

调匝式自动补偿消弧装置调谐测量原理研究

陈忠仁¹, 吴维宁², 张勤², 陈家宏²

(1. 中山职业技术学院, 广东 中山 528404; 2 武汉高压研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对调匝式自动补偿消弧装置现有调谐方法测量精度差、不能适应在牵手变电站中并联运行等问题, 提出了利用谐振法结合曲线拟合法测量系统电容电流的方法。该方法测量精度高, 调档数目少, 能自动并联, 无需相互通信, 适合在各种场合并联运行。模拟电网试验和现场运行试验结果令人满意。

关键词: 调匝式; 自动补偿消弧装置; 调谐原理

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)20-0049-04

0 引言

调匝式消弧线圈在我国应用最早。从早期的老式消弧线圈, 到近年来的自动补偿消弧装置, 调匝式消弧线圈在我国得到了广泛的应用, 运行人员也积累了丰富的运行维护经验。这是调匝式自动补偿消弧装置研制较早的原因, 也是其推广应用的良好基础。但目前电网中运行的此类产品, 多采用阻抗三角形法或者三点法来进行测量调谐^[1,2], 前者采集量多, 计算复杂, 且计算公式中忽略了线路阻尼率, 电容电流的计算精度不高; 后者虽然采集量少, 也考虑了线路阻尼率, 但测量时的调档和补偿时的调档分别进行, 大大增加了有载开关的动作次数。再者, 互感器对信号的幅值有一定要求, 当调谐到信号幅值较小的档位测量时, 互感器误差较大, 加上距离较长的电缆对信号的衰减作用, 使得电容电流的测量精度无法保证。这大大影响了调匝式自动补偿消弧装置的推广应用。

另外, 随着配电网的高速发展, 出现了变电站牵手运行的情况, 或者环网运行的情况, 不同变电站中消弧线圈并联运行的问题也随之凸现出来。调匝式自动消弧线圈目前多采用主从机并联方式^[3], 相互之间需要通讯, 这在同一变电站之间尚无问题, 但在不同变电站之间实现起来相当困难, 成本高, 也不可靠。并联方式是由测量调谐原理所决定的, 因而有必要探讨新的调谐方法, 来解决目前调匝式自动补偿消弧装置测量精度不高、并联困难等问题。

1 调匝式自动补偿消弧装置调谐测量原理

1.1 单机调谐测量原理

在调匝式自动补偿消弧线圈的研制中, 作者提出了一种新的方法, 即利用谐振法结合曲线拟合法

测量电容电流。一般来说, 采用谐振法测量电容电流的多是电感可连续调节的消弧线圈, 因此类消弧线圈可以直接找出谐振点^[4,5]; 而调匝式消弧线圈由于电感不连续, 无法直接找出谐振点, 但可以找出在谐振点附近的三个点, 由此三点拟合出曲线方程, 再求出该曲线极大值点(谐振点)处的感抗值, 此点容抗等于感抗, 计算得到电容电流。

由脱谐度 v 和位移电压 U_0 的公式,

$$v = \frac{X_L - X_C}{X_L} \quad (1)$$

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

其中: X_L 为消弧线圈感抗, X_C 为系统容抗, U_{un} 为系统不对称电压, v, d 分别为系统脱谐度及阻尼率。

当 $X_L = X_C$ 时, $v = 0$, 电网处于谐振状态, $U_0 = U_{0max}$; 而当 $X_L > X_C$ 或 $X_L < X_C$ 时, $v^2 > 0$, $U_0 < U_{0max}$ 。 X_L 偏离 X_C 愈远, U_0 愈小, 在 X_C 两边 U_0 呈现出急剧下降的趋势。在 $X_{Lmin} \sim X_L \sim X_{Lmax}$ 范围内, U_0 只有一个顶点, U_0 和 X_L 的函数关系可用抛物线近似表示, 如图 1 所示。

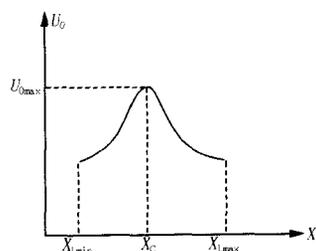


图 1 U_0 和 X_L 函数关系

Fig 1 U_0 and X_L function relation

$$U_0 = f(X_L) = aX_L^2 + bX_L + c \quad (3)$$

消弧线圈在各档的感抗 X_L 已知, 位移电压 U_0

可以测得。将谐振点左右 3 档的感抗值和位移电压值代入 (3) 式, 得到,

$$aX_{L1}^2 + bX_{L1} + c = U_{01} \quad (4)$$

$$aX_{L2}^2 + bX_{L2} + c = U_{02} \quad (5)$$

$$aX_{L3}^2 + bX_{L3} + c = U_{03} \quad (6)$$

联立式 (4~6), 解得

$$|D| = \begin{vmatrix} X_{L1}^2 & X_{L1} & C \\ X_{L2}^2 & X_{L2} & C \\ X_{L3}^2 & X_{L3} & C \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$|D_1| = \begin{vmatrix} U_{01} & X_{L1} & C \\ U_{02} & X_{L2} & C \\ U_{03} & X_{L3} & C \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$|D| = \begin{vmatrix} X_{L1}^2 & U_{01} & C \\ X_{L2}^2 & U_{02} & C \\ X_{L3}^2 & U_{03} & C \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$a = \frac{|D_1|}{|D|} \quad (10)$$

$$b = \frac{|D_2|}{|D|} \quad (11)$$

抛物线的顶点:

$$X_L = -\frac{b}{2a} \quad (12)$$

在此点, $U_0 = U_{0max}$, 为电网的谐振点, $X_C = X_L$, 即可求出系统电容电流。

在实际的调谐中, 选取最靠近谐振点的三点进行计算, 原因一是谐振点附近的位移电压幅值较大, 互感器误差小, 计算精度高; 二是谐振点附近的曲线最接近抛物线, 拟合误差小。为减少有载开关动作的次数, 将测量调谐与补偿调谐结合起来进行, 考虑到消弧装置一般为过补偿运行, 调谐测量时, 先使其档位下调 (补偿电流减小的方向), 再使其档位上调 (补偿电流增大的方向), 找到位移电压最大的三个点, 计算出电容电流; 再根据残流的要求, 计算出补偿电流, 确定补偿位置。一般情况下, 在测量结束后, 有载开关停留的位置即为合适的过补偿位置; 个别情况下, 有载开关再上调一个档位作为补偿位置。这样, 有载开关的动作次数较少, 无论对其机械寿命、电气寿命, 还是对电网的运行, 都是十分有益的。

2.2 多机并联调谐测量原理

由单机调谐测量原理知道, 采用谐振法, $X_C = X_L$, 即 $I_c = I_L$, 在系统有多台消弧线圈并联时, 每一台消弧线圈测得的电容电流都是其它消弧线圈补偿

后剩余部分, 即 $I_{cS} = I_L$ 。补偿电流在各台消弧线圈之间随机进行分配, 相互之间无需通讯联系, 各消弧线圈相互独立, 可随时加入新的消弧线圈并联运行, 不仅适应一个变电站内部各消弧线圈的并联运行, 而且适应牵手变电站之间的各消弧线圈并联, 适应电网的能力很强, 但必须有状态识别功能, 即能识别出线路投切状态 (运行方式改变) 与消弧线圈的调谐状态。因为在这两种情况下, 消弧装置的观测量如系统的脱谐度、位移电压等都会发生改变, 如何将这两者区分开来并进行相应的处理, 是状态识别功能的关键。经过大量的观测、试验和现场运行, 获得了调谐状态和线路投切状态各自不同的特点: 在线路投切状态, 观测量始终是稳定的变化; 而在消弧线圈的调谐状态, 观测量始终是不稳定的变化。根据这些特点, 在软件里采取措施, 如观测量是稳定的变化, 则判断为线路投切状态, 将有一台消弧线圈率先启动调谐跟踪, 观测量开始不稳定的变化, 其它消弧线圈因调谐动作稍慢, 判断系统处于调谐状态而闭锁。这样, 任何时候系统将只有一台消弧线圈进行调谐, 其它消弧线圈处于闭锁状态。可见, 状态识别功能是自动并联的关键, 否则就会造成各消弧线圈“争先恐后 轮番调谐、无法停歇的混乱现象。

多台消弧线圈并联的等效电路如图 2 所示^[6], 其自动并联调谐原理如下:

假设系统有 n 台消弧线圈, 在运行方式发生改变后, 某一个随机时刻 t_i , 假设第 1 台消弧线圈率先启动调谐跟踪, 其它的 $n-1$ 台闭锁不动, 由图 2 知, 第 1 台消弧线圈测得的电容电流为其它的 $n-1$ 台消弧线圈补偿后的剩余部分 I_{cS1} , 即^[7]

$$I_{cS1} = I_c - \sum_{i=1}^{n-1} I_i \quad (13)$$

设第 1 台消弧线圈的补偿电流的调节范围为 $I_{Lmin} - I_{Lmax}$, 若

$I_{cS1} > I_{Lmax}$, 则调谐至上限位置;

$I_{cS1} < I_{Lmin}$, 则调谐至下限位置;

$I_{Lmin} < I_{cS1} < I_{Lmax}$, 则调谐至设定的脱谐度 1 处, 即

$$I_{L1} = (1 - v_1) I_{cS1} \quad (14)$$

第 1 台消弧线圈调谐完毕后, 不管其调谐至哪个位置运行, 脱谐度相对于调谐前都有一个变化量, 反映在位移电压上亦有一个变化量 U_0 。若这个变化量小于跟踪灵敏度的设定值, 则其它的消弧线圈不再进行调谐; 否则, 则在第一台消弧线圈调谐完毕后的某一个随机时刻 t_j , 将有另一消弧线圈假设为第

2台率先启动调谐跟踪,其它的消弧线圈因启动稍慢于第2台消弧线圈而被状态识别程序闭锁。

设第2台消弧线圈补偿电流的调节范围为 $I_{2min} - I_{2max}$,可得到类似的公式

$$I_{CS2} = I_C - \sum_{i=2}^n I_{Li}$$

$$I_{L2} = (1 - \nu_2) I_{CS2}$$

这样的过程重复下去,直至脱谐度或者位移电压的变化量小于设定的跟踪灵敏度的大小,调谐结束,系统达到动态的平衡,各台消弧线圈的补偿电流随机分配,调谐次数将取决于设定的跟踪灵敏度的大小,灵敏度越高,调谐次数越多,反之则越小。若灵敏度设定比较合适的话,则既能达到良好的补偿状态,又能使调谐次数尽量少,从而有利于电网的运行;但调谐的总次数不会超过 n 次 (n 台并联,每台平均调谐不超过一次)。

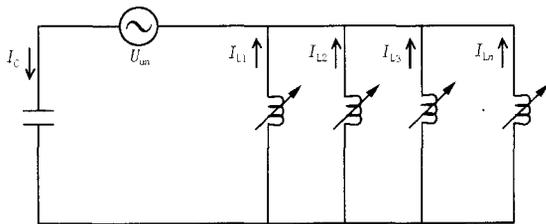


图2 消弧线圈并联运行的等效电路

Fig 2 Equivalent circuit of parallel operation of arc-suppression coils

1.3 单机调谐测量及多机并联调谐测量试验

在实验室用调压器、升压变压器和高压电容器建立了等效的模拟电网,以电容器(集中参数)模拟线路分布电容,用升压变压器升压到额定线电压,接入接地变压器和消弧线圈。试验接入的消弧线圈共分15档,补偿电流的调节范围为:30~80A,每调节一档补偿电流变化3.6A。单机调谐测量试验数据如表1所示。

表1 单机调谐测量试验

Tab 1 Tuning and measuring test with one arc-suppression coil

项目 组数	相对地电容 / μ F			相电 压 /V	电容电流 /A		测量精 度 / (%)	补偿 档位
	C_{A0}	C_{B0}	C_{C0}		实际值	测量值		
1	5.64	5.64	5.68	6000	32.0	32.7	2.2	2
						31.8	0.6	2
						32.2	0.6	2
2	7.51	7.48	7.57	6000	42.5	43.7	2.8	5
						41.9	1.4	5
						41.6	2.1	5
3	11.25	11.10	11.30	6000	63.4	62.7	1.1	11
						65.2	2.8	11
						65.1	2.7	11

由表1知,调匝式消弧线圈采用新方法测量电容电流的精度优于3%,重复性好。在试验中发现,除开机第一次调谐测量调档数稍多外,其它时间调谐测量调档数不超过5档。不仅要减少调谐时的调档数,还应减少因系统扰动而引起的误调谐,以延长有载开关的机械和电气寿命,减少对电网正常运行的干扰。

将两台接地变压器并联接入模拟电网,两台消弧线圈分别接在接地变的中性点上。调节调压器,使模拟电网电压升到10kV,开启控制系统,得到如表2所示的多机并联试验数据。

表2 多机并联调谐测量试验

Tab 2 Tuning and measuring test with parallel operation of two arc-suppression coils

次数	消弧线圈 编号	相对地电容 / μ F			电 压 /V	电容电流 /A		测量精 度 / (%)
		C_{A0}	C_{B0}	C_{C0}		测量值	实际值	
1	01	11.25	11.10	11.20	6000	38.3	63.4	2.4
	02					26.6		
2	01	11.25	11.10	11.30	6000	37.8	63.4	2.5
	02					27.2		
3	01	11.25	11.10	11.20	6000	36.5	63.4	2.0
	02					28.2		

由表2可知,两台消弧线圈并联所测得的系统总电容电流误差小于3%,重复性好,并联时一台调谐则另一台闭锁,动作稳定有序,在各调谐一次后即达到动态的平衡,测出了电容电流后,在各自的补偿位置上稳定下来。

2 结语

采用新的调谐方法的调匝式消弧装置已经有数台在现场运行,运行状态稳定,电容电流测量精度优于3%,调谐时调整档位数目少,能自动进行并联,相互之间无需通讯,适应各种并联运行场合。模拟试验和现场运行都表明了新方法的可行性和实用性,相对于调匝式消弧装置现有的调谐方法是一个进步和提高,具有很好的应用价值。

参考文献:

[1] 李锋,傅正财,江秀臣,等.调匝式消弧电抗器的自动调谐[J].上海交通大学学报,1996,30(1):70-77.
LI Feng, FU Zheng-cai, JIANG Xiu-chen, et al Automatic Resonance Adjustment of Multitap Arc-suppression Coil [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30 (1): 70-77.

[2] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏,等.自动消弧装置新型测控系统的研制[J].继电器,2005,33(1):64-67.

- CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong, et al Development of a New Measuring-control System of Automatic Arc-suppression Device [J]. Relay, 2005, 33 (1): 64-67.
- [3] 蔡旭,李仕平,杜永忠,等. 变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线装置 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 85-90
- CAI Xu, LI Shi-ping, DU Yong-zhong, et al An Integrated Controller of Multi-tap Arc-suppression with Variational Damp and Detection of Earth Fault Feeder [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (10): 85-90
- [4] 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
- CAI Xu, LIU Jie Dynamic Resonance Adjusting Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (15): 53-56
- [5] 李景禄,林玉怀,陈忠仁,等. ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置 [J]. 中国电力, 1998, 31 (8): 42-44.
- LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al ZXB Series Arc Suppression Device with Automatic Following Compensation [J]. Electric Power, 1998, 31 (8): 42-44.
- [6] 李景禄,刘春生,孙春雷,等. 自动跟踪补偿消弧装置
- 的并联运行 [J]. 供用电, 1998, 15 (4): 25-28
- LI Jing-lu, LIU Chun-sheng, SUN Chun-lei, et al Parallel Operation of Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus [J]. Distribution & Utilization, 1998, 15 (4): 25-28
- [7] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏,等. 自动补偿消弧装置并联运行方式 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (3): 41-43.
- CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong, et al Study on Parallel Modes of Automatic Compensation Arc-suppression Device [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (3): 41-43

收稿日期: 2005-02-25; 修回日期: 2005-07-18

作者简介:

陈忠仁 (1971 -), 男, 工程师, 研究方向为配电网自动化技术; E-mail: chenchen0520@163.com

吴维宁 (1964 -), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统监控技术和电磁兼容技术;

张勤 (1958 -), 男, 高级工程师, 研究方向为高压测量和电力系统自动化。

Study on tuning principle of multi-tap automatic compensation arc-suppression device

CHEN Zhong-ren¹, WU Wei-ning², ZHANG Qin², CHEN Jia-hong²

(1. Zhongshan Polytechnic College, Zhongshan 528404, China;

2. Wuhan High Voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of some problems on forthcoming tuning method, such as low measurement accuracy and not being adaptive to parallel operation in ring distribution system, this paper proposes a new tuning method for multi-tap automatic compensation arc-suppression devices, using resonance method coupling curve-fitting. With the new method, high measurement accuracy is acquired and parallel operation of arc-suppression coils in ring distribution system is easy to implement. It needs no communication between each other. The experiment and operation results are satisfactory.

Key words: multi-tap; automatic compensation arc-suppression device; tuning principle

(上接第 48 页 continued from page 48)

H_2/H guaranteed cost control of excitation system

CAI Chao-hao

(Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In the paper, the design of excitation controller for single-machine infinite-bus power system based on H_2/H guaranteed cost control theory and direct feedback linearization is presented. The robust control model with uncertain parameters is established. The H_2/H control rule is obtained by MATLAB/LMI toolbox. The analysis demonstrates the control method possesses good adaptability and robustness. It can improve the stability of the power system and satisfy the requirement of voltage regulation accuracy.

Key words: excitation controller; H_2/H guaranteed cost control; LMI approach