

基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法

李涛¹, 苗晓鹏², 李晓波²

(1. 唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了改善消弧线圈补偿的补偿效果, 提出了一种基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新法。该方法通过在配电网中性点增加消弧线圈及电阻, 更换电阻之后, 调节消弧线圈电感值, 同时观察和测量中性点偏移电压有效值的大小, 来配合消弧线圈的进一步调节。当改变电阻前后中性点偏移电压有效值相同时, 联立方程, 可以精确地求出配电网对地电容总和 C_{Σ} 与对地电阻总和 g_{Σ} , 从而确定消弧线圈全补偿时的电感值 L_0 。通过 Matlab 仿真和理论计算, 验证了该方法能够取得比较精确的补偿效果。该方法具有操作简单, 测量精度高, 补偿效果好等优点, 可以应用于消弧线圈调谐领域。

关键词: 幅值; 消弧线圈调谐; 电感值; 中性点偏移电压; 测量效果

A new tuning method of arc suppression coil based on the constant zero-sequence voltage amplitude

LI Tao¹, MIAO Xiao-peng², LI Xiao-bo²

(1. Tangshan Power Supply Company, Tangshan 063000, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to improve the compensation effect of the arc suppression coil, a new tuning method of arc suppression coil based on the constant zero-sequence voltage amplitude is proposed. In this method, the arc suppression coil and resistor are added in the distribution network neutral point. After replacing the resistor, it adjusts the arc suppression coil inductance value, while observes and measures the size of the neutral point offset voltage rms, to coordinate the further adjustment of the arc suppression coil. When the neutral point offset voltage rms is identical before and after replacing the resistor, simultaneous equations, the sum of the capacitance to ground C_{Σ} and the sum of the resistance to ground g_{Σ} in the distribution network can be accurately obtained, thus to determine the value of arc suppression coil fully compensated inductor L_0 . Matlab simulation and theoretical calculation verify that the method can obtain a more precise compensation effect. This method has the advantages of simple operation, high accuracy, good compensation effect, so it can be applied to the areas of arc suppression coil tuning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107143).

Key words: amplitude; arc suppression coil tuning; inductance value; neutral point offset voltage; effect of measure

中图分类号: TM473

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)09-0086-05

0 引言

配电网故障主要是单相接地故障或者是因为单相接地故障引起的^[1-2]。随着配电网容量的增加, 输电线路的增长, 尤其是电缆的使用, 使得故障接地电容电流增大^[3], 我国配电网多以消弧线圈方式接地。

中性点经消弧线圈接地的电网中消弧线圈的电感电流补偿了系统对地电容电流, 能有效地减少接地电流, 大幅提高了供电的可靠性^[4-6]; 并且可以使接地故障电流自行灭弧并减缓故障点恢复电压的上升速度^[7-9]。消弧线圈的调谐与电容电流测量一样,

都要测量线路的对地电容与电导值。目前的电容电流测量技术主要有人工中性点法、偏置电容法^[10]、注入信号法^[11-12]等方法。人工中性点法中只要人工电容组发生微小的改变, 就会产生较大的测量误差; 偏置电容法加入较大的电容会造成非偏置相电压升高^[13], 容易使电网绝缘薄弱处发生短路; 注入信号是最近几年提出的测量电网电容新方法, 但是注入信号的频率幅值选取不当都会严重影响测量结果^[13-14]。

基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法可以免去测量相位的麻烦, 目前有很多调谐方法都需要测量相位关系, 难免造成测量困难, 测量误差比较大的缺点。同时基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法既可应用预调式消弧线圈与随调式消弧线圈, 又可应用于最新提出的全补偿消弧线圈

基金项目: 国家自然科学基金 (51107143)

和零残流消弧线圈的调谐, 具有操作方便、测量精度高、调谐效果好等优点, 可以方便地应用于消弧线圈调谐领域。

1 恒定零序电压幅值调谐基本原理

图 1 为恒定零序电压幅值调谐的原理电路。 C_A 、 C_B 和 C_C 为三相对地电容; g_A 、 g_B 和 g_C 为三相对地电导; L 为消弧线圈电感, G_1 和 G_2 为消弧线圈并联电导。设电网中性点自然不平衡电压为^[15]

$$\dot{U}_{bd} = -\dot{\rho} \frac{1}{1-jd_0} \dot{U}_{ph}$$

式中: $\dot{\rho} = \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C}$, 为电网的不对称因子;

\dot{U}_{ph} 为电网相电压; $d_0 = \frac{g_A + g_B + g_C}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$, 为电网自然阻尼率。

消弧线圈接入之后中性点位移电压为^[18]

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{bd}}{\frac{\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)} - j \frac{G_L + (g_A + g_B + g_C)}{\omega(C_A + C_B + C_C)}} = \frac{\dot{U}_{bd}}{v - jd}$$

式中: $v = \frac{\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$ 为消弧线圈脱谐度;

$d = \frac{G_L + (g_A + g_B + g_C)}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$ 为电网总的阻尼率。

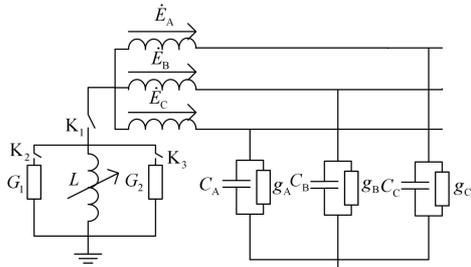


图 1 恒定零序电压幅值调谐的原理电路

Fig. 1 Principle circuit of constant zero-sequence voltage amplitude tuning

设 $g_\Sigma = (g_A + g_B + g_C)$; $C_\Sigma = (C_A + C_B + C_C)$, 假定当开关 K_1 闭合时, 此时消弧线圈电感值为 L_1 , 此时中性点位移电压有效值为 U_{01} , 那么由公式表示为

$$\frac{U_{bd}}{U_{01}} = \sqrt{\left(\frac{\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L_1}}{\omega C_\Sigma} \right)^2 + \left(\frac{g_\Sigma}{\omega C_\Sigma} \right)^2} \quad (1)$$

当开关 K_2 闭合时, 调节消弧线圈电感值, 使得中性点位移电压有效值为 U_{02} , 此时消弧线圈电感值为 L_2 , 那么由公式表示为

$$\frac{U_{bd}}{U_{02}} = \sqrt{\left(\frac{\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L_2}}{\omega C_\Sigma} \right)^2 + \left(\frac{G_1 + g_\Sigma}{\omega C_\Sigma} \right)^2} \quad (2)$$

当开关 K_3 闭合时, 调节消弧线圈电感值, 使得中性点位移电压有效值为 U_{03} , 此时消弧线圈电感值为 L_3 , 那么由公式表示为

$$\frac{U_{bd}}{U_{03}} = \sqrt{\left(\frac{\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L_3}}{\omega C_\Sigma} \right)^2 + \left(\frac{G_2 + g_\Sigma}{\omega C_\Sigma} \right)^2} \quad (3)$$

如果保证 $U_{01} = U_{02} = U_{03}$, 那么可以联立式 (1) ~ 式 (3) 解出 g_Σ 和 C_Σ 。

$$C_\Sigma = \frac{(G_2 - G_1)(G_1 G_2 + \frac{1}{\omega^2 L_1^2}) + \frac{G_1}{\omega^2 L_3^2} - \frac{G_2}{\omega^2 L_2^2}}{2G_1(\frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_1}) - 2G_2(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1})} \quad (4)$$

$$g_\Sigma = \frac{(G_1^2 + \frac{1}{\omega^2 L_2^2} - \frac{1}{\omega^2 L_1^2})(\frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_1})}{2G_2(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1}) - 2G_1(\frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_1})} - \frac{(G_2^2 + \frac{1}{\omega^2 L_3^2} - \frac{1}{\omega^2 L_1^2})(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1})}{2G_2(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1}) - 2G_1(\frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_1})} \quad (5)$$

2 状态分析

如图 2 所示, 通过分合断路器改变接入电阻的值, 从而改变系统的阻尼率, 同时通过调节消弧线圈的电感值, 两者配合进行调节 (当 $v > 0$, 即消弧线圈处于欠补偿时, 并入电阻, 使得阻尼率 d 增加, 此时要减小消弧线圈电感值; 当 $v < 0$, 即消弧线圈处于过补偿时, 并入电阻, 使得阻尼率 d 增加, 此时要增加消弧线圈电感值。), 使得点 (v, d) 处于一

半圆上，即可满足上述测量条件，精确地测量出线
 路对地电容和 C_{Σ} 与线路对地电导总和 g_{Σ} 。然后调
 节消弧线圈使得 $v=0$ （即使消弧线圈处于全补偿状
 态），此时消弧线圈电感值为

$$L_0 = \frac{2G_1(\frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_1}) - 2G_2(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1})}{(G_2 - G_1)(\omega^2 G_1 G_2 + \frac{1}{L_1^2}) + \frac{G_1}{L_3} - \frac{G_2}{L_2}} \quad (6)$$

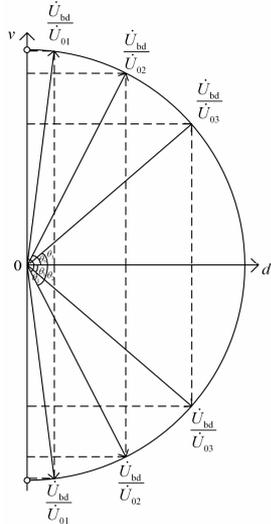


图 2 恒定零序电压幅值调谐的原理

Fig. 2 Principle of constant zero-sequence voltage amplitude tuning

3 仿真验证

基于 Matlab 的仿真系统原理图见图 3。

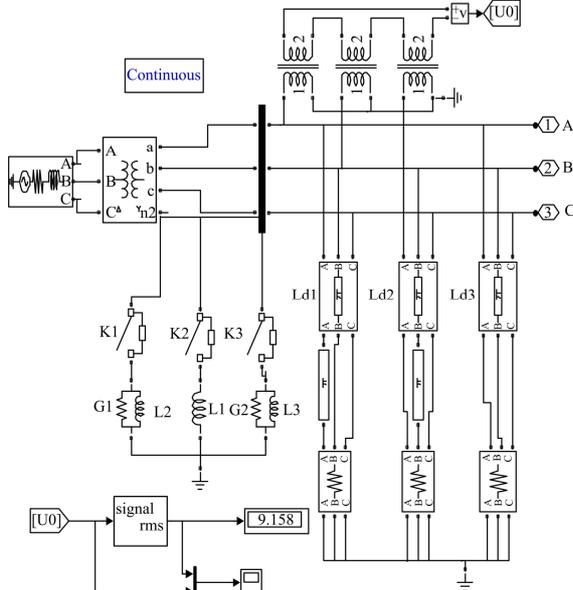


图 3 恒定零序电压幅值调谐的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of constant zero-sequence voltage amplitude tuning

配电网中性点经消弧线圈接地系统，可以通过
 断路器的分合来进行电阻的投切，同时通过调节消
 弧线圈的电感值来保证中性点位移电压始终为
 U_{01} 。仿真系统以设 3 条出线为例，Ld1、Ld2、Ld3
 长度分别为 40 km、50 km、60 km。电源电压等级
 为 35 kV；三相变压变比为 35/10 kV 线路采用三相
 π 型电路等效模块，正序分布参数为：电阻 0.012 73
 Ω/km ，电感 $0.933 7 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ，电容 12.74×10^{-8}
 F/km ；零序分布参数：电阻 $0.386 4 \Omega/\text{km}$ ，电感
 $4.126 4 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ，电容 $7.751 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$ 。为了实
 现线路参数的不平衡，分别在 Ld1 与 Ld2 的 A、B
 两相增加 20 km、10 km 长度，参数与三相零序分
 布参数相同；测量变压器由 3 个变比为 10/0.38 kV
 的线性变压器组合而成，通过三相 RLC 支路模块，
 设置线路对地电阻，总的对地电阻设置
 $r_{\Sigma} = 100 00 \Omega$ 。

现已知系统的零序对地总电容 $C_{\Sigma} = 37.204 8 \mu\text{F}$ ，
 因而谐振时电感 $L_0 = 0.272 61 \text{ H}$ 。如图 3 所示中性
 点通过三个断路器 K_1 、 K_2 、 K_3 分别与消弧线圈及其
 并电阻模块连在一起（为了方便观察同时改变消弧
 线圈电感值与并联电导值对中性点偏移电压影响）。

仿真设定在 $t=0.2\sim 0.4 \text{ s}$ ， K_1 闭合，消弧线圈投
 入，此时电感值为 L_1 ；在 $t=0.4\sim 0.6 \text{ s}$ ， K_2 闭
 合，改变消弧线圈电感值并入电导 G_1 后投入，此
 时电感值为 L_2 ；在 $t=0.6\sim 0.8 \text{ s}$ ， K_3 闭
 合，改变消弧线圈电感值并入电导 G_2 后投入，此
 时中性偏移电压的变化如图 4 所示（图中虚线为中性
 点电压波形变化曲线，实线为中性点电压有效值变
 化曲线），同时进行多次仿真并记录仿真数据（如表
 1 所示），计算出线路对地电容总和 C_{Σ} 与对地电
 导总和 g_{Σ} ，同时计算出达到全补偿时的消弧线圈
 电感值 L_0 与对地电阻总和 r_{Σ} 。

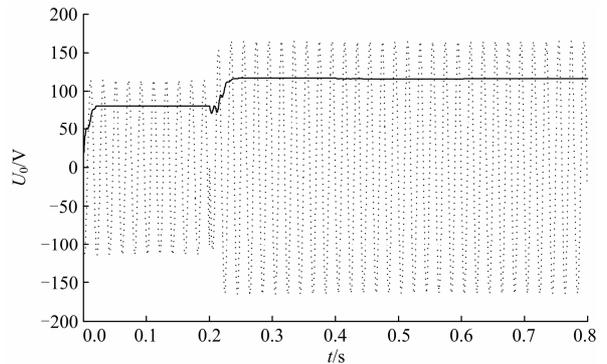


图 4 消弧线圈与电导配合调节过程中中性点偏移电压有效值与波形的变化

Fig. 4 Neutral point offset voltage rms and waveform changes in the process of arc suppression coil in conjunction with conductance adjustment

表 1 恒定零序电压幅值调谐仿真数据
Table 1 Simulation data in the constant zero-sequence voltage amplitude tuning process

L/H	R/Ω	U_0/V	g_{Σ}/S	r_{Σ}/Ω	$C_{\Sigma}/\mu F$	L_0/H	电容误差/ %	电阻误差/ %
0.155 11	0	106.290 56						
0.155 63	1 000	106.295 09	0.000 101 1	9 891.196 835	36.916 44	0.274 74	0.775 06	1.088 03
0.155 15	5 000	106.299 71						
0.455 11	0	199.982 48						
0.446 83	1 000	199.982 33	0.000 105 6	9 944.311 85	37.148 69	0.273 02	0.150 80	0.556 88
0.454 56	5 000	199.979 66						
0.855 11	0	117.863 95						
0.838 07	1 000	117.864 00	0.000 100 36	9 964.129 135	37.177 00	0.272 81	0.074 72	0.358 71
0.853 96	5 000	117.863 80						
1.255 11	0	102.587 98						
1.223 37	1 000	102.588 03	0.000 100 32	9 968.102 07	37.203 93	0.272 62	0.002 34	0.318 98
1.252 95	5 000	102.587 99						
1.655 11	0	96.149 62						
1.603 71	1 000	96.149 63	0.000 101 6	9 842.519 69	37.210 32	0.272 57	0.014 84	1.574 80
1.651 59	5 000	96.149 63						

由上面的仿真波形图 4 可以看出, 同时调节消弧线圈的电感值总能使零序电压的幅值保持不变的, 在这种情况下, 我们可以通过 PT 来直接观察零序电压的有效值变化, 如表 1 所示, 通过仿真测定 5 组数据, 均显示测量误差很小, 这种调谐方法可以应用于消弧线圈调谐领域, 同时也避免了测量相位的麻烦。

4 结语

本文提出的基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐方法, 仅仅从 PT 二次侧观察中性点偏移电压 U_0 的有效值变化, 相应调节消弧线圈电感, 中性点偏移电压 U_0 达到与改变电导前相同的值, 保证中性点偏移电压不发生改变, 从而可以精确地测量出线路对地电容总和 C_{Σ} 和对地电导总和 g_{Σ} 。由于测量过程中没有观测和测量相位关系, 操作简单, 测量方便, 可以实现比较精确的调谐效果。

参考文献

- [1] 唐轶, 王涛, 罗建锋. 用于消弧线圈控制的单相接地电流测量方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2242-2245.
TANG Yi, WANG Tao, LUO Jian-feng. Measurement method of the phase-to-earth fault current used in the control of arc-suppression coils[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2242-2245.
- [2] 江渝, 刘和平, 冉立, 等. 连续调节消弧线圈接地系统

单相接地故障谐振状态在线监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 35-40.

- JIANG Yu, LIU He-ping, RAN Li, et al. Study on the judgement of resonance state during the single phase ground in the distribution with the continuously adjustable ASC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 35-40.
- [3] 刘宝稳, 李晓波. 基于失谐量的消弧线圈跟踪调谐方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 6-9.
LIU Bao-wen, LI Xiao-bo. New type of automatic tuning arc-suppression coil based on detuning size[J]. Power Systems Protection and Control, 2013, 41(5): 6-9.
- [4] 孔宁, 尹忠东, 杨坡, 等. 基于 PWM 可控电抗器的自调谐消弧线圈的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 133-137.
KONG Ning, YIN Zhong-dong, YANG Po, et al. Study on automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 133-137.
- [5] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 171-178.
ZHANG Hai-ping, HE Zheng-you, ZHANG Jun. A fault line detection method for indirectly grounding power system based on quantum neural network and evidence

- fusion[J]. Transactions of China Elerotechnical Society, 2009, 24(12): 171-178.
- [6] 朱珂, 裴佑楠, 陈晨. 自适应控流型故障选线方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 174-182.
ZHU Ke, PEI You-nan, CHEN Chen. Self-adaptable and current controllable faulted line identification scheme[J]. Transactions of China Elerotechnical Society, 2009, 24(8): 174-182.
- [7] 马静, 王增平, 吴劫. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166-171.
MA Jing, WANG Zeng-ping, WU Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Elerotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171.
- [8] 纪飞峰, 王崇林, 牟龙华, 等. 基于对称法与相位法的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 73-77.
JI Fei-feng, WANG Chong-lin, MOU Long-hua, et al. New type of arc-suppression coil based on symmetry and phase tuning principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 73-77.
- [9] 李晓波, 张长彦, 王崇林. 一起消弧线圈控制装置异常动作事件分析及改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 121-125.
LI Xiao-bo, ZHANG Chang-yan, WANG Chong-lin. Analysis on abnormal action of an arc suppression coil's control device and its improvement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 121-125.
- [10] 李景禄, 周羽生, 唐跃进. 偏置电容法电容电流测量的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 99-100.
LI Jing-lu, ZHOU Yu-sheng, TANG Yue-jin. Application experiences of capacitive current measuring with partially installing capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 99-100.
- [11] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.
ZENG Xiang-jun, YI Wen-tao, LIU Zhang-lei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal Injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [12] 丛伟, 李盼盼, 李洪涛, 等. 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 185-189.
CONG Wei, LI Pan-pan, LI Hong-tao, et al. Automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 185-189.
- [13] 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.
LI Xiao-bo, WANG Chong-lin. Survey of zero-residual-current arc suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 116-121.
- [14] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 171-177.
ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sector-ring restraint region[J]. Transactions of China Elerotechnical Society, 2009, 24(6): 171-177.
- [15] 李晓波. 柔性零残流消弧线圈的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
LI Xiao-bo. Research on flexible zero-residual-current arc suppression coil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2013-09-18

作者简介:

李涛(1980-), 男, 硕士, 从事电网自动化方面的运行维护等工作;

苗晓鹏(1986-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统接地系统与继电保护; E-mail: miaoxiaopeng123@126.com

李晓波(1976-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统接地系统与继电保护。