

谐振接地系统低压模拟环境的研究与实现

邱纪星, 姜铁卫, 夏 磊

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210061)

摘 要: 为了深入研究谐振接地系统的运行特点, 检验消弧线圈控制装置的各项性能指标, 本文提出了一种低压模拟环境的研究思路和实现方法, 详细介绍了低压试验环境的技术参数和主要部件的实现方法。利用低压模拟环境可以对消弧线圈控制装置进行各项功能性试验, 包括系统电容电流测量试验、自动调谐试验、自动跟踪试验及单项接地等多项试验, 很好地指导了谐振接地系统的研究应用工作。

关键词: 消弧线圈; 低压模拟环境; 研究; 实现

0 引言

我国 6~66kV 电网多为中性点谐振(经消弧线圈)接地的方式, 这是由于该接地方式具有接地电容电流小、人身安全事故少、供电可靠性高等诸多优点^[1]。目前, 调匝式的消弧线圈应用最为广泛。但在研究中, 缺乏对消弧线圈的动态性能及补偿效果的深入分析和试验论证, 这些给成套装置的技术研究与工程应用带来了一系列问题。因此, 对消弧线圈进行性能测试的试验环境的建设已变得很有必要。

实际中, 可以用仿真软件开展某些研究工作, 其实现简单、成本低、调试方便, 但仿真软件毕竟与实际运行情况有所差别, 而且对外没有 I/O 接口, 无法与实际控制装置形成闭环试验回路。也可以搭建高压模拟试验环境进行验证^[2-3], 但高压模拟环境所需的一次试验设备的费用高, 占地面积大, 试验周期长。考虑到通常情况下仅对消弧线圈控制装置在谐振接地系统中的运行情况及其各项性能指标进行分析验证, 可在低压系统中搭建模拟环境, 这与利用高压模拟环境进行研究分析工作的效果等效。在低压环境里同样能够模拟谐振接地系统的各种运行状态, 并能够进行电容电流测算试验, 自动跟踪试验、自动调谐试验等功能性试验, 为消弧控制技术的深入研究提供方便有效地验证手段。

1 低压模拟环境的理论分析

1.1 可行性分析

当消弧线圈投入运行后, 谐振接地系统在正常运行情况下, 消弧线圈的电感与电网的三相对地电容构成电压调谐回路, 如图 1 所示。

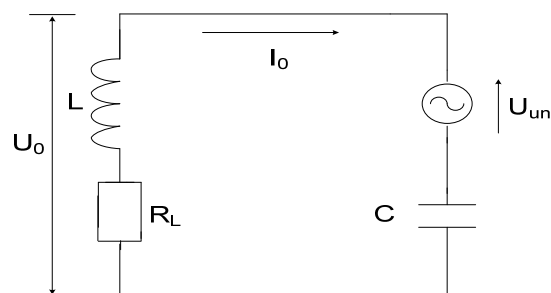


图 1 谐振接地电网正常运行时的等值回路

图 1 中, L 为消弧线圈的电感, R_L 为消弧线圈损耗电阻, C 为三相对地等效电容, 零序回路中的电源只有三相不平衡电压 U_{un} , 实际运行中, 三相不平衡电压比较小。依据中性点位移电压计算公式:

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

式 (1) 中, v 为脱谐度, $v = \frac{X_L - X_C}{X_L} = \frac{I_C - I_L}{I_C}$, 与

消弧线圈感抗值 X_L 和系统对地容抗值 X_C 有关, 反映消弧线圈对电网的补偿状态; d 为阻尼率, 与线路结构参数有关, 正常电网的阻尼率约在 2%~5%^[1]。

在模拟试验环境中, 可以通过调压器调节三相不平衡电压; 通过对可调电感的控制使系统工作在过补偿状态, 使脱谐度的变化满足实际要求; 改变阻尼电阻的阻值可以改变系统的阻尼率, 阻尼率定义为: $d_r = \frac{g_R}{\omega(C_A + C_B + C_C)} = \frac{X_C}{R'}$ (其中系统确定后 X_C

固定不变)。

380V 系统与 10kV 和 35kV 系统相比, 影响中性点位移电压 U_0 的因素只有三相不平衡电压 U_{un} 不同, 其余两个因素(脱谐度和阻尼率)均与电压等级和系统容量无关。因此完全可以利用 380V 系统模

拟实际现场的中性点位移电压变化情况，只需将所测的中性点位移电压值折算至实际电压等级即可。

1.2 试验环境的技术参数

建设 380V 电压等级的模拟环境，该模拟环境可以任意调节三相电压的不平衡程度、消弧线圈的补偿位置和阻尼电阻的大小，从而可以模拟实际现场的运行状态，为消弧线圈控制技术的开发研究提供依据。

该模拟实验环境主要由一组调压器（由三个单相调压器组成），一个隔离变压器，对地电容，可调电感，可调电阻和开关组成。

具体技术参数如下：

- 1) 电源要求：三相交流 380V。
- 2) 调压器柜：由 220V/20A 单相调压器组成，无级手动调节电压。
- 3) 400V/400V，D/Y0 接线。
- 4) 对地电容：模拟的系统的电容电流为 10A。
- 5) 可调电感：220V，11 档，3.5kVA (15.9A)，模拟调匝式消弧线圈。
- 6) 阻尼电阻：阻值 0~50Ω 可调，500W，配置投切继电器，用于一次阻尼。
- 7) 母线 PT：测量 A，B，C 三相的相电压和零序电压。
- 8) 测量 CT：测量流过电感的电流。

根据模拟环境的设计要求， $I_C=10A$ ，设计使 I_L 最大 15.9A，这样消弧线圈工作时脱谐度的变化范围可达 0~59%，满足要求。根据阻尼率定义：

$$d_R = \frac{g_R}{\omega(C_A + C_B + C_C)} = \frac{X_C}{R'} \quad , \quad \text{其中 } X_L = \frac{U_p}{I_L} = \frac{220}{15.9} = 13.84\Omega \quad ,$$

$$R' = R + \frac{X_L^2}{R} = 10 + \frac{13.84^2}{10} = 29.15\Omega \quad , \quad \text{模拟环境的所以最大阻}$$

$$\text{尼率 } d = \frac{1}{R} \times \frac{U_p}{I_C} = \frac{1}{29.15} \times \frac{220}{10} = 75.5\% \quad , \quad \text{即大于实际系统的}$$

阻尼率，满足要求。

2 低压模拟环境的建立

2.1 低压模拟环境的搭建

在实验室搭建的低压模拟电路，见图 2。

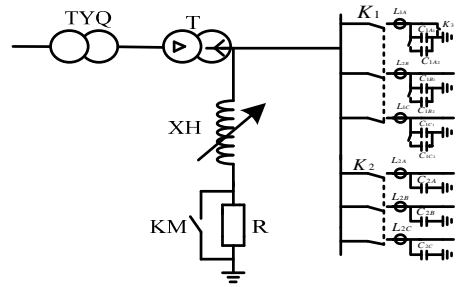


图 2 低压模拟实验的一次接线原理图

该模拟实验环境是一套 380V 电压等级的系统，共设有 1 段母线，2 条出线，每条出线从电流互感器穿过。调压器 TYQ 由三个单相调压器组成，可以无级手动调节电压，主要用于调节中性点的位移电压。变压器 T 采用 D/Y 形接法，目的是在二次侧引出中性点，用于接低压可调电抗器（消弧线圈）XH；由于一次绕组采用了 D 接法，变压器的零序阻抗较小，使消弧线圈在单相接地故障时出力最大。每条出线均接有低压自愈式电容器 C 以模拟线路对地的分布电容，电容器参数如表 1 所示，表中 C_{A0} ， C_{B0} ， C_{C0} 分别表示三相对地电容。1# 出线接有两组电容器，其中一组可用空气开关或交流接触器进行投切控制，2# 出线接有一组电容器。试验过程中为改变系统的运行状态，可用空气开关 K1、K2 进行线路的投切控制。为模拟单相接地试验，可以将交流接触器 K3 的常开触点接在任一出线的某一相上（图中接在 1 号出线），用按钮控制交流接触器线圈得电与否，从而控制电网接地与否。阻尼电阻 R 在接地发生时应立即短接退出，以减小补偿回路中的电阻值，增大消弧设备输出的补偿电流及防止因电阻过热而危及运行安全。故在 R 两端并联交流接触器 KM 的常开触点，以控制电阻的投切。

表 1 电容器参数的选择（相电压 220V）

投入组数	三相对地电容		
	$C_{A0}/\mu F$	$C_{B0}/\mu F$	$C_{C0}/\mu F$
1	30	30	30
2	16	16	16

2.2 可调电抗器的设计

高压电抗器结构为一个绕组引出若干抽头，档位的调整通常使用有载开关。有载开关的调整通常依靠内部所装电机的正反转来实现，故控制装置需要输出相应的正反转控制信号，并在调档结束后将有载开关的开关量信号读入到控制装置中来，从而

判断出当前所处档位。而该试验用到的低压电抗器为制造方便，不是采用一个绕组引出的若个抽头的形式，而是采用若干绕组的组合，这就使得档位的调整需要使用交流接触器来模拟代替有载开关。低压电抗器内部结构见图 3。参数选择 250V/4kVA-5-15A(电感电流)，首末端 A、X 之间分别并联有 11 个电感值不同的绕组，由联结在支路上的交流接触器 J1~J11 进行开闭的组合，在同一时间只能有一只交流接触器吸合，各档的电感参数如表 2 所示。

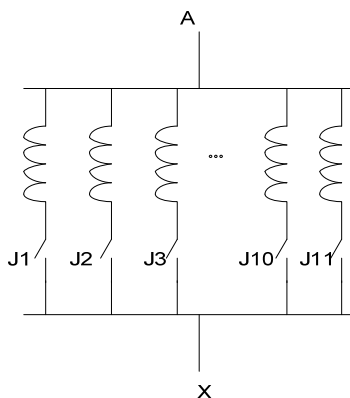


图 3 低压电抗器结构

表 2 低压电抗器各参数

档位	电感量 L/mH	感抗 X_L/Ω	电感电流 I_L/A
1	46.7	14.4	5
2	56.7	17.8	6
3	66.7	20.9	7
4	76.7	24.1	8
5	86.7	27.2	9
6	96.7	30.4	10
7	106.7	33.5	11
8	116.7	36.6	12
9	126.7	39.8	13
10	136.7	42.9	14
11	146.7	46.1	15

在低压模拟环境中，通过控制交流接触器模拟电机的正反转即调档过程，需增加额外的驱动电路。在实际中主要借助单片机及继电器-接触器电路完成消弧线圈的上调、下调工作，并且该驱动电路输出当前档位的开关量信号到控制装置。其硬件原理如图 4 所示。继电器单元由 11 只继电器组成，每只含有 2 对常开触点，一对常开触点闭合后驱动对应档位的交流接触器，另一对作为档位开关量信号送入控制装置。

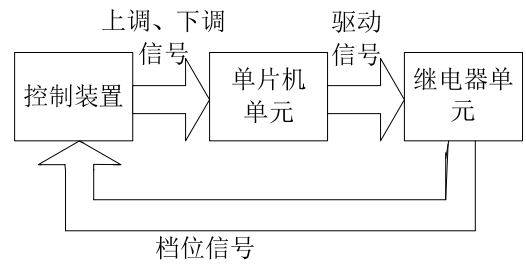


图 4 档位驱动控制电路原理框图

单片机单元及继电器单元工作时的软件流程如图 5 所示。

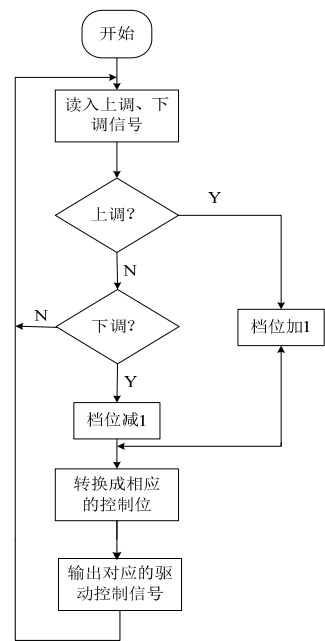


图 5 驱动单元软件流程图

2.3 阻尼电阻的选取

在实际系统中，阻尼电阻柜主要包括阻尼电阻、短接控制器以及保护回路等部件。在电网正常运行和发生弧光接地时，消弧系统的阻尼电阻一直串接在回路里，以便在消弧线圈调谐时，在过谐振点的情况下限制电网位移电压，避免系统谐振；只有在电网发生单相接地时，短接控制器才将其短路退出，这样一方面减少了补偿回路中的电阻值，增大了消弧设备输出的补偿电流；另一方面防止因阻尼电阻过热而危及运行安全。在该试验环境中，综合考虑功能及成本要求，选用滑线变阻器作为阻尼电阻。

3 消弧线圈控制装置试验系统的实现

在低压模拟环境搭建完成之后，在实验室进行

了各项功能试验。试验系统原理如图 6 所示。中性点不平衡电压过小时, 装置无法完成电容电流测算及跟踪调谐功能, 因此试验之前通过调压器使模拟环境正常工作时中性点电压维持在 $4\%U_r$ (U_r 系统相电压)。

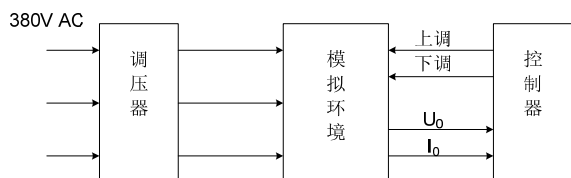


图 6 消弧控制装置试验系统图

主要完成了以下试验:

1) 电容电流测算试验

在电容电流测量试验时, 投入线路 1 和线路 2, 电容器组 1 和 2 都投入运行, 测得电容电流的测算值与理论值之间误差小于 0.5% , 满足实际的要求。

2) 自动调谐试验

消弧装置在系统正常运行的情况下, 能够完成自动调谐过程, 在试验中投入线路 1 和电容器组 1, 装置能够在完成调谐测算电容电流的过程后, 预调至合适的补偿档位。但装置的脱谐度计算存在一些误差, 这应该是测量误差造成的, 并且自动调谐过程的主要任务是调节消弧线圈至合适的档位, 脱谐度起辅助的指示功能, 只要在合适的范围内即可。

3) 自动跟踪试验

至于跟踪试验, 可在投入 1 号电容器运行后, 再投入 2 号电容器组。该试验验证了消弧装置能够根据 U_0 的变化情况, 判断系统运行状态是否发生了

改变, 不论切线路还是投线路, 装置都能进行跟踪, 能准确的把消弧线圈调节到合适的补偿位置。

4) 单相接地试验

在模拟单相接地时, 控制装置能够在保证系统安全可靠运行的基础上, 通过调节消弧线圈的参数, 使接地点的残流发生变化, 这个变化电流主要在故障线路中体现出来。

4 结论

本文研制的低压模拟试验环境, 通过试验验证可以很好的进行消弧线圈控制装置的各项功能试验, 包括系统电容电流测算、自动调谐、自动跟踪及单相接地试验等, 为谐振接地系统的研究提供了有效保证, 该试验环境具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈忠仁, 吴维宁, 陈家宏. 配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 85-87.
- [3] 汪军, 蔡旭, 金之俭等. 用于消弧线圈性能试验研究的高压模拟电网[J]. 华北电力技术, 2007(2): 22-25.

作者简介:

邱纪星 (1988—), 男, 江苏南京人, 助工, 从事配电网谐振接地系统的研究。