

文章编号: 1001-1609(2007)03-0165-04

自动补偿消弧装置新型测控方法的研究及其实现

闫 静, 马志瀛

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Development and Realization of a New Measure-control Method for Automatic Compensation Arc-suppression Equipment

YAN Jing, MA Zhi-ying

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 自动补偿消弧装置的技术核心就在于对电网对地电容电流的准确跟踪和精确测量。针对目前电容电流检测方法的局限性,同时考虑系统阻尼率的影响,提出了一种新型测控方法,并得到两台消弧线圈并联运行时的测控方法。在此基础上研制了以PC/104工业控制计算机为核心的自动补偿消弧装置控制器,模拟试验表明提出的方法可以明显提高电网对地电容电流的测量精度。

关键词: 配电系统; 自动补偿消弧装置; 电容电流; 测控方法

中图分类号: TM761

文献标志码: A

Abstract: Tracing and measuring the network-to-earth capacitive currents is technical core of automatic arc-suppression equipments. A new measure-control method was proposed by considering the impact of system damping rate. And the measure-control method for two parallel connected extinction coils was obtained. A controller was developed for automatic compensation arc-suppression equipment, by using PC/104 industrial control computer. Simulation tests demonstrate that the method improves the measure precision of the network-to-earth capacitive current.

Key words: distribution system; automatic compensation arc-suppression equipment; capacitive current; measure-control method

0 引言

我国电力行业标准规定^[1]: 3~10 kV 架空线路构成的系统和所有 35、66 kV 电网,当单相接地故障电流大于 10 A 时,中性点接地应采用消弧线圈接地; 3~10 kV 电缆构成的系统,当单相接地电流大于 30 A 时,中性点应装设消弧线圈。

老式消弧线圈,即手动无载调匝式消弧线圈,不能根据电网对地电容电流的变化及时调节,接地补

偿存在一系列问题,而自动补偿消弧装置则具有显著的优越性^[2]: 首先可以避免人工调谐消弧线圈的诸多麻烦,而且不会使电网的部分或者全部在调谐过程中暂时失去补偿;其次,由于自动补偿消弧装置能够保证调谐的精度,不仅可以提高消弧线圈的動作成功率,而且能够限制电网的电弧接地过电压和谐振过电压等,这些都有利于电网的安全运行。

目前最常见的自动补偿消弧装置有调匝式、调容式、调气隙式、可控硅控制高短路阻抗变压器式、偏磁式等。无论何种形式的自动补偿消弧装置,其共同特点是能自动跟踪系统电容电流的变化。实现消弧线圈自动跟踪调节的关键在于在系统正常运行时,准确快速实时地测量出系统对地电容,并据此计算出单相接地电容电流。因此,如何提高电容电流的检测精度,是实现谐振接地方式优化运行的一个核心技术问题^[3]。

为了保证在任何运行方式下的残流或脱谐度在规程允许范围之内,须使消弧线圈对应的电感电流对系统电容电流作跟踪补偿。针对消弧线圈调谐控制而采用的电容电流检测方法可总结为两大类:一类是通过改变消弧线圈支路阻抗,根据电网中性点电压、电流的变化测量电容电流,主要有谐振法、相位角法、电容电流间接检测法等;另一类为注入信号法,主要有注入工频电流和注入变频电流两种。然而,这些方法都有一定的局限性:前一类方法实现简单,但以往的两点算法忽略了系统的阻尼率,带来了较大的算法误差;后一类方法需要附加信号源,实现起来比较复杂,而且在中性点位移电压较大时,测量精度不能保证。笔者在考虑系统阻尼率影响的前提

收稿日期: 2007-01-23; 修回日期: 2007-05-08

作者简介: 闫 静(1973-),男,讲师,从事新型高压电器理论与应用、电力自动化设备等方面的研究工作。

下,提出了一种同时利用中性点电压和电流的两点算法,提高了电容电流的测量精度。

1 单机运行时电容电流的测量原理

谐振接地电网正常运行时,可运用戴维南定理将三相电路转化为单相电路,见图1^[4]。其中 U_{bd} 为系统不对称电压; L 为消弧线圈电感; g_L 为消弧线圈等值损耗电导; $C=3C_0$ 为三相导线对地电容之和; $g=3g_0$ 为三相导线对地泄漏电导之和。对于目前应用最广泛的预调式消弧线圈,需串联阻尼电阻 R 。

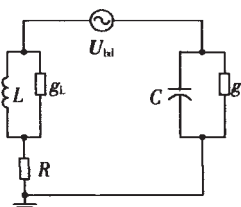


图1 谐振接地电网正常运行时的单相等值电路

目前应用最多的是电容电流间接检测法^[3],其基本思想是通过改变消弧线圈支路阻抗,造成电源中性点电压发生变化,同时消弧线圈中的电流随之改变,然后检测电压和电流值以及相应的相角差,间接计算出系统单相接地电容电流或系统对地电容,据此调谐消弧线圈。该算法在使用中都忽略了系统的阻尼率,即在图2的等值电路中忽略了 g 和 $3g_0$ 。与中性点不接地电网相比,谐振接地电网的阻尼率有所增加,这是由消弧线圈的有功损耗引起的,其值为

$$d = \frac{I_R}{I_C} = d_0 + \frac{P}{2LC} = d_0 + d_L \quad (1)$$

其中 d_L 为因消弧线圈有功损耗而增加的阻尼率; P 是有功损耗占补偿容量的百分比,或消弧线圈的有功电流与补偿电流、感抗与损耗电阻之比。

$$P(\%) = \frac{I_{rL}}{I_L} \times 100\% = \frac{L}{r_L} \times 100\% \quad (2)$$

不同类型与不同电压等级的电网,阻尼率的大小不相等,其值与电网中电气设备的绝缘状况有关。当电缆绝缘老化、受潮或架空线路污秽严重时,阻尼率会显著增大。在电容电流检测中忽略电网的阻尼率,在某些情况下会产生较大的误差,不能保证检测精度。为此,笔者对目前常用的算法进行改进,在电容电流计算过程中考虑阻尼率的影响,保证了检测精度。

当消弧线圈处在对应于不同补偿电流的电感值 L_1, L_2 时,测得中性点位移电压为 U_1, U_2 , 流过消弧线圈的中性点电流 I_1, I_2 , 将图1中的等值电路转化为串联电阻的等效电路,见图2。

$$\text{其中 } L_s = \frac{L}{\left(\frac{L}{r_L}\right)^2 + 1} = \frac{L}{P^2 + 1}, r_s = \frac{P L}{P^2 + 1} = \frac{(L)^2 r_L}{(L)^2 + r_L^2},$$

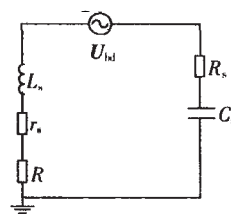


图2 谐振接地电网正常运行时的串联等效电路

$$X_C = \frac{1}{C_s} = \frac{(C)^2}{C[g^2 + (C)^2]}, r_C = \frac{g}{g^2 + (C)^2}.$$

一般情况下,消弧线圈的 $P=1.5\% \sim 2\%$, 故 L_s

$$L_s = \frac{(L)^2}{r_L}.$$

实测结果表明,中性点不接地电网在绝缘正常的情况下,电缆网络的阻尼率一般不超过1.5%,架空线路电网的阻尼率一般为1.5%~2%,即 $d_0 = g/(C) = 1.5\% \sim 2\%$

$$X_C = \frac{1}{C_s} = \frac{(C)^2}{C[g^2 + (C)^2]} = \frac{1}{C(1 + d_0^2)} = \frac{1}{C}$$

$$r_C = \frac{g}{g^2 + (C)^2} = \frac{g}{(C)^2} \cdot \frac{1}{1 + d_0^2} = \frac{g}{(C)^2}$$

由电路定律可得

$$U_1 = \frac{(R + r_{s1} + j L_{s1}) U_{bd}}{(R + r_{s1} + r_C) + j(L_{s1} - X_C)}, U_2 = \frac{(R + r_{s2} + j L_{s2}) U_{bd}}{(R + r_{s2} + r_C) + j(L_{s2} - X_C)}$$

$$I_1 = \frac{U_{bd}}{(R + r_{s1} + r_C) + j(L_{s1} - X_C)}, I_2 = \frac{U_{bd}}{(R + r_{s2} + r_C) + j(L_{s2} - X_C)}$$

U_1, U_2, I_1, I_2 的相位角不能直接测量得到,但是消弧线圈支路阻抗变化前后的中性点电压和电流的相位差可以精确测定。取系统线电压 U_{AC} 作为参考电压,显然其相位是由电源决定,通过测量得到 U_1, U_2, I_1, I_2 相对于 U_{AC} 的相位差。在每次测量的时间段内,假设中性点不对称电压 U_{bd} 不发生变化,求出 U_1/U_2 和 I_1/I_2 , 消除了测量中的系统误差。

$$\frac{U_1 I_2}{U_2 I_1} = \frac{R + r_{s1} + j L_{s1}}{R + r_{s2} + j L_{s2}} = k(\cos + j \sin)$$

由实部、虚部分别相等,可得

$$r_L = \frac{k \sin [(L_1)^2 - (L_2)^2]}{(k \cos - 1) L_1 - k(k - \cos) L_2},$$

$$R = \frac{(L_1)^2 - k \cos (L_2)^2 + k \sin L_2 r_L}{(k \cos - 1) r_L}$$

由此可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(R + r_{s2} + r_C) + j(L_{s2} - X_C)}{(R + r_{s1} + r_C) + j(L_{s1} - X_C)} = \frac{R + r_{s2} + j L_{s2} + \frac{1}{g + j C}}{R + r_{s1} + j L_{s1} + \frac{1}{g + j C}}$$

$$m(\cos + j \sin)$$

从而可以得到关于 g 和 C 的线性方程组

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $A_{11} = (R + r_{s2}) - m(R + r_{s1}) \cos + m L_2 \sin$; $A_{12} = m L_1 \cos + m(R + r_{s1}) \sin - L_2$; $A_{21} = (1 - m \cos) L_2$

$$m(R+r_{s1}) \sin \delta ; A_{22}=(R+r_{s2})-m(R+r_{s1}) \cos \delta +m L_1 \sin \delta ;$$

$$B_1=m \cos \delta -1 ; B_2=m \sin \delta .$$

求解方程组(3),即可得到系统对地容抗,据此调节消弧线圈的感抗。上述方法通过改变消弧线圈的支路阻抗,测量两次中性点电压和电流信号,计算出系统电容电流,可称为两点法。

2 多机并联运行时电容电流的测量原理

6~10 kV 消弧线圈通过接地变压器接入线路或经开关接入变电站的母线。变电站的母线,一般为双母线、多母线或单母线分段,在运行中有时需要分母运行,有时又需要并母运行。为了配电网能够达到安全经济的运行要求,实现最佳的运行方式,电网中的各个变电站往往要牵手运行,这样就产生消弧线圈的并联运行问题。消弧线圈是配电网的一部分,当多个变电站牵手运行时,可通过 RTU 实现对各个分散并联的消弧线圈的电气量采集,并选取调节裕度最大的消弧线圈进行调节,其他消弧线圈均闭锁,以防止多台消弧线圈同时调节引起中性点电压和电流的反复变化,造成轮番调节、频繁动作。笔者对一个变电站内的两段母线上分别安装串联阻尼电阻预调式消弧线圈这一最常见的情况进行分析,探讨消弧线圈并联运行的控制原理。

图3为一变电站10 kV 侧的接线情况,1、2两段母线各经接地变压器安装一台串联阻尼电阻的消弧线圈,通过开关母联K可实现并联运行。两台消弧线圈并联运行的情况可看作是已接入一台消弧线圈的电网在其对地电容被抵消掉一部分的情况下再接入一台消弧线圈,根据戴维南定理可得到图4中的两段母线并联运行后的零序等值电路。 L_1 、 L_2 分别为两台消弧线圈电感; r_1 、 r_2 为等值损耗电阻; R_1 、 R_2 为串联阻尼电阻,此时的 U_{0d} 为消弧线圈1不投入、仅有消弧线圈2投入时电网的中性点位移电压。

母线1 母联开关K合 母线2

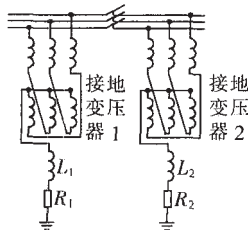


图3 两台消弧线圈并联运行的接线图

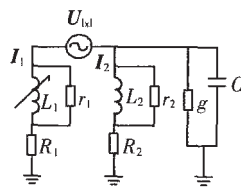


图4 两台消弧线圈并联运行时的零序等值电路

在两台消弧线圈独立运行时,其等值损耗电导和串联阻尼的数值均可求出,即 R_1 、 R_2 、 r_1 、 r_2 已知。当母联开关K闭合后,消弧线圈2固定不动,即 L_2 不变,通过调节消弧线圈1来检测电网电容电流,简化

后的零序等值电路见图5(a)。对于不同变电站牵手运行的情况,假定有N台消弧线圈并联运行,可看作是已接入N-1台消弧线圈的电网再接入一台消弧线圈, U_0 为调节裕度最大的消弧线圈不投入,而其他消弧线圈投入时电网的中性点位移电压。在并联运行时,N-1台消弧线圈均闭锁,其支路阻抗不变,且阻抗数值在独立运行时已获得,故N-1个并联支路可合并为一个支路,可进一步简化为图5(b)中的等值电路来表示。

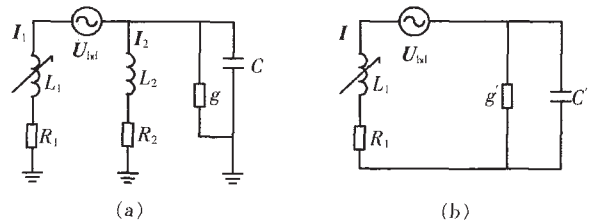


图5 多台消弧线圈并联运行时的零序等值电路

当消弧线圈1分别工作在对应于不同补偿电流的电感值 L_{11} 、 L_{12} 时,测得流过消弧线圈的中性点电流为 I_1 、 I_2

$$R_1 = \frac{L_1}{r_1}, R_2 = \frac{L_2}{r_2}, C = C - \frac{L_2}{(R_2)^2 + (L_2)^2},$$

$$g = \frac{R_2}{(R_2)^2 + (L_2)^2} + g, \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{11} + j L_{12} + \frac{1}{g + j C}}{R_{12} + j L_{11} + \frac{1}{g + j C}} =$$

$$k(\cos \delta + j \sin \delta)$$

可以得到关于 g 和 C 的线性方程组

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $A_{11}=R_{12}-kR_{11} \cos \delta +k L_{12} \sin \delta$; $A_{12}=k L_{11} \cos \delta +kR_{11} \sin \delta - L_{12}$; $A_{21}=(1-k \cos \delta) L_{12}-kR_{11} \sin \delta$; $A_{22}=R_{12}-kR_{11} \cos \delta +k L_{11} \sin \delta$; $B_1=k \cos \delta -1$; $B_2=k \sin \delta$ 。

求解方程组(4),可得到 C ,从而求出系统对地容抗,据此调节消弧线圈的感抗。

若电网中有正在运行的老式手动消弧线圈,此时测量的电容电流为补偿后的剩余电流。根据并联运行时的电容电流,分配各台消弧线圈的补偿份额,即可实现多机控制。

3 自动补偿消弧装置新型控制器的研制

为实现小型化,并且保证计算机系统的功能强大和支持模板的丰富,笔者在控制器的设计中选用PC/104工业控制计算机系统。它具有以下优点:①开发周期短,费用低。PC/104总线系统的编程和开发工具与普通PC机上使用的开发工具相同,这样就缩短了开发周期、降低了开发费用、减少技术风险、提高产品性能;②体积小。PC/104只有90mm×6mm大小;③层叠连接。多块面板层叠连接,占用空间很

小, 模块之间的连接非常牢靠, 且无需底板和机箱;
④功能非常强大。PC/104 系列模块有 CPU 卡、显卡、
通讯及计数/定时器卡、数据采集卡、数字量输入/输
出卡、网卡等等, 几乎包括所有用户所需的模块; ⑤功
耗小, 模块化, 抗冲击及震动能力强, 工作及存储温
度范围宽; ⑥集成度高, 可靠性高。

图 6 为自动补偿消弧装置控制器的硬件结构框图。该装置由 PC/104 嵌入式 CPU 模板 (AX10401A)、48 位数字输入输出 (PI/O) 模块 (AX10420)、高速数据采集模板 (AX10410)、模拟量输入调理板、开关量输入输出调理板、继电器输出板、液晶显示器、键盘、微型打印机等构成。采用模块化设计, 全数字化处理技术及光电隔离技术, 其性能稳定、抗干扰能力强、可靠性高。控制器在自动运行方式下, 首先判断系统是否发生单相接地故障, 在确认系统没有发生单相接地故障的前提下, 进入自动跟踪补偿程序。在自动跟踪补偿过程中, 系统首先判断消弧线圈处于分列还是并列运行方式, 然后通过读取测量得到的系统线电压、中性点电流, 计算出系统的对地电容电流, 据此来调节消弧线圈。

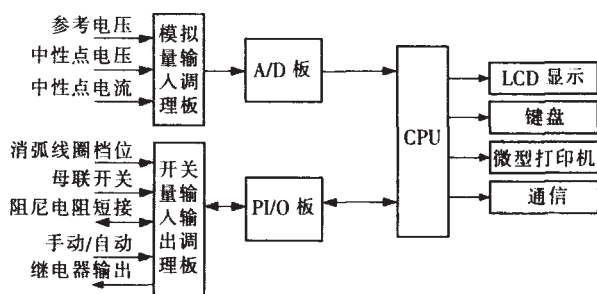


图 6 控制器硬件结构框图

笔者研制的自动补偿消弧装置控制器已经进行挂网运行, 在运行方式和出线发生改变时, 装置能够

准确地跟踪测量精度在 2% 以内。接地发生时, 能够快速输出补偿电流, 补偿后的残流小于 5 A, 效果令人满意。

4 结语

自动补偿消弧装置的应用使谐振接地方式的优点得到充分发挥, 其技术核心就在于对电网对地电容电流的准确跟踪和精确测量。针对目前电容电流检测方法的局限性, 考虑系统阻尼率的影响, 提出了一种新的测控方法。该方法通过改变消弧线圈的感抗, 测量两组中性点电压和电流的数值和相位, 推导出计算电容电流的两点算法。在系统正常运行时, 不调节消弧线圈感抗, 通过实时检测中性点电流, 计算出电网运行方式改变引起的对地电容的变化, 以获得最佳的补偿效果。在此基础上, 进一步得到两台消弧线圈并联运行时的测控方法。

根据提出的新型测控方法, 研制了以 PC/104 工业控制计算机为核心的自动补偿消弧装置控制器。该控制器在低压模拟电网上进行试验测试, 结果表明笔者提出的新型测控方法可以明显提高电网对地电容电流的测量精度, 达到了电力行业相关标准的要求, 可进一步推广到电力系统中应用。

参考文献:

- [1] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [2] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [3] 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.
- [4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

(上接第 164 页)

击穿电场强度减小。这说明击穿电场强度随有效面积增加而减小的规律可能存在一定的适用范围。

参考文献:

- [1] OKAWA M, SHIOIRI T, OKUBO H, et al. Area Effect on Electrical Breakdown of Copper and Stainless in Vacuum[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 23(1): 77-81.
- [2] KATO K, X HAN X, OKUBO H. Insulation Optimization by Electrode Contour Modification Based on Breakdown Area/Volume Effects [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 162-167.
- [3] SCHÜMANN U, GIERE S, KURRAT M. Breakdown Voltage of Electrode Arrangement in Vacuum Circuit Breakers [J].

IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 557-562.

- [4] SCHÜMANN U, KURRAT M. Breakdown Voltage of Electrode Arrangments in Vacuum in Consideration of Surface Area [C]// Proceedings of IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2002: 459-462.
- [5] TOYA H, HAYASHI T. Statistical Property of Breakdown Between Electrode and Shield in High-voltage Vacuum Interrupter[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1985, 13(5): 311-314.
- [6] TOYA H, UENO N. Statistical Property of Breakdown Between Metal Electrodes in Vacuum [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1981, 100(4): 1932-1939.