

# 消弧线圈自动调谐原理的分析

王鸿雁, 何湘宁

(浙江大学电力电子技术研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 对消弧线圈的各种自动调谐原理进行了详细的分析和讨论, 提出了各种调谐方法的优缺点和调谐时应注意的问题。

**关键词:** 消弧线圈; 自动调谐; 电容电流; 谐振

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2002)04-0008-04

## 1 引言

近年来,随着城市电网的发展和配电网规模的扩大,电缆线路的增加,配电网对地电容电流也大幅度增加,如果从接地方式的角度来考虑限制电容电流,中性点经消弧线圈接地就是唯一的选择<sup>[1]</sup>。消弧线圈的补偿效果与其脱谐度有很大关系,调谐适当的消弧线圈才能达到理想的效果,而电网是要发生变化的,从而其单相接地电容电流随之变化,这就需要人们根据电网的变化来调整消弧线圈的补偿电流。这种工作不仅比较繁琐,而且在很多场合下人工很难及时准确地调谐消弧线圈,所以实现消弧线圈的自动调谐是非常必要的<sup>[2]</sup>。

## 2 消弧线圈自动调谐原理的分析

目前,已提出的自动调谐原理大体上可分为六类:谐振法、相位移法、电容电流间接检测法、附加电源法、模型法和注入信号法。下面详细分析各种调谐原理。

### 2.1 谐振法

$$\text{因为 } U_N = \frac{K_C U}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (1)$$

式中:  $U_N$  为投入消弧线圈后的中性点不平衡电压;

$K_C$  为电网的不平衡度,  $U$  为电网正常运行时的相电压;

$v$  为电网的脱谐度,  $d$  为电网的阻尼率。

一个电网的不平衡度和阻尼率是一定的,所以由上式可以知道,  $U_N$  的大小仅由脱谐度决定。当  $v = 0$  时,  $U_N$  为最大值,此时,接地电流为最小,为纯阻性电流。谐振法的原理就是通过调节消弧线圈的电感值,使  $U_N$  达到最大。该调节原理不用考虑电网的不平衡电压是因为电网对地电容不相等造成的。还是因为绝缘泄漏电阻不相等造成的,也不用

考虑相位关系。

进一步讨论式(1),并对  $v$  求导得:

$$\frac{dU_N}{dv} = K_C \frac{-v}{(\sqrt{v^2 + d^2})^3} U \quad (2)$$

式(2)说明  $U_N$  随  $|v|$  的变化呈单调递减的规律,对其求导可得:

$$\frac{d^2 U_N}{dv^2} = K_C \frac{2v^2 - d^2}{(\sqrt{v^2 + d^2})^5} U \quad (3)$$

$$\text{令 } \frac{d^2 U_N}{dv^2} = 0, \text{ 解得 } v = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} d$$

进一步分析表明,当  $v = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} d$  时,  $\frac{dU_N}{dv}$  具有极大值,也就是说当  $v = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} d$  时,  $v$  的变化对  $U_N$  的影响最大,而当  $|v|$  较大和接近零时,  $v$  的变化对  $U_N$  的影响较小,这是极值法的不足。然而,前面的分析也表明,极值法是很容易根据  $U_N$  的大小变化使  $v$  保持在  $\pm \frac{\sqrt{2}}{2} d$  以内,若用极值法调节,必须处理好脱谐度和阻尼率的关系。

### 2.2 相位角法

这一方法是在一相附加一小电容,通过测量  $U_N$  和附加电容相的相位来判断系统的补偿状态,其原理电路图如图1所示。经过分析,不难得出:

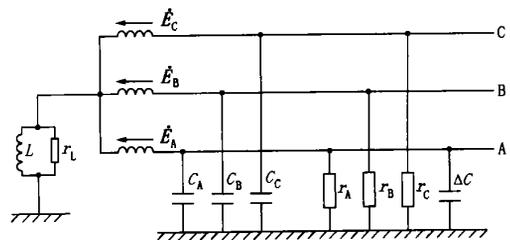


图1 相位法原理电路图

$$\frac{\dot{U}_N}{\dot{U}_A} = - \frac{K_C}{v - K_C - jd} = \frac{K_C}{\sqrt{(v - K_C)^2 + d^2}} e^{j \arctan \frac{-d}{(v - K_C)}} \quad (4)$$

$\dot{U}_N$  和  $\dot{U}_A$  之间的相位角为:

$$= \arctan \frac{-d}{(v - K_C)} \quad (5)$$

式中:  $v = \frac{3}{C} \frac{C - \frac{1}{L}}{C}$  为电网的脱谐度;

$d = \frac{1}{3RC}$  为电网的阻尼率, 其中,  $\frac{1}{d} = \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B}$

$$+ \frac{1}{r_C} + \frac{1}{r_L}$$

$K_C = \frac{C}{3C_A + C}$  为电网的不平衡度 (设  $C_A = C_B = C_C = C$ )

由此可见, 中性点位移电压  $\dot{U}_N$  和基准电压  $\dot{U}_A$  之间的相位关系与电网的脱谐度有关。

完全补偿状态下 ( $v = 0$ ):  $\dot{U}_N$  超前于  $\dot{U}_A$  为

$$i = 270^\circ + \arctan \frac{K_C}{d};$$

过补偿状态下 ( $v < 0$ ):  $\dot{U}_N$  超前于  $\dot{U}_A$  为

$$270^\circ + \arctan \frac{|v| + K_C}{d} > i;$$

欠补偿状态下 ( $v > 0$ ):  $\dot{U}_N$  超前于  $\dot{U}_A$  为

$$270^\circ + \arctan \frac{-|v| + K_C}{d} < i;$$

因此, 相位角的大小反映了电网的脱谐状态, 我们可以根据 (5) 式来实现消弧线圈对电网电容电流的自动跟踪补偿。

相位法原理存在的问题是, 在计算  $K_C$  时, 我们假设了  $C_A = C_B = C_C = C$ , 而实际情况并不一定是这样, 况且在运行过程中切除或投入部分线路时, 更增加了三相对地电容的不对称性, 使  $K_C$  的值不再是标量, 从而造成  $i$  值的难以确定。同样的道理, 三相电网对地绝缘电阻不对称也会影响  $K_C$ , 进而影响  $i$  的大小。这样就加大了检测的难度, 且每个电网的情况都不一样<sup>[3][7]</sup>。

### 2.3 电容电流间接检测法

该方法的基本思想是通过改变消弧线圈的电感值, 造成其两端电压发生变化, 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<sup>[4]</sup>。下面分别为其计算方法。

#### (1) 忽略电网阻尼率时的计算方法

设对应于分接头 T1 和 T2 时的中性点位移电压分别为  $U_{N1}$  和  $U_{N2}$ , 各分接头对应的消弧线圈电流值分别为  $I_{L1}$  和  $I_{L2}$ ,  $d = 0$ , 代入式 (1) 得

$$U_{N1} = \frac{K_C U_\phi}{(I_C - I_{L1}) / I_C} \quad (6)$$

$$U_{N2} = \frac{K_C U_\phi}{(I_C - I_{L2}) / I_C} \quad (7)$$

解得

$$I_C = \frac{I_{L2} - (U_{N1} / U_{N2}) \cdot I_{L1}}{1 - U_{N1} / U_{N2}} \quad (8)$$

从上式可以看出, 测得两次中性点电压后, 就可以求得电网三相对地总电容和消弧线圈脱谐度。实际应用中, 由于这种方法忽略了电网阻尼率以及  $U_{N1}$  和  $U_{N2}$  测量的不同时性, 测量结果准确性较差。

#### (2) 利用消弧线圈两分接头对应的零序电流相对相位差的计算方法。

我们知道, 脱谐度  $v$  由下式决定:

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{X_L - X_C}{X_L} \quad (9)$$

消弧线圈对应某一分接头的电抗是已知的, 但  $X_C$  没有测量, 故  $v$  不能直接计算出来, 然而我们可以通过分接头在 T1 和 T2 位置时, 零序电路阻抗三角形以及电流相位关系的变化间接求出来。零序等值回路如图 2(a) 所示, 分接头 T1 和 T2 对应电流  $I_{01}$

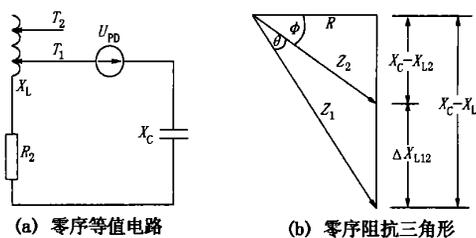


图 2 带串联阻尼电阻的零序等值电路及零序阻抗三角形

和  $I_{02}$  的相位关系以及相应的阻抗三角形如图 2(b) 所示。进行调谐时, 先测量分接头为 T1 时零序回路电流  $I_{01}$  和分接头为 T2 时  $I_{02}$  的相对相位差 (一般以线电压作为基准), 根据两个分接头 T1 和 T2 的电抗差  $X_{L12}$  和  $\phi$  角等关系, 可以计算出  $X_C - X_{L1}$  ( $X_{L1}$  为分接头为 T1 时的消弧线圈电抗), 最后可求得对应分接头为 T1 时的脱谐度  $v_1$ 。接着将算出的  $v_1$  和设定的标准值  $v_0$  进行比较, 若  $|v_1 - v_0|$  较小, 则原 T1 分接头不需调整。若  $|v_1 - v_0|$  较大, 则判断  $v_1 - v_0$  的符号, 根据该符号的正或负, 进行相应的分接头调

节。

该算法忽略了电网的阻尼率,使用时要注意使用条件,同时,由于算法中用到各分接头的电抗值,所以要考虑消弧线圈在端电压很小时的非线性失真问题。

### 2.4 模型法

电网电容电流由接入的线路总长度而确定,因此可以用合闸线路断路器的多少来计算电容电流。设电网共有  $n$  条线路,在模型上每一条线路相当于一个电阻,在这一电阻两端并联着与该线路断路器触头一致的触点,若线路接入,则电阻被短路。图 3 中左边的电阻串为电网中线路的模型,右边的电阻串为消弧线圈的模型。线路投入愈多,被短路的电阻愈多,因此经左边电阻串流到底部电阻  $R_b$  的电流越大在其上面的压降即为微分放大器的一个输入信号。微分放大器的另一个输入信号是消弧线圈模拟电阻串底部电阻  $R_b^*$  的电压降。若两信号差得多,放大后的电压超过继电器 KA 的动作电压就需要调整消弧线圈电感。否则,说明调谐度在允许范围内。这种方法的调节精度取决于线路模型及消弧线圈模型的精度。由于电网中某些线路的电容可能改变,即使电容不改变,测定其对地电容也很烦琐,另外系统的电容电流还受到其它电器设备的影响,所以建立线路模型不仅非常困难,而且在某些情况下不可能做得准确。

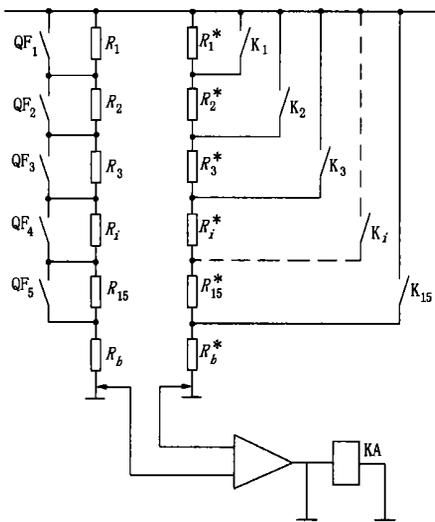
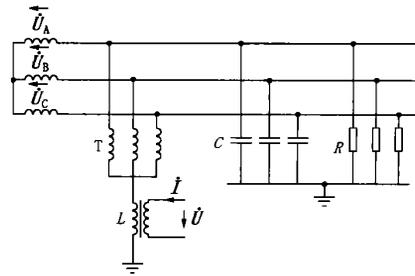


图 3 电网模型示意图

### 2.5 附加电源法

中性点附加电源法是在中性点的消弧线圈上附加一个信号源,用于附加信号源的变压器串联或并

接在系统零序回路中,相当于一个阻抗变换器,它反映了系统的零序回路阻抗的状况。因此,检测附加电压与电流之间的相位关系,即可实现自动调谐。附加电源法的调节原理如图 4 所示。从图 4 可以看出,附加电源  $\dot{U}$  会在消弧线圈上感应一个电压  $\dot{U}'$ ,该电压实际上就相当于一个零序电压。忽略消弧线圈原、副边漏电抗,其等效电路如图 5 所示。



$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ —电网三相电源电压; T—接地变压器; L—消弧线圈; C—电网每相对地电容; R—电网每相对地泄漏电阻;  $\dot{U}, i$ —附加电源的电压、电流

图 4 附加电源法调节原理

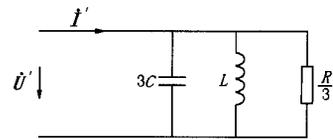


图 5 附加电源法等效电路

由图 5 知,当  $L = \frac{1}{3C}$  时,电流  $i$  与电压  $\dot{U}$  同相位(即  $i$  与  $\dot{U}$  同相位),实际上就是让该电路处于并联谐振状态,消弧线圈处于全补偿工作状态。当  $L < \frac{1}{3C}$  时,电流  $i$  的相位落后于  $\dot{U}$  相位,消弧线圈处于过补偿工作状态。当  $L > \frac{1}{3C}$  时,电流  $i$  的相位超前于  $\dot{U}$  的相位,消弧线圈处于欠补偿工作状态。只要检测  $i$  与  $\dot{U}$  的相位关系,调节消弧线圈的电感值并使两者的相位差足够小,就可以实现消弧线圈的电感电流对电网电容电流的自动跟踪。当电网发生单相接地时,接地电流就很小。

但是,这种调节原理存在的问题是:电网正常时偏移电压的影响。中性点经消弧线圈接地以后的电网,其偏移电压要将原来中性点不接地的自然偏移电压放大,电流  $i$  是电网偏移电压  $\dot{U}_0$  与附加电源电压  $\dot{U}$  共同作用的结果,为了减小  $\dot{U}_0$  对  $i$  的影响,必须让附加电源感应到消弧线圈回路的电压  $\dot{U}$  比  $\dot{U}_0$

大得多,但是  $U$  过大会在电网中造成各相对地电压不对称。虽不影响电网对负载的供电,但长期存在会对设备绝缘产生不良后果,还会引起各级接地(漏电)保护装置误动作。另外,电网正常运行时中性点位移电压对该方法调节精度影响较大,这些都限制了该方法的使用。

### 2.6 注入信号法

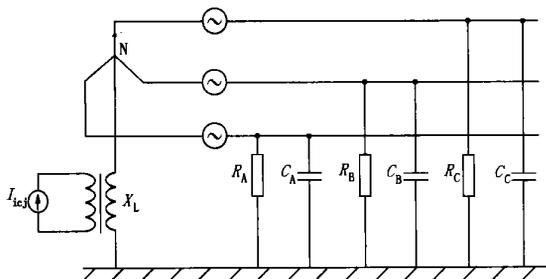
小电流接地系统的电容电流测量及消弧线圈自动跟踪调整是在系统正常运行时进行的,此时中性点位移电压较低,采用从消弧线圈上的零序电压互感器注入变频电流信号,测量系统电容电流<sup>[5][6]</sup>(接线图如图6)。等值电路如图7所示,其中

其中  $\begin{cases} X_L \gg X_1 \\ X_L \gg X_2 \end{cases}$

忽略  $X_1, X_2$ , 注入信号等值回路中消弧线圈感抗( $X_L$ )与三相电容(因三相对称,故  $C_A, C_B, C_C$  等效为  $3C$ )并联。通过改变注入信号的频率,使电感和电容发生并联谐振,找到系统的谐振频率  $f_0$ , 则:

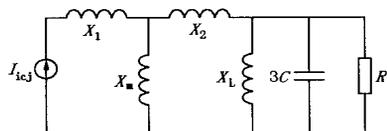
$$3C = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad (10)$$

式中  $\omega_0$  为谐振角频率。



$C_A, C_B, C_C$ —相对地电容;  $R_A, R_B, R_C$ —相对地泄漏电阻

图6 注入信号法测量电容电流接线图



$X_1$ :电压互感器副边漏抗  $X_2$ :电压互感器原边漏抗  
 $X_L$ :电压互感器励磁漏抗  $R$ :相对地泄漏电阻

图7 注入信号法测量电容电流等值电路图

则系统单相金属性接地故障时的电容电流为:

$$I_C = 3CU = \frac{U}{\omega L} \quad (11)$$

式中  $\omega$  为系统角频率;  $U$  为系统相电压。

此时的脱谐度为:

$$= \frac{I_C - I_f}{I_C} \times 100\% = \frac{(U/\omega_0^2 L) - (U/\omega L)}{U/\omega_0^2 L} = 1 - \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 = 1 - \left( \frac{f_0}{f} \right)^2 \quad (12)$$

式中  $f$  为系统频率(50Hz)。

由式(12)可以直接通过系统谐振频率计算脱谐度。

这种方法的调节精度取决于变频信号源的精度,这种变频信号源实际做起来是有一定的难度的。

### 3 结束语

以上方法各有优缺点,都没有达到完善的地步。其中,相位法、极值法和电容电流检测法有一定的运行经验,但应用都有局限性。相对来讲,随着微电子技术的发展,采用微处理器后,电容电流间接检测法具有优越性。而模型法、附加电源法和注入信号法尚无运行经验,只是做一些理论分析,应用到实际系统当中去,还要一段时间。

### 参考文献:

- [1] 赵智大. 电力系统中性点接地问题[M]. 中国工业出版社, 1965.
- [2] Griffel D, et al. A New deal for safety and quality in MV networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428 ~ 1433.
- [3] 张立伟. 小电流接地系统电容电流自动补偿原理的研究[J]. 煤炭科学技术, 1992, (9).
- [4] 蔡旭. 自动跟踪电容电流动态补偿系统的研究[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8).
- [5] 曾祥君. 基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术[J]. 电力系统自动化, 2000, (5).
- [6] 曾祥君. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, (1).
- [7] 徐玉琴, 郑玉成. 消弧线圈自动调谐原理的研究[J]. 河北电力技术, 1996, 15(4).

收稿日期: 2001-09-13; 修回日期: 2001-11-09

作者简介: 王鸿雁(1975-),男,在读博士,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用研究; 何湘宁(1961-),男,教授,博士生导师,IEEE高级会员,从事电力电子技术及其工业应用方面的研究和工程设计工作。

(下转第37页)

输,噪声能量容限则可以大大提高。

### 2.3 减少干扰其它问题

在静态继电器内部,干扰的传输途径既有沿着导线的传导,也有空间的辐射。如果内部没有单片机,则可以使信号工作在较低的频率上以减少空间的辐射。有单片机的情况下,尽量使用单片机内部的存储器和功能单元。宁可软件复杂一些,最好不使用带扩展芯片的单片机系统,这样内部的空间辐射就有可能降低。只要没有很高频的信号,就不会产生有害的辐射干扰和耦合传导。

对于来自自然环境中的电磁辐射干扰及电网传播的干扰,主要的措施是加强屏蔽措施和隔离措施。由于静态电器的元器件是安装在印刷线路板上的,因此印刷电路的设计是抑制电磁干扰的重要内容。有时在考虑了印刷电路的抗干扰问题后,还要重新设计原理电路,才能达到较高的抑制电磁干扰能力。电路板上的印制导线和金属化孔是关键部分。从电磁干扰的角度说,印制导线的厚度、宽度、长度、电阻、电感、电容值、电流容量及相邻导线间的串扰等因素决定了印刷电路的电磁兼容能力。板内的器件布局、印刷电路板的供电形式、板间连线等也是设计印刷电路时必须考虑的因素。

## 3 结论

静态电器和传统的电磁式继电器相比存在比较严重的电磁兼容问题。它本身既是一个对电磁干扰

较为敏感的电气设备,也是一个容易产生电磁干扰的噪声源。如不采取适当的措施,静态电器的可靠性会由于电磁兼容问题而受到影响。在电磁兼容的问题上,比较可行的措施主要是:

1) 降低噪声源的噪声强度;降低信号频率、改变信号波形是行之有效的方法。

2) 提高受扰器件的抗干扰能力;应采取一定的提高电器噪声能量容限的措施。

电磁干扰问题是一个复杂的问题,它们的形成原因和预防措施也是相当多的。但无论怎样,电磁兼容问题在设计时完全解决几乎是不可能的。最后的试验和使用对检验产品的电磁兼容性及可靠性有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 张松春,等. 电子控制设备的抗干扰技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [2] 沙斐. 机电一体化系统的电磁兼容技术[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [3] TI AC/ACT CMOS Logic Data Book[Z]. 美国:Texas Instruments Incorporated,1997.

收稿日期: 2001-03-23

作者简介: 蒋栋(1963-),男,在读博士,研究方向为电器可靠性技术; 李志刚(1958-),男,教授,博导,研究方向为电器可靠性及电子电器。

### The application of EMC technology in electronic device

JIANG Dong, LI Zhi-gang

(Hebei Industrial University, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** The electromangetic compatibility is important to reliability of electronic relay. From three hands, noise source, conduct path and interfered device, the method and technology are discussed to improve the electromagnetic compatibility of electronic device.

**Key words:** electronic relay; electromagnetic compatibility; reliability

(上接第11页)

### Analysis of automatic tuning principle about the arc-suppression coil

WANG Hong-yan, HE Xiang-ning

(Power Electronics Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Various automatic tuning principles for arc-suppression coil are discussed and analyzed in this paper, the merit and shortcoming of various automatic tuning method are presented, and the problem which should be noticed is presented.

**Key words:** arc-suppression coil; automatic tuning; capacitance current; resonance