matlab 的一种新型消弧线圈的仿真[J]. 继电器, 2006, 34(16): 49- 53.
- [5] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 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[J]. 继电器, 2005, 33(5): 67- 71.
- [7] 贾雅君, 蔡旭. 偏磁式消弧线圈自动调谐新原理及应用[J]. 继电器, 2004, 32(10): 1- 5.
- [8] 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.

## Simulation of Improved Displacement Voltage Method

KE Yuan-qing, LU Da, TANG Qi

(Department of Computer Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Displacement voltage method was one of the ways of measuring capacitor of system grounding indirectly, but there were some results having a large error. In view of the problem, this paper proposed a new method. Firstly, the inductive reactance ( $L$ ) on the resonance point was estimated. Then, the arc suppression coil was adjusted with 2 times of  $L$  and 2.5 times of  $L$ . Lastly, the capacitor of system grounding was calculated by using displacement voltage method. Moreover, the model of resonant earthed system was established with the graphics simulating software Matlab. Based on the model, a comparison was performed between former and improved displacement voltage method. The results indicated the improved displacement voltage method was more accurate and the error was less than 1%.

**Key words:** arc suppression coil; resonant grounded; simulation; Matlab