电容器组电容量检测及智能平衡配置装置的研制

针对目前电容器组电容量测量普遍采用拆除引线后进行测量，工作量大、恢复时易造成接线错误以及电容器人工配平计算量大、耗时长且准确度低的问题，采用电容器不拆头的测量技术，同时根据不同保护接线方式下整定要求，计算相间或段间电容量偏差，并以此偏差作为基于人工智能平衡配置的判据，研制了电容器组电容量检测及智能平衡装置。现场实际使用情况证明了该装置能较好地提高工作效率。

柯于刚／江苏省电力公司检修分公司无锡分部
顾文雯／江苏省电力公司无锡供电公司电力调度中心

柯于刚／高级工程师

关键词/Keywords
电容器·
不拆头·
保护接线方式·
智能配平·
禁忌搜索·

电力电容器是电力系统无功补偿的重要设备，但是由于电容器的运行环境具有“高场强、满荷载且频投切”的特点，电容器故障时有发生，作为常规检测手段需进行电容量测量。电容器组都是通过电容单元的串并联连接的，所以一般电容表测试电容量需将引线拆除后才能测量，工作繁琐，而且容易造成接线错误，尤其是框架式电容器组内电容器单元数量多，检测工作量很大。另外，大量电容器安装设计时或故障电容器（组）更换后，为满足不同保护接线方式下整定的要求，需要对电容器组进行平衡配置。传统的人工手算方式或简单排序后组合的方法满足不了省时和准确度的要求。

不拆头的电容量测量原理及方法

采用电流电压法测量电容量。如图1所示。

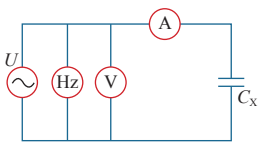

图1　电容量测试原理图

图1中，U为工频测试电源，为测量提供试验电压源；V为交流电压表；A为交流电流表；C_X为被测电容器；Hz为频率表。电压表测得被测电容器两端的电压值，电流表测得流过被测电容器的电流。根据欧姆定律及电容器阻抗公式可计算得到被测电容器的电容量

$$C_X = \frac{I_X}{\omega U_X} \qquad (1)$$

式中，C_X为被测电容器的电容量；I_X为流过被测电容器的电流；U_X为被测电容器两端的电压；ω为试验角频率。

为了实现电容器组不拆引线进行测量电容器电容量的目的，电路中电流表采用高准确度钳形电流夹，测量时只需将钳形电流夹卡在被测单元电容器的引出线处，即可在不拆出引线的情况下测量流过被测电容器的电流。改变钳形电流表的位置，可得到单个或几个电容器串并联的总电容量。

不同保护接线方式下的电容量偏差分析

目前，电力系统中较常见的保护方式有：中性点不平衡电流保护、开口三角电压保护、电压差动保护和桥差不平电流保护。由于篇幅限制，仅以电压差动保护为例，如图2所示。

整定计算公式[1]（用熔断器保护）

$$\Delta U = \frac{3KU_{EX}}{3N(M-K)+2K} \qquad (2)$$

$$K = \frac{3MN(K_V-1)}{K_V(3N-2)} \qquad (3)$$

中国知网　https://www.cnki.net

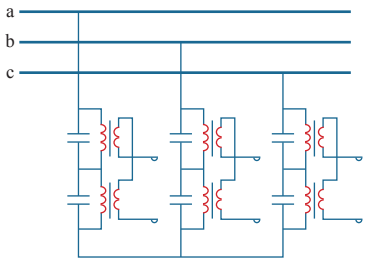

图2 电压差动保护接线图

式中，M为一相中单元的并联数；N为一相中单元的串联数；K为一段中切除的元件数；U_{EX}为电容器组额定相电压；ΔU为不平衡电压；K_V为完好元件的过电压倍数，$K_V=1.1$。

采用不平衡电压保护时，每相电容器一般分为两段，每段电容量相等同时每相电容量相等。由于不平衡电压保护只与每相的两段电压U_1和U_2有关，因此保护量为$\Delta U=U_1-U_2$。单相电压差动保护接线图如图3所示。

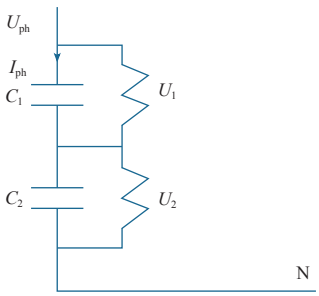

图3 单相电压差动保护接线图

设$C_1=C_2=C$（C为额定电容量），C_1产生偏差ΔC_1，C_2产生偏差ΔC_2。

$$C_{总}=(C_1+\Delta C_1)(C_2+\Delta C_2)/(2C+\Delta C_1+\Delta C_2) \quad (4)$$

$$\Delta U=U_1-U_2=U_{ph}(\Delta C_1-\Delta C_2)/(2C+\Delta C_1+\Delta C_2) \quad (5)$$

将二次整定的电压保护值取一定的裕度并归算到一次后代入ΔU即可求出段间电容量的允许偏差。根据四种不同保护接线方式得出四种确定的保护方式定值下各类串、并联接线时相与相间、段与段间的电容量允许偏差值，作为电容器的平衡配置的依据。

分组平衡原理及配置算法

电容器组的平衡配置问题类似于车辆路径问题，非常适合利用一些智能优化算法如遗传算法、禁忌搜索算法和蚁群算法等求解该类问题[2]。禁忌搜索算法具有强大的全局搜索性能，而局部搜索具有分散性；蚁群算法的正反馈机制使其在搜索过程中具有强大的局部搜索性能。本文采用将二者结合的策略，充分利用蚁群算法的正反馈机制来弥补禁忌搜索算法局部搜索的分散性，使禁忌搜索算法进行集中化的局部搜索，以此来提高其局部搜索性能[3]。

1. 禁忌搜索算法

禁忌搜索（TS）算法是一种全局性邻域搜索算法，模拟人类具有记忆功能的寻优特征。它通过局部邻域搜索机制和相应的禁忌准则来避免迂回搜索，并通过破禁水平来释放一些被禁忌的优良状态，进而保证多样化的有效探索，以最终实现全局优化。

2. 蚁群算法

蚁群算法又称蚂蚁算法，是一种用来在图中寻找优化路径的机率型算法。它由Marco Dorigo于1992年在他的博士论文中提出，其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。蚁群算法是一种模拟进化算法，具有本质并行性，易于并行实现；易于与其他方法结合，蚁群算法很容易与多种启发式算法结合，以改善算法的计算速度。

3. 平衡算法的模型

设A、B和C三相电容器的总个数为P，根据保护接线方式不同，将P个电容器分成个数相等的Q个小组，根据不同的保护接线建立相应的目标函数，以电压差动保护为例，每相分成两段，此时$Q=6$。分别用C_{A1}、C_{A2}、C_{B1}、C_{B2}、C_{C1}和C_{C2}表示该小组P/Q个电容器电容量之和。目标函数为

$$\mathrm{Min}(C_{A1}-C_{A2})^2+(C_{B1}-C_{B2})^2+(C_{C1}-C_{C2})^2 \quad (6)$$

收敛条件为每相上下部分电容量的偏差小于所设置的平衡准确度。为了使各电容器组达到平衡条件，对每小组里面的子电容进行采用两两交换（2－opt）方式构件领域。如果这个领域属于达不到平衡条件的放入禁忌表，防止重复搜索。如果不是则用跌代法进行下一步探索，最后得到P个

中国知网 https://www.cnki.net

电容器的分配方案。

电容器组电容量检测及智能配平装置的功能实现

仪器研制的目标要完成两大功能：①能在不拆引线的情况下测量单个电容器电容量的功能；②需具备将各种不同连接方式下的电容器组进行自动平衡配置的功能。

1. 电容器电容量检测功能实现

工作原理图如图4所示。

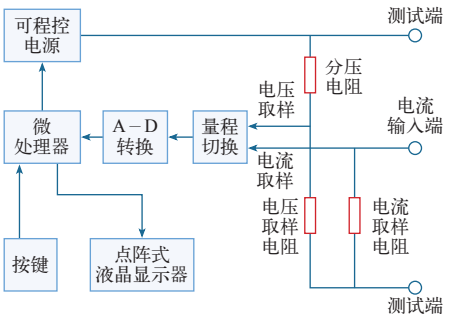

图4 电容量测量的工作原理图

图4中可程控电源用于产生试验电压，输出电压信号通过电阻分压网络取得电压信号，被试品的电流信号通过外接的电流测试夹取样，输入到仪器的电流输入端，然后电压电流信号经过量程切换及信号放大滤波电路，输入到各自的A－D转换器，将模拟信号转换成数字信号，送到微处理器进行计算，最终得出被测电容器电容量的测量结果。

2. 自动平衡配置功能的实现

仪器根据不同保护接线方式下的电容器组，运用平衡配置原理，在仪器内置的ARM单片机系统上，设计了专用的平衡配置软件，实现对电容器组的平衡配置功能。

（1）电容器组数据来源

按照电容组设置参数建立一一对应的电容器组配平模型。 为了方便使用，待配平的电容器组数据可以由三种方式进行录入：①先用仪器直接测量后，再保存至相对应位置；②先选择相对应的位置直接用仪器面板手工输入数据；③可在PC机上按Excel表格方式录入后，通过U盘导入到仪器内。

（2）自动平衡配置

设定保护接线方式，然后再设定平衡配置预期准确度以及配置模式后，即可由仪器自动进行平衡配置。配置结果输出：配平结果是以移动最少的电容器来满足当前准确度要求的最优结果并在配平结束后可以以电路图形式和表格的方式查看配平结果。可以非常直观地看出需要移动的电容器，移动的位置，移动到该位置电容器的电容量以及配平后的各单元电容器组的总电容量。输出结果如图5和图6所示。

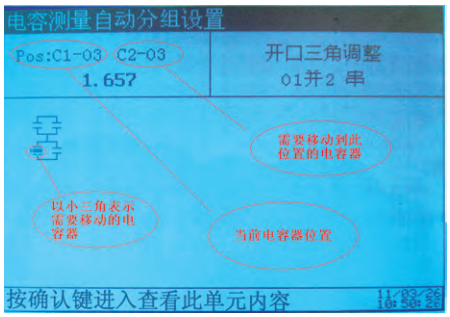

图5 输出结果以电路图的形式显示

图6 输出结果以表格的形式显示

现场测试效果检查

对500 kV某变电站的180个电容器（6个电容器组单元）进行不拆引线测试及智能平衡配置。采取中性点差电流保护方式，如图7所示，接线方式5并联6串联，误差设置分别在0.1%、0.5%、1.0%、2.0%和5.0%范围内，设定最少参与配平的电容器数量为2，最大不超过总电容数量。

以准确度设置为0.5%为例，测量时间：很快，相当于即时。智能配平结果：最少需移动4个

中国知网 https://www.cnki.net

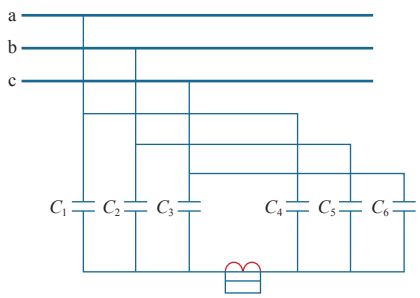

图7 某变电站电容器组保护接线方式

电容器即可达到三相平衡目的。结果对照表如下表所示。

表 结果对照表以配置准确度要求0.5%为例

分配前	分配前误差（%）	分配后	分配后误差（%）	结论
$C_1=29.60$ $C_4=29.75$	0.51	$C_1=29.69$ $C_4=29.75$	0.2	满足0.5%的误差要求
$C_2=29.65$ $C_5=29.69$	0.13	$C_2=29.63$ $C_5=29.69$	0.20	
$C_3=29.75$ $C_6=29.84$	0.30	$C_3=29.75$ $C_6=29.81$	0.2	

结束语

1）电容器组电容量的检测及智能配平装置的成功研制，解决了变电站电容器组电容量传统测量方法的引线拆除工作量大、恢复接线容易出错的问题，同时还可以在一定的准确度要求下对电容器进行智能配平，尤其是故障抢修时，能大大加快故障抢修速度。该仪器还可以用于电容器组安装时的设计和配置，与传统手工计算配平相比，提高配平的速度和准确度。

2）装置电容量的输入具有多样化，既可以手工输入数据，亦可现场测量并保存或一次数据性导入，方便、适用。

3）该装置智能平衡配置的准确度要求可以进行人工设置，提高了装置实用性和互动性，值得注意的是，为提高测量和配置准确性，该装置应使用高准确度的钳形电流表。

4）值得注意的是，现场测试信号往往是很微弱的，当信号接入系统时仪器接地的连接不恰当时，会在准确度上造成影响。

参考文献

[1] 马晋辉．高压并联电容器组保护的分析与参数计算 [J]．电气应用，2007，26 (10)：40-43，100．

[2] 奚丕奇，吴苗凤．提高电容器组平衡配置效率的方法 [J]．电力与能源，2013，34 (4)：362-364．

[3] 陈根军，唐国庆．基于禁忌搜索与蚁群最优结合算法的配电网规划 [J]．电网技术，2005，29 (2)：23-27．

[4] 张欣维．一种电容器成套装置的配平方法 [J]．电力电容器与无功补偿，2010，31 (4)：35-37．

[5] 马烁，王安平，等．蚁群算法及其在组合优化中的应用 [J]．咸阳师范学院学报，2008，23 (2)：52-54．

[6] 刘卫东，刘顺成，等．基于蚁群算法和禁忌搜索的部队机动路径选择 [J]．系统工程与电子技术，2008，30 (8)：1505-1508．

[7] 张翠军，邹慧，等．基于二次分配问题的混合蚁群算法 [J]．计算机工程与应用，2008，44 (10)：37-39．

（收稿日期：2015－04－08）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net