

自动调谐式消弧线圈测量跟踪问题的研究

陈忠仁^{1,2}, 吴维宁², 陈家宏², 董浩斌¹

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉高压研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 精确的测量和跟踪是自动调谐式消弧线圈精确地补偿系统电容电流、有效地熄灭接地点电弧的前提和基础。在模拟试验和现场运行经验的基础上, 分析了影响测量精确度的几个问题, 并提出了修正公式和应对措施; 最后讨论了跟踪准确度和灵敏度的实现方法。

关键词: 消弧线圈; 测量; 跟踪; 中性点位移电压; 脱谐度

中图分类号: TM475 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0024-05

0 引言

近年来, 自动调谐式消弧线圈已经在我国的 6 ~ 66 kV 的配电网中得到了广泛的应用。这和目前配电网的高速发展有关。随着城区面积的不断扩大, 配电网的规模也越来越大, 再加上电缆线路的增多, 使得系统电容电流的大小远远超过了规程的允许。如还采取中性点不接地方式, 一旦发生单相接地, 由于接地电流很大, 熄不了弧而引起弧光接地过电压, 将危及系统的绝缘和可靠的供电。而老式的消弧线圈依靠手工计算电容电流及手动调整电感, 已经无法适应现代电网运行的需要了, 因而已经基本上被自动调谐式消弧线圈所替代。

自动调谐式消弧线圈能够在单相接地发生时, 精确地补偿系统电容电流, 有效地熄灭接地点处的电弧, 不致引起弧光接地过电压, 从而保证了配电网设备的安全和供电的可靠性。而精确补偿的前提是精确地测量和跟踪, 这是区别于老式消弧线圈的根本所在, 也是各种类型的消弧线圈的技术核心所在。

如何保证测量和跟踪的精确度呢? 在消弧装置设计和运行的过程中, 存在一些易被忽略的问题, 仔细研究这些问题有助于提高测量和跟踪的精确度。

1 影响测量精确度的几个问题的分析

1.1 接地变压器的零序阻抗

6 ~ 10 kV 电网为 接法, 无中性点引出, 要装设消弧线圈, 必须接入接地变压器以引出中性点。接地变一次绕组一般采用 Z 型接法, 主要是使零序磁通相互抵消, 减小零序阻抗, 便于补偿电流的输出^[1]。由于制造工艺的限制, 零序阻抗不可能减小为零, 一般为几欧姆到十几欧姆, 不同变压器厂家的产品的零序阻抗稍有差别。零序阻抗虽然较小, 但

却是影响测量精度的一个重要因素。

从零序等值回路来看, 正常运行时的补偿电网是一个串联谐振电路^[2], 如图 1。 U_{un} 表示电网不对称电压, X_{L0} 表示接地变的零序阻抗, X_{LX} 表示消弧线圈的感抗, R 表示阻尼电阻, X_C 是线路对地容抗。

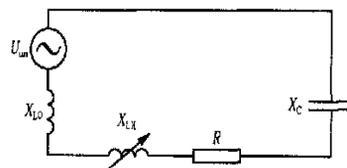


图 1 补偿电网的串联谐振电路

Fig. 1 Series resonance circuit of compensation network

由中性点位移电压 U_0 的公式

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

对于一定的电网, 系统阻尼率 d 和不对称电压 U_{un} 均为一定值, 谐振时, U_0 达到极大值, 脱谐度 $v = 0$, 由公式

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{X_C - X_L}{X_C} = 0 \quad (2)$$

忽略 X_{L0} 引起的相对误差 为

$$= \frac{X_{L0}}{X_C} \times 100\% \quad (3)$$

零序阻抗越大, 系统的电容电流越大 (容抗越小), 所引起的误差也越大。一般 $X_{L0} = 5 \sim 15 \Omega$, 对于电容电流在 60 A 以上, 容抗在 100 Ω 以下的 10 kV 电网来说, 忽略零序阻抗所引起的误差为 0.5% ~ 1.5% 以上, 所以应用公式 (2) 修正, 提高测量的精度。

在单相接地发生时, 补偿电网的零序等值回路转化为并联谐振电路^[2], 如图 2。一般测量所用的

电压互感器装设在消弧线圈内部,直接测得的为消弧线圈的电感两端的电压 U_{LX}

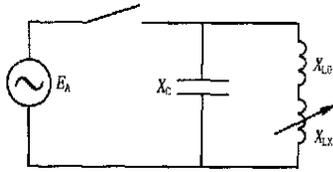


图2 补偿电网的并联谐振电路

Fig.2 Parallel resonance circuit of compensation network

$$X_{LX} = \frac{U_{LX}}{I_{LX}} \quad (4)$$

$$U_C = (X_{LX} + X_{L0}) I_{LX} \quad (5)$$

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = \frac{U_{LX}}{X_C} + \frac{I_{LX} X_{L0}}{X_C} \quad (6)$$

I_{LX} 是直接测得的流过消弧线圈的电流。由式(6),忽略零序阻抗引起的绝对误差为

$$= \frac{I_{LX} X_{L0}}{X_C} \quad (7)$$

相对误差 为:

$$= \frac{I_{LX} X_{L0}}{U_{LX} + I_{LX} X_{L0}} \frac{I_{LX} X_{L0}}{U_{LX}} \times 100\% \quad (8)$$

零序阻抗越大,系统的电容电流越大(容抗越小),补偿电流越大,所引起的误差也越大。对于电容电流在 60 A 以上的 10 kV 电网来说,补偿电流按 66 A(过补偿 10%)算,忽略零序阻抗所引起的误差为 5.5%~15.5%以上,可见误差是比较大的,必须加以修正。

为了检验自动调谐式消弧线圈的各项性能指标,我们在实验室用调压器、升压变压器和电容器建立了等效的模拟电网,以高压电容器(集中参数)代替线路分布电容,接线如图 3 所示。在电网单相接地试验时(即合上断路器 DL2)发现,装置测得的残流 I_D 总是小于接地点实测的残流 I_D ,误差最大达到了 5 A ($X_{L0} = 8 \Omega$),试验数据如表 1。

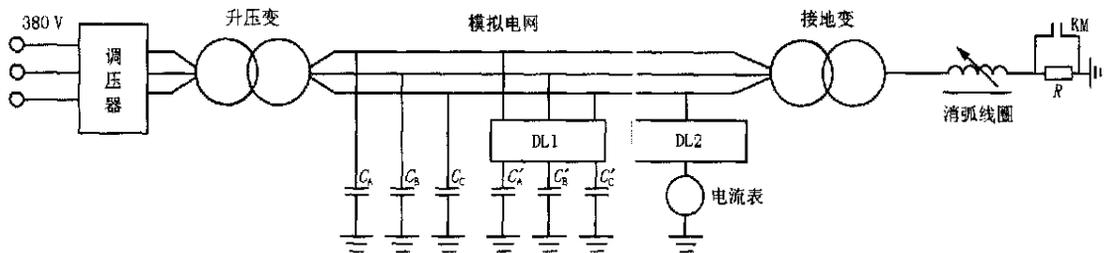


图3 消弧装置在模拟电网中的测量跟踪试验

Fig.3 Measuring and tracing experiment of arc-suppression coil in simulation network

由式(6)可以看出,如果忽略 X_{L0} ,装置计算得到的 I_C 将总是偏小,故 $I_D = I_{LX} - I_C$ 就总是偏大了。后来将零序阻抗考虑进去,根据式(6)修改了软件,重新试验,得到如表 2 所示的一组数据。

表 1 忽略零序阻抗时电网单相接地试验数据

Tab.1 Experimental data of network single-phase grounding without counting X_{L0}

中性点电压 U_{LX}/V	电容电流 I_C/A	补偿电流 I_{LX}/A	残流 $I_D = (I_{LX} - I_C)/A$	实测残流 I_D'/A
6 036	53.6	63.2	9.6	4.7
5 814	37.4	43.5	6.1	3.6
5 972	25.3	28.3	3.0	2.0

表 2 考虑零序阻抗时电网单相接地试验数据

Tab.2 Experimental data of network single-phase grounding with counting X_{L0}

中性点电压 U_{LX}/V	电容电流 I_C/A	补偿电流 I_{LX}/A	残流 $I_D = (I_{LX} - I_C)/A$	实测残流 I_D'/A
6 020	58.7	63.2	4.5	4.7
5 835	39.8	43.5	3.7	3.6
5 943	26.4	28.3	1.9	2.0

可见考虑了零序阻抗以后,装置所测得的残流

和实测的残流基本吻合。

1.2 系统阻尼率和阻尼电阻

对于调匝式消弧线圈,电感变化量不连续,一般采取位移电压法来测量电容电流^[3]。这种方法忽略了系统的阻尼率,但在接入阻尼电阻后,整个系统的阻尼率可达到 15%以上,再忽略阻尼率就将引起较大的测量误差。而对于采取预调节的调匝式消弧线圈,为了将中性点位移电压抑制在规程允许的范围之内,避免谐振,又必须装设阻尼电阻。由此造成了测量结果准确性较差。

对于电感量连续变化的消弧线圈,可采取谐振法(中性点位移电压极大值法)来测量系统电容电流。由式(1)知道,在中性点位移电压最大值处,脱谐度 $\nu = 0$,系统容抗等于感抗。这种测量方法与阻尼率和相位没有关系,按说不会影响测量的精度。但前已述及,为了安装维护方便,电压互感器一般装设在消弧线圈内部,实际直接测得的并不是中性点

位移电压,而是消弧线圈两端的电压 U_{LX} ,故如要比较判断 U_0 ,需要下式进行换算(参考图 1)。

$$U_0 = \frac{U_{LX} \sqrt{R^2 + X_{LX}^2}}{X_{LX}} \quad (8)$$

电压极值点找准与否是谐振法测量电容电流的关键,为了避免阻尼电阻对测量精度的影响,必须选取稳定性较好,阻值不随温度、湿度漂移的类型; R 就可以认为是恒定的已知量代入,而不会引起相应的误差了。

1.3 互感器的二次负荷

在消弧线圈内部装有电压互感器(PT)和电流互感器(CT),通过二次电缆将其二次输出和控制器内的小互感器的输入连接起来。消弧线圈的安装地点一般在高压室内,也可安装在配电网的室外馈线处,而控制器一般放在主控制室内,相互之间的二次连接电缆较长,使得互感器的二次负担较重,常常超出了其容量的要求^[4]。尤其是电流互感器的容量一般较小,连接所用的二次电缆的阻抗就更易超过容量的要求,由此引起的测量误差就不能忽略了。

洛阳某热电厂运行的一套消弧装置,1998年在安装试运行,测得的电容电流比实际值(22 A)小了9 A多,相对误差为42%,测量失败,经过反复实验和分析,发现是电流互感器的二次负荷过大引起了测量的失常。当时,电流互感器的容量为40 VA,变比75/5,精度为0.5级;二次连接电缆截面为2.5 mm²,长度约为150 m左右,电流回路的芯线长度有300 m左右,电阻 $R = 2.148 \Omega$,而电流互感器所允许的最大二次负荷阻抗为:

$$R = \frac{V}{I^2} = \frac{40}{5^2} = 1.6$$

$R > R$,造成电流互感器的误差增加,导致了测量的失败。后将空余的电缆芯线并接在电流互感器的二次回路中,将二次负荷阻抗减少为原来的1/2,即1.2 Ω ,启动装置再次测量,误差就降低到允许的范围之内为0.6 A(相对误差为3%以下),投运成功。

因此,在消弧装置的安装接线时,考虑到互感器的二次容量大小,信号电缆应尽量选用芯线截面为4 mm²的屏蔽电缆,对于距离较远的场合,还应将电缆芯线并联起来使用,以降低二次阻抗,减少测量误差。

1.4 启动测量时机的选取

在启动调感和停止调感的瞬间,由于存在暂态

过程,电压电流的波形极有可能畸变,如果此时启动测量,则往往得到错误的结果。所以,消弧装置的采样和测量应避免这些时间,延迟等待暂态过程结束后再进行。

2 自动跟踪问题的讨论

能够自动跟踪是自动消弧装置相对于老式消弧线圈的最主要的进步,也是实现智能补偿的前提条件。在系统运行方式发生变化时,部分线路拉掉或者投入运行,系统的电容电流就随之改变,如果装置不能及时有效地跟踪,还停留在原来的补偿位置上,则在单相接地发生时,就不能准确地补偿电容电流,接地点的残流就可能超过规程的允许而导致接地电弧的产生,这就失去了消弧线圈的作用,是不能允许的。

消弧线圈的自动跟踪既要保证较高的准确度,又要保证其合适的灵敏度。灵敏度太高,消弧线圈频繁的调感测量,将大大降低执行部件和传动机构的寿命,容易造成传动机构的机械故障和执行部件的电气故障,导致装置的运行失常。灵敏度太低,则会产生残流过大的问题。因而选择合适的灵敏度是非常必要的。

对电网进行自动跟踪,有两种方式,一种是根据中性点位移电压的变化,另一种是根据相位角的变化,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^[2]。而前者不需增加硬件,可以直接测得,作为跟踪的判据准确度很高,目前已被广泛地采用。

由公式(1),对于一定的电网,系统阻尼率 d 和不对称电压 U_{un} 为一固定值,设消弧装置过补偿在某一个位置,脱谐度为 v_1 ,当电网运行方式变化时,必将引起电容电流 I_C 改变, I_C 变化时又将引起脱谐度 v 发生变化,而 v 的变化又必将引起中性点位移电压 U_0 的变化,根据 U_0 的变化值,就可以判断系统运行方式是否发生了改变,是否进行跟踪。但在实际的运行中,扰动也会引起位移电压的变化,如:

电网中绝缘子的不对称泄漏;单相爬弧;线路下的树木在风的作用下对导线放电^[5]。系统中的扰动是经常遇到和大量存在的,如果不能识别的话,即使运行方式不变,消弧装置也会频繁地跟踪调感,这样就将降低装置的机械寿命和电气寿命,是厂

家和用户都不希望出现的情况。

以上的分析引出了以下的两个问题:

1) 如何识别系统扰动和运行方式变化之间的不同,保证跟踪的准确度。

2) 中性点位移电压变化了多少时跟踪比较合适,即确定跟踪的灵敏度。

2.1 跟踪的准确度

要保证跟踪的准确度,就要消除系统中扰动的影 响。经过大量的观测、试验和现场运行,获得了扰动和运行方式变化的各自不同的特点。扰动是持续的暂态过程,所引起的中性点位移电压的幅值较高;在扰动消失之后,位移电压又恢复到原来的数值。而运行方式的变化,在开始的瞬间也有几个周期的暂态过程,暂态过程结束后,位移电压与原来相比,有了一定数值的稳定的变化。根据这些特点,在软件里采取措施,即在监测到位移电压的变化后,连续采样十几个周期,将其和变化前的数值相比较,如果变化值不能稳定地大于某一数值(设定的灵敏度),则判断为扰动,否则就是运行方式的变化。如果判断为扰动的话,装置则闭锁不动。经如图 3 所示的实验室模拟电网跟踪试验,即通过频繁的切合 DL1 来模拟扰动,试验数据表明,可将 99% 以上的扰动剔除,这样就很好地解决了跟踪准确度的问题。

2.2 跟踪的灵敏度

灵敏度的选取要适当,既能达到有效的跟踪目的,又不能频繁地动作调感。由公式(1),忽略电网的阻尼率,可得

$$U_{01} = \frac{U_{\text{um}}}{v_1} \quad (9)$$

$$U_{02} = \frac{U_{\text{um}}}{v_2} \quad (10)$$

$$U_0 = U_{01} - U_{02} = \frac{U_{\text{um}} v}{v_1 v_2} - \frac{U_{\text{um}} v}{v_1^2} = \frac{K_C U_\phi v}{v_1^2} \quad (11)$$

$$v = v_1 - v_2 = \frac{I_{C1} - I_L}{I_{C1}} - \frac{I_{C2} - I_L}{I_{C2}} - \frac{I_C}{I_{C1}} \quad (12)$$

式(11)中 U_{01} 、 U_{02} 、 v_1 、 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, U 为系统相电压, K_C 为不对称度。式(12)中, I_{C1} 、 I_{C2} 分别为运行方式变化前后的电容电流, I_L 为补偿电流。

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 电网, $K_C U = 12 \sim 90 \text{ V}$, $v_1 = -10\%$,根据式(11)、(12),

对不同容量的消弧线圈的灵敏度 (U_0) 的计算如下

$$30 \text{ A: } v = 1/30 \\ U_0 = 40 \sim 300 \text{ V}$$

$$50 \text{ A: } v = 1/50 \\ U_0 = 24 \sim 180 \text{ V}$$

$$70 \text{ A: } v = 1/70 \\ U_0 = 18 \sim 129 \text{ V}$$

$$90 \text{ A: } v = 1/90 \\ U_0 = 13 \sim 100 \text{ V}$$

为了适应高度平衡的电网 (K_C 较小) 的跟踪的需要,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表 3。

表 3 不同容量的 10 kV 消弧装置的灵敏度

Tab. 3 Sensitivity of 10 kV arc-suppression coils with different capacities

容量/A	30	50	70	90
跟踪灵敏度 U_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(架空),而对于 35 kV 的电网,切合的线路约有 10 km(架空);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,又能够有效地跟踪运行方式的变化。经如图 3 所示的模拟电网跟踪试验验证,即通过断路器 DL1 切合电容电流为 1 A 的电容器来模拟线路的切合,按照上表灵敏度设置的控制器能够准确地动作跟踪,后来又经挂网运行试验验证,都说明了以上灵敏度选取的可行性和实用性。

3 结语

保证测量的精确度是一个系统工程,涉及到理论推导、现场接线、硬件、软件等方方面面的问题,无论忽视哪一个环节,都将带来不必要的误差。本文在模拟试验和现场运行经验的基础上,详细分析了易被忽略的影响测量精确度的几个问题,并给出了误差修正公式以及安装接线中的应对措施;还讨论了如何消除扰动的影响,保证跟踪的准确度,以及灵敏度选取的计算方法。采用这些保证测量和跟踪精确度的措施的消弧线圈,近几年来已经有 100 多套投入运行,电容电流测量精度优于 3%,跟踪准确率高于 99%,实践证实了这些措施的良好效果。

参考文献:

- [1] 李景禄,林玉怀,陈忠仁,等(LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al). ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置(ZXB Series Arc Suppression Device with Automatic Following and Compensation) [J]. 中国电力(Electric Power), 1998, 31(8): 42-44.
- [2] 李福寿(LI Fu-shou). 中性点非有效接地电网的运行(Operation of Electric Power System with Neutral Ineffective Grounding) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1993.
- [3] 李景禄(LI Jing-lu). 自动跟踪补偿消弧装置的并联运行(Parallel Operation of Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus) [J]. 供用电(Power Supply and Use), 1998, 15(4): 25-28.
- [4] 吴运祥,吕军梅,孙月琴(WU Yun-xiang, LÜ Jun-mei, SUN Yue-qin). 增大电流互感器变比与减小电流互感器二次负担(Increasing the Change Rate of CT and Decrease the Secondary Load of CT) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(3): 52-55.
- [5] 李景禄,刘春生,胡毅,等(LI Jing-lu, LIU Chun-sheng, HU Yi, et al). 配电网自动跟踪补偿消弧装置(Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus Used for Distribution Net) [J]. 变压器(Transformer), 2000, 37(10): 33-37.

收稿日期: 2004-01-03

作者简介:

陈忠仁(1972-),男,硕士,工程师,研究方向为配电网自动化及智能仪器设计; E-mail: chenchen0520@sohu.com

吴维宁(1964-),男,教授级高工,所长,研究方向为电力系统监控;

陈家宏(1960-),男,教授级高工,研究方向为电力系统监控。

Study of measuring and tracing of arc-suppression coil with automatic tuning

CHEN Zhong-ren^{1,2}, WU Wei-ning², CHEN Jia-hong², DONG Hao-bin¹

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan High-voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Precisely measuring and tracing is a precondition and basis of arc-suppression coil with automatic tuning accurately compensating system capacitive current and efficiently quenching ground arc. Based on the simulation test and practical experience, this paper analyzes several problems of affecting measurement in detail, and presents the correcting formulas and countermeasures. In the end, the accuracy and sensitivity of tracing are discussed.

Key words: arc-suppression coil; measuring; tracing; neutral-to-ground voltage; out-of-resonance tuning

(上接第 23 页 continued from page 23)

Study of power system splitting criterion based on the variation of active power and its algorithm

CONG Wei¹, PAN Zhen-cun¹, ZHAN Jie¹, SUN Shi-zhu²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Luneng Jicheng Electronic Co., Ltd, Jinan 250001, China)

Abstract: The changing characteristics of electrical quantities especially the active power in system oscillation conditions are analyzed. Power system splitting criterion based on the variation of active power is proposed. A new microprocessor algorithm, which based on instantaneous sampling values, is developed and tested to meet the calculation requirement when system oscillation occurs. The simulation results show that this splitting criterion is independent of power system operation mode and grid structure, and can detect system oscillation reliably. The proposed microprocessor algorithm is fast, simple and reliable.

Key words: active power; variation; oscillation and splitting; instantaneous value; algorithm