

拓扑结构说明：

在配电线路处安装配电线路监测装置（配电故障录波分析仪），对配电线路进行暂态电能质量监测分析；

在线路台区安装智能无功补偿控制器，支撑远程调度控制补偿，实时在线监测台区稳态电能质量情况，并将数据上传至系统平台。

1.1 整体用电分析

显示所有线路实时运行功率、报警状态、日/月/年的线损排名、日/月/年的最大负载率排名、当前的电容补偿策略或者建议的电容补偿策略。帮助用户快速了解线路整体的运行状态，实时报警状态，以及电容补偿策略。

1.2 关键指标曲线

查看线路的三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、功率因数、电压不平衡度、电流不平衡度、电压谐波、电流谐波、电压间谐波、电流间谐波曲线等等。通过查看这些实时的指标曲线，可以帮助用户分析定位电能质量问题、分析电容补偿策略的效果；通过分析历史指标曲线，帮助分析历史用电特性，有助于制定合理的电容补偿策略。

1.3 实时波形

查看线路的电压实时波形、电流实时波形、矢量图、有效值及相位角。通过这些实时的暂态波形数据，有助于分析当前实时的电能质量。

1.4 电能质量评估

在分析单项指标的基础上，把部分或全部电能质量问题以及某项电能质量的多个特征量按属性合成一个有机整体，进而得到其考核指标的过程，其结果可以是电能质量的综合指标或综合等级。在同一时间，诸多电能质量参数加在同一电气设备上，共同影响设备的工作，电力扰动对设备性能的影响结果需要多项特征来评估。用电情况评估需要监测点的监测对象为变压器来评估，二级或更下级开关不参与评估。评估流程如下：

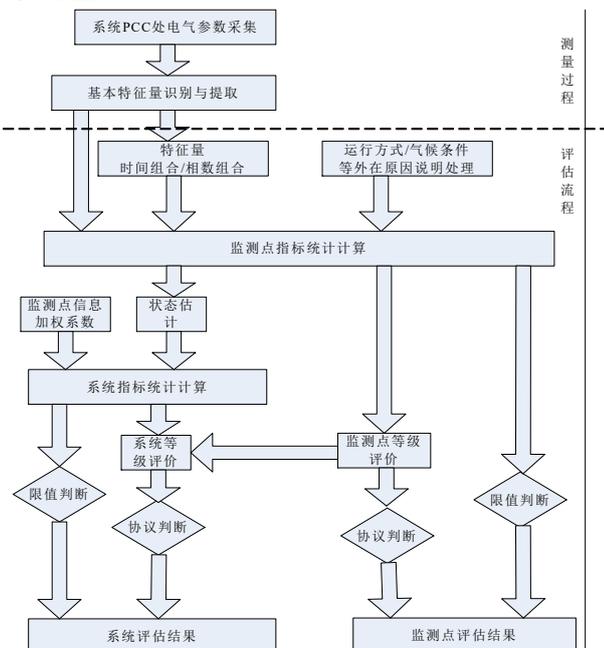


图 2 电能质量评估流程

电能质量的时间组合是指，将按时间变化的电能质量各参数用不同的时间长度进行组合计算的过程，从而达到既真实地反映实际电能质量水平又可以有效地压缩监测数据的目的。主要包括方均根值法、最大值法、平均值法、CP95 大概率值法。评估项目包括电压偏差、功率因素、电压谐波、电流谐波、三相电压不平衡、三相电流不平衡、需量、负载率。

1.5 历史策略分析

通过对历史策略执行情况的分析，根据现场反馈的数据对策略进行持续优化，逐步使补偿效果达到最优。

1.6 告警记录

以列表的方式展示监测点的【事件类型】、【发生时间】、【持续时间】、【特征幅值】、【波形】、【处理状态】。点击详情可以查看告警的越线详情或者事件波形。通过自动收集告警信息并发送告警短信，针对告警信息有目标性地进行巡检，可以降低以往定期人工巡检的成本。

1.7 配置管理

配置管理包括告警设置、策略设置、台区管理、线路管理。

报警设置：对采集的指标设置报警阈值、报警等级、报警频率、提醒方式等，支持用户制定适合自己的报警规则，报警发生后能第一时间发短信或者邮件提醒相关负责人，避免造成更大的损失。

策略设置：运维人员根据历史采集数据配置电容补偿策略。

台区管理：维护台区基本信息。

线路管理：维护线路基本信息和地理位置。

2. 无功补偿控制策略

2.1 本地控制策略

目前，根据无功补偿装置的实际情况，主要有以下几种无功补偿控制策略：

1) 按电压高低控制：在电压低于电压下限时投电容；电压高于电压上限时切电容。为避免投切振荡，需要选定电压变化最大限值。

2) 按时间序列控制：根据日负荷曲线，将每天分为多个负荷时段，根据不同负荷时段的特点投切并联电容器。该方法适合于负荷较稳定的情况，且负荷时段的划分随季节和负荷的变化进行调整。

3) 按电压时间总和的控制：在按时间控制的基础上，将电压也作为判断参数，在时段内，如电压超过上限，切电容，低于下限，投电容。同时间控制一样，准确性较差，参数需不断调整。

4) 按功率因数及无功控制：按功率因数控制是电网无功控制的传统方法之一，即功率因数低于下限则投入电容器，高于上限则切除电容器。然而当负荷较轻时，功率因数可能较低，此时无功缺额很大，较小的无功功率变化会引起功率因数较大的变化，存在动作频繁的问题，严重时会导致投切振荡。针对此情况，装置的控制功率因数及无功综合考虑，控制方法如下：a) 无功倒送（负数）时，切除电容；b) 功率因数高于功率因数上限，切除电容；c) 无功功率高于无功上限并且功率因数低于功率因数下限（无功越大，功

率因数越小)时,投电容;d)其余情况不动作。

2.2 线路控制策略

按电压和无功功率综合控制:电压和无功功率综合控制就是利用电压、无功2个判别量进行综合控制,以保证线路电压在合格范围内,同时实现无功平衡。

利用相位检测电路把由PT和CT得到电压量U和电流量I经过计算得出负载的电压、无功功率和功率因数。这些物理量经过A/D转换作为投切控制的判据,其控制策略图如图2.2所示。

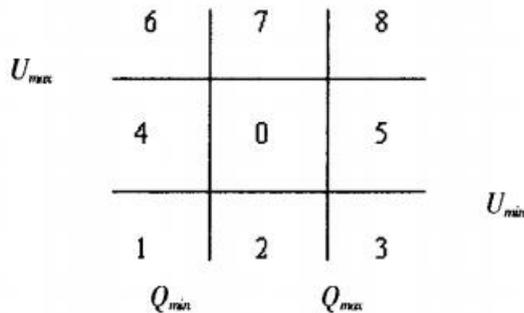


图3 九分区控制策略图

0区:电压无功都在规定的范围之内,则电容器组保持不动;

1、2、3区:电压越下限,则切除全部电容器组而不论无功的大小;

4区:电压合格,系统无功偏低,投入电容器组;

5区:电压合格,系统无功偏高,切除电容器组;

6、7、8区:电压越上限,则切除电容器组而不论无功是否满足条件。

3. 设备在线监测参数

3.1 配电线路监测装置

1、主要功能

1) 具有瞬态监测能力,如瞬时过压、暂降、暂升及短时中断

2) 具有数据统计能力

3) 故障录波功能

4) 暂降、暂升、瞬态过电压、电压中断、冲击电流

5) 具有本地大容量数据存储

6) 90天定时冻结数据+最值统计数据

7) 1000条波形数据

8) 支持北斗、GPS对时

9) 人机交互液晶屏

10) 支持远程升级

11) 内置电源可短时掉电工作

2、基础数据计算及转换

三相交流电量及零序电压、零序电流等电量的测量,如下:

相电压: U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_{lnAvg} 。

线电压: U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 、 U_{llAvg} 。

电流: I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_{Avg} 。

功率因数: PF_a 、 PF_b 、 PF_c 、 PF (总功率因数)、 dPF_a 、 dPF_b 、 dPF_c 、 dPF (总基波功率因数);

相角: 电压/电流相角、2~63次谐波电压/电流相角;

有功功率: P_a 、 P_b 、 P_c 、总P、基波P、谐波P (2~63次)、总谐波P;

无功功率: Q_a 、 Q_b 、 Q_c 、总Q、基波Q、谐波Q (2~63次)、总谐波Q;

视在功率: S_a 、 S_b 、 S_c 、总S、基波S、谐波S (2~63次)、总谐波S。

峰值因子: 电压/电流峰值因子。

3、电压偏差监测

满足IEC61000-4-30要求,获得电压有效值的基本测量时间窗口为10/12周波,且不重叠连续测量并计算电压有效值的平均值,最终计算得到电压的上下偏差。装置的电压测量精度为0.1%,可实现电力系统电压偏差的在线监视,同时可设置越限报警和记录。

4、谐波、间谐波监测

满足按照IEC61000-4-7标准,在每周波采样256点的同时,以2个周波为时间窗口做一次FFT,频率分辨率为25Hz,可测量和显示基波到63次的各次谐波及间谐波分量、相角、总谐波畸变率、偶次谐波畸变率、奇次谐波畸变率,所测得的电压、电流和谐波频谱图。

5、电压暂升、暂降监测

满足国标GB/T18481和IEC61000-4-30标准,其针对电压暂升暂降、电压短时中断的具体功能如下:

A) 每相电压均可启动暂升/暂降、中断事件;

B) 记录每一次电压暂升/暂降和中断发生时刻、持续时间、残压等详细数据;

参数设置有:

- 投退: 暂态可设置投入或者退出,默认投入;

- 暂态参考电压: 额定电压/滑动参考电压;

- 电压暂升限值: 101%~200%参考电压;

- 电压暂降限值: 1%~99%参考电压;

- 电压中断限值: 0~50%参考电压;

- 暂态迟滞值: 0.1%~100%参考电压;

- 触发动作: DO出口、波形记录、扰动记录、RMS记录、实时量定时记录等

6、瞬态过电压捕捉

具备瞬态捕捉能力,捕捉小于0.5周波的电压瞬变:

A) 可捕捉最短达80 μ s的子周波瞬变;

B) 每次捕捉到瞬变,可触发波形记录、扰动记录;

C) 记录每一次电压瞬变发生时刻、瞬变的深度和持续时间等详细数据。

瞬态相关的参数设置有:

- 投退: 瞬态可设置投入或者退出,默认投入;

- 瞬态捕捉限值: 0.05~5 倍额定电压;
 - 触发动作: DO 出口、波形记录、扰动记录、RMS 记录。
- 7、电压快速变动捕捉

够满足 IEC61000-4-30 标准要求, 提供快速电压变动捕捉功能。快速电压变动反映了两个稳态电压之间, 供电电压幅值的变化情况。快速电压变动是在稳定电压容差、稳定时间、所检测到的最小步长, 及最小变化速度 (%/s) 的基础上捕获。但如果电压变化超过暂态限值时, 被视为暂升或暂降, 而不是快速电压变动。根据 NorwegianFoL 中快速电压变动的定义, 通过电压阶跃 (V_{step}), 最大电压变化 (V_{max}), 以及电压变化速率来检测。当电压阶跃 (V_{step})、电压变化速度均大于限值, 并且电压变化不超过暂态阈值时认为发生了快速电压变动。快速电压变动事件存入 PQLog, 记录电压阶跃变化及变化持续时间以及相对于标称电压的最大电压变化 (V_{max})。

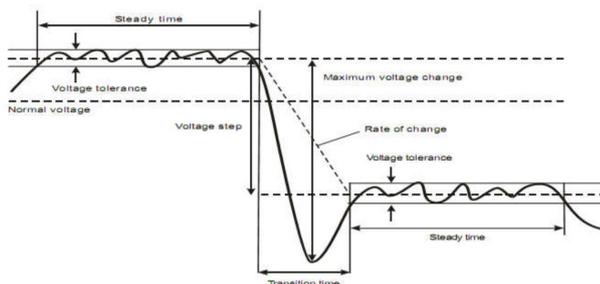


图4 电压暂降波形

8、定时冻结数据

对实时测量值按照整定的间隔时间进行统计计算并记录统计值, 包括间隔时间内的最大值、最小值、平均值、95% 概率值。

提供 16 组统计定时记录功能, 各组定时记录分别独立, 可分别进行整定。每组统计定时记录最多可设置记录 64 个变量, 记录间隔时间为 0~60min 可设置。当记录间隔时间为 3min 时, 可保存 90 天的统计数据, 掉电数据不丢失。数据存储方式可设置循环记录或记录空间满停止记录。循环记录方式下, 当记录存满后覆盖最早的记录数据; 记录空间满停止记录方式下, 当存满后停止记录。

9、最值数据统计

装置可记录实时测量值的最值, 提供当前最值及上一次最值记录, 包括最大值/最小值数据及其发生时间。

10、远程升级

工作电源是装置工作的基础, 多数配电台区现场通常无法提供稳定可靠的工作电源 (直流屏、UPS 等), 当供电发生暂降、中断后, 无内置电源的监测装置会因电源异常而停止工作或发生存储数据错乱等现象。装置内置超级电容, 充放电次数超过 50 万次, 充电采用恒流方式, 运行更安全。

监测装置基于嵌入式 Linux, 支持远程升级应用程序, 可实现远程维护。

3.2 智能无功补偿控制器

1、性能指标

历史数据: 记录每日 15 分钟, 90 天的历史数据。

基本电参数历史数据: L1、L2、L3 相电压、电流、零序电流、功率因数、温度、有功功率、无功功率、有功电度、无功电度。

统计数据: L1、L2、L3 相电压、电流、功率因数、有功功率、无功功率、总有功功率、总无功功率和总功率因数的最大值/最小值及出现时间; L1、L2、L3 相电压谐波越上限累计时间; L1、L2、L3 相电压缺相时间。

停电次数: 日运行时间 (供电可靠率); 电压最大不平衡率; 电容器投切次数及发生时刻和投运时间。

实时数据: L1、L2、L3 相电压、电流、功率因数、有功功率、无功功率、谐波电压、谐波电流、零序电流; 总有功电量 (累计); 总无功电量 (累计)。温度、频率、电容器容值、电容工作状态; 开入、开出状态。

2、主要功能

智能无功补偿控制器集电网监测仪与无功补偿控制器功能于一体, 通过与补偿电容柜连接, 补偿电网中的无功损耗, 提高功率因数, 降低线损, 从而提高电网的负载能力和供电质量; 同时实时监测电网的三相电压、电流、功率因数等运行数据, 完成对整个配电线路的监测、分析处理、报表管理等综合管理。

通过智能无功补偿控制器实现以下功能:

- 1) 数据监测功能及抄表功能;
- 2) 实时数据状态显示功能;
- 3) 保护功能;
- 4) 台区电能质量监测;
- 5) 台区用电故障报警
- 6) 补偿策略下发控制;
- 7) 电容器故障定位功能。

4. 电容器故障监测及保护动作

4.1 电容器组故障定位原理

电容器在无功补偿装置中是以电容器组的形式连接存在的, 理论上电容器电容量的细微变化都可以由流经电容器的电流值反映出来, 然而由于农用电网在工作过程中不可避免地会受到电压波动、周围环境因素、谐波等影响, 直接测量的方法在实现起来是极其困难的。

基于差分思想进行电容器组故障定位方法的出发点是由于不同时刻周围环境会对电容器电容值的测量造成不可预期的误差, 易造成误操作与延误预警; 然而在同一时刻下, 所处同一环境下电容器组中各个电容器的影响是相同的, 也就是说在不同时刻下流经不同电容器的电流值变化趋势应当是几乎一致的。因此基于该思想提出的故障电容器定位的方法是测量刚投入运行的无功补偿装置流经各个电容器的电流, 理论上出厂时各电容器的电容值是相同的, 因此流经各电容器的电流也是相同的, 选用该电流值为参考值; 再对运行时流经各电容器的电流值进行采样, 计算出该时刻下电流值的算术平均值, 从而找出相应的与该时刻电流算术平均值偏差较大的电容器, 通过与电容参考值的比较即可判断出电容器

组内发生故障的电容器。

4.2 电容器基于电容值的故障监测原理

电容值的变化会直观地反映出电容器的真实工作状态，由于电容器有功损耗和介质损耗几乎为零，因此流过电容器的电流可视为容性电流，可以用公式 $C = I / \omega U$ 来计算。式中， C_n 为电容值的出厂值， C_i 为电容器在运行当中的实测值。根据《电力设备预防性试验规程》：

当 $C_i \leq 0.95 C_n$ 时，发出电容值下限预警信号；

(2) 当 $C_i \geq 1.05 C_n$ 时，发出电容值上限预警信号；

(3) 当 $0.95 C_n \leq C_i \leq 1.05 C_n$ 时。电容值处于合理范围内，继续监测。I 通过对比 simulink 仿真计算得到的熔断一根内熔丝时该电容器流过的电流和无故障时电流参考值的比值，判断出与电流参考值偏差较大的电容器编号。然后再根据规程中规定的电容值的判断依据，即可在电容器组内对实时电容值越界、发生早期故障损坏的电容器进行定位；若该采样时刻无任何不良情况存在，则等待下一采样时刻循环进行该判断流程即可。

4.3 电容器故障在线监测流程

电容器故障在线监测流程如图 5 所示。在一次采样周期内对电容器组内流经各电容器的电流值进行监测。首先通过过零比较判断出是否存在单个或多个内熔丝熔断故障，若存在此类故障便可很容易判断出内熔丝熔断故障发生在哪只电容器上。然后应用差分思想算出该采样时刻下不同电容器的电流算术平均值

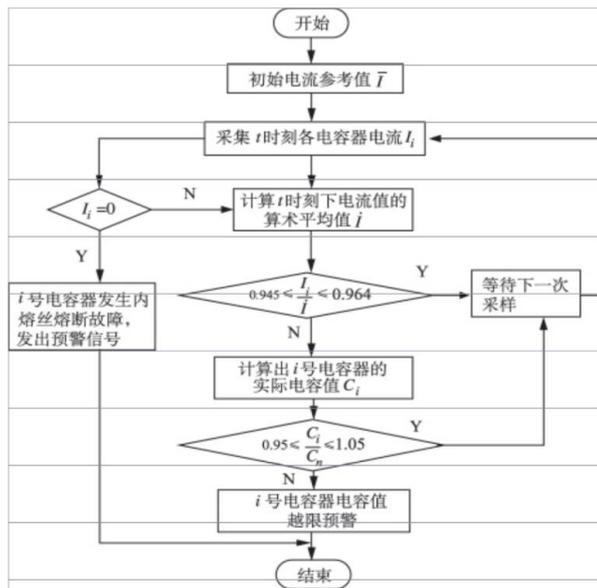


图 5 电容器故障在线诊断流程

4.4 保护装置动作监测流程

保护装置动作在线监测流程如图 6 所示。首先对系统进行初始化，随后若发生无功补偿装置保护装置的动作，不同的保护装置动作会发出不同的高低电平动作信息，通过通讯接口将动作信息传达给芯片，实现芯片与无功补偿装置的通信，从而在某故障保护装置动作时给出相应的报警信息，实

现实时故障监测。

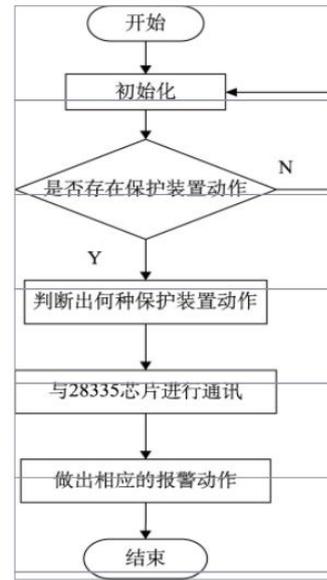


图 6 保护装置动作在线监测流程图

装置故障类型的前提下，设计无功补偿装置故障在线监测系统，选用芯片作为主控制器进行电容器的故障监测及故障定位，同时建立通讯接口与装置的保护装置进行通信，可实现农用电网中无功补偿装置全方位的故障监测。经过上电调试和现场试验，系统可以实现单台电容器电容值的实时监测，对电容器早期故障有较高的诊断准确性，既有效地避免了其发展成严重事故的可能性，也减少了巡线过程的资源浪费；同时在保护装置动作时也可及时发出相应的预警信号。实验结果表明该系统在农用电网中无功补偿装置故障在线监测问题上具有重要的实际意义。

5. 结论

结合智能无功补偿控制器，设计无功补偿装置在线监测系统，实现农用电网中无功补偿装置全方位的数据监测。系统可以实现配电网无功补偿情况的实时监测，对电容器故障的提前诊断，既有效地避免了其发展成严重事故的可能性，也减少了巡线过程的资源浪费；同时在保护装置动作时也可及时发出相应的预警信号。该系统在农用电网中无功补偿装置智能优化上具有重要的实际意义。

【参考文献】

[1] 孙建中, 凌云. 农用电网无功补偿探讨[J]. 西北电力技术, 2004, (4): 155-157.
 [2] 黄琦, 陈芑. 农用配电线路无功自动监控与补偿系统研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2012.
 [3] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
 [4] 苏志明. 电力电容器智能化监测与故障诊断系统研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
 [5] 李新海, 邹正华, 徐春新, 等. 电容器故障在线监控系统的设计与实现[J], 微计算机信息, 2010, 31: 45-47.
 [6] 黄芷定, 邹玲玲. 如何解决农村配电网低电压问题的探讨[J]. 中国西部科技, 2010, 9 (24): 62-63.
 [7] 沈震. 低压无功补偿装置在农网中的应用[J]. 广东输电与变电技术, 2005, 6 (5): 42-43.