

# 基于广域测量系统的地区电网稳定性研究

郭翔<sup>1</sup>, 黄潇文<sup>2</sup>, 苟竞<sup>2</sup>

(1. 贵州电网公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**在介绍了广域测量系统(WAMS)基本概念和架构的基础上,将广域测量技术与地区电网稳定相联系,提出了基于WAMS的地区电网稳定性研究方法,并分别采用深度优先算法、模拟退火算法、最小生成树算法及 $N-1$ 安全递归算法对地区电网PMU的优化配置问题进行讨论。此外,分析了WAMS在地区电网稳定性研究中的相关应用,如系统动态监测、状态估计及稳定预测控制、系统模型验证及参数校正、系统广域保护与故障定位、故障录波等,并对WAMS在地区电网中的应用做出了展望。

**关键词:**广域测量系统;地区电网;稳定性

**Abstract:** Based on the basic concept and the structure of wide-area measurement system (WAMS), the association of wide-area measurement technology and regional grid stability is conducted. The research method of regional grid stability based on WAMS is proposed, and the algorithms of optimizing PMU placement in regional grid are discussed, including depth first, simulated annealing, minimum spanning tree, and  $N-1$  safety recursion, etc. In addition, the relevant applications of WAMS to the research of regional grid stability are analyzed, such as system dynamic monitoring, state estimation and stability forecasting control, system model validation and parameter correction, system wide-area protection and fault location, fault recording, etc. Finally, the prospects of WAMS in the application of regional grid are presented.

**Key words:** wide-area measurement system (WAMS); regional grid; stability

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)02-0024-04

## 0 引言

随着负荷的增长,复杂化与大范围是地区电网网架结构的发展趋势,安全性与稳定性将成为地区电网运行的主要计算和分析内容<sup>[1]</sup>。

广域测量系统具有良好的实时特性,能够在同一参考时间框架下捕捉到大规模互联电力系统多地点的实时动态、稳态信息,为电力系统潮流计算、状态估计、暂态稳定分析、电压稳定分析、频率稳定分析和反馈控制等提供数据支撑。随着广域测量系统的发展,其在一定程度上能够缓解大规模互联电力系统动态分析和控制上的难题。

贵州电网位于南方电网中部,作为主要送端电网,其西电东送输电系统具有典型的长距离、多回和交直流并联等特点。目前,贵州电网通过青岩—河池500 kV双回线、兴仁—天二500 kV线路、安龙—天二和兴义—天二220 kV线路以及贵广2回直流(高肇直流、兴安直流)与南方电网相连,2007年夏季向

南方电网送电规模达5700 MW。贵州电网已经形成较为坚强的“日”形网架结构,500 kV/220 kV电磁环网已全部打开。一旦500 kV变压器跳闸后将导致与其相联的220 kV电网与主网解列运行,解列地区电网可能出现大幅度的频率上升。

主网解列运行和地区电网解列运行的问题虽然归属不同层次,但其安全稳定措施的相互配合具有重要意义,广域测量系统在地区电网安全稳定运行中的应用能够为其提供新的视角。

## 1 WAMS的概念与架构

广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)是以相量测量单元(phase measurement unit, PMU)为底层测量单元,经通信系统将测量值实时传送到数据采集器,经过一定的数据处理后对电力系统运行进行动态监测及实现其他高级功能的系统。相量测量单元作为广域测量系统的核心部件,能够利用全球定位系统(global position system, GPS)的授时功

能 给以相量形式测量到的各节点或者线路的各种状态量打上时标的一种测量装置。

WAMS 系统一般主要包括处于调度中心的主站服务器(包括超级相量数据集中器 super phasor data concentrator ,super PDC 等)、分布于系统关键节点的子站(即同步相量测量单元 PMU 以及相量数据集中器 PDC) 以及联系两者的高速数字化通信网络组成。其拓扑结构一般采用主站—子站树状层级结构。

子站位于发电厂或变电站,是以其为基础安装的同步相量测量装置,其性能的关键主要体现在三方面:可靠性、准确性和实时性。而 PMU 同步采样精度的提高和海量数据压缩是其关键技术两大方面,主要涉及时标精度提高、失去 GPS 信号时的高精度守时钟、系统频率变化下的自适应采样和相量数据无损压缩等技术环节。

主站位于调度中心,一般由基础平台及之上的高层应用功能组成,用于对子站实时动态测量的数据进行接收、管理、储存、转发、分析等步骤。其关键技术涉及基于电力系统动态特征识别的运行状态监测与告警技术、WAMS 与现存监测系统(SCADA/EMS)数据的交互整合、基于数据挖掘的实时相量数据分析处理和分类储存技术、自适应广域保护、在线稳定计算分析及其安稳控制技术等。

## 2 地区电网 PMU 优化配置

PMU 具有较高成本,如何在系统中的 PMU 优化配置,成为 WAMS 在地区电网中应用的关键。优化配置问题通常以保证系统完全可观测下 PMU 配置最少为目标。

若一个含有  $n$  条母线的电力系统,设  $m$  维测量向量  $z$  包含有  $m$  个电压和电流的量测值,  $n$  维状态向量  $x$  包含有  $2n - 1$  个状态变量,则系统量测方程为

$$Z = Hx + e \quad (1)$$

式中  $H$  为  $m \times (2n - 1)$  维测量矩阵;  $e$  为  $m$  维测量误差向量。进一步将向量  $z$  分解为电压向量  $z_U$  和电流量向量  $z_I$ , 同时把状态向量  $x$  分解为量测向量  $V_M$  和非量测向量  $V_C$ , 则式(1)变为

$$\begin{bmatrix} z_U \\ z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_U \\ e_I \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $I$  为单位矩阵;  $Y_{IM}$  和  $Y_{IC}$  分别为网络支路的串联和并联导纳矩阵。

系统拓扑可观测性的判断可通过式(3)得到。

$$\text{rank}H = 2n - 1 \quad (3)$$

式(3)意味着测量矩阵满秩,系统完全满足可观测性的条件。

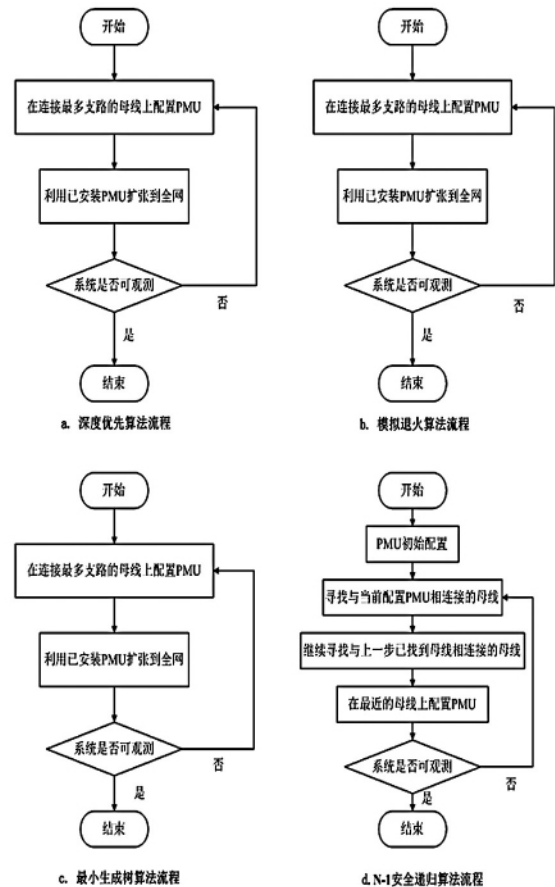


图 1 PMU 优化配置算法流程

深度优先算法(depth first, DF): 深度优先算法基于网络图论。该方法以在系统中连接最多支路的母线上配置一台 PMU 作为初始步骤,若存在连接最多支路数目的母线有一条以上情况,则随机选取其中任意一条母线配置初始 PMU,并据此规则继续配置,直到整个电网达到可观测。DF 算法只是基于深度最大原则,缺陷在于增加了 PMU 的重复配置,难以保证在可观测条件下的 PMU 配置最少。深度优先算法的主要流程如图 1(a) 所示。

模拟退火算法(simulated annealing, SA): 模拟退火算法可以简单描述为:模拟退火过程是在给定结构后,从一个状态到另一个状态的随机游动。基于模拟退火的优化方法,在优化过程中,不用考虑初始配置原则确定出的必须配置和不必配置的节点,采用模拟退火法减少 PMU 的数量,优化配置位置,直至配置最优。在传统模拟退火算法的发展基础上,发展出了考

考虑灵敏度约束的系统可观测下采用模拟退火法达到最优 PMU 配置的方法。显而易见,模拟退火算法详细地考虑了各种规则,具有良好的收敛性,但随着系统规模的增大,算法的收敛速度成为模拟退火算法的缺陷,模拟退火算法的主要流程如图 1(b) 所示。

最小生成树算法(minimum spanning tree, MST):从原理上看,可以理解为一种改进的深度优先算法。MST 算法以电网中每条母线进行枚举,执行  $n$  次运算,根据上一步得到的配置方案,重新放置 PMU 到最初安装这台 PMU 的节点相连的母线上,以能否实现系统可观测性为判据,判定这个方案的保留与否。另外,若系统中存在纯传输节点,即每个配置方案都取出一台 PMU 仍使得系统可观,那么 PMU 数目就可以减少。MST 算法的流程如图 1(c) 所示,它利用不同的初始配置进行多次迭代求解,将寻找能最大限度覆盖全网的母线  $j$  作为寻优规则,综合提高了算法的收敛速度和收敛效果。

$N-1$  安全递归算法:事实上,某条线路或者某个 PMU 的故障影响到整个系统的可观测性。以上几种算法均是在保证系统结构和 PMU 装置完全可靠工作的情况下的最优配置。所以,优化配置问题应该考虑由故障引起的系统网络拓扑结构变化的情况,即优化配置方法应该具有解的多样性。 $N-1$  安全递归算法是基于这一点,发展出的 PMU 最优配置算法。该算法的核心是  $N-1$  安全规则,该算法流程如图 1(d) 所示。

### 3 地区电网 WAMS 应用研究

地区电网 WAMS 应用方框图见图 2。

#### 3.1 系统动态过程监测

目前,电网监测系统能够监测系统电压、电流和功率,与系统稳定关系密切的相角特性只能离线计算。通过 PMU 监测电网各节点不同母线间的相角差,可直接计算出系统潮流分布。电力系统中用于控制电压幅值的无功注入与负荷特性及传输中的无功损耗密切相关。

当系统结构改变或发生事故而产生振荡时,功角  $\delta$  可直接反映系统的潮流和稳定程度,振荡过程直接反映在功角变化上。电网各枢纽节点上的相量信息可用于指导系统的稳定控制措施和调度策略。

#### 3.2 状态估计及稳定预测控制

传统的状态估计是根据各测量点的遥测量(有

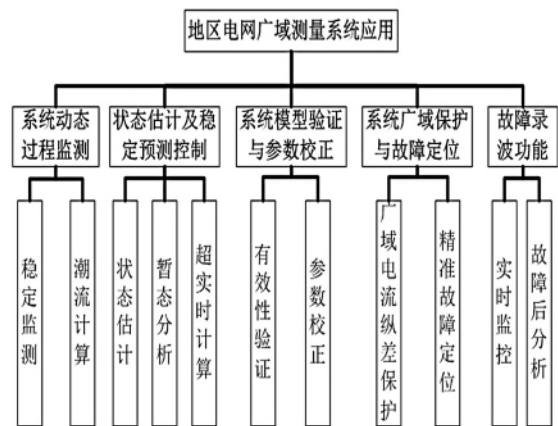


图 2 地区电网 WAMS 应用

功、无功、电压、电流)和网络拓扑结构,利用非线性方程的求解方法求出状态量。PMU 能够提供相角量测,作为系统潮流计算中的松弛节点直接带入方程,为状态估计提供更准确的状态解。

首先,改写方程如下。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_m \\ \Delta X_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\Delta X_m$ 、 $\Delta X_e$  分别为配置和未配置 PMU 的母线电压相量状态偏差。

对已配置 PMU 母线构建附加方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta Q_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a & F_a \\ G_a & N_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,当节点  $i$  配有 PMU 时,  $M_a$ 、 $F_a$ 、 $G_a$ 、 $N_a$  对应的行矢量只有一个非零元素位于第  $i$  列;同理节点  $j$ ;当  $i$ 、 $j$  同时配有 PMU 时,则对应行矢量完全相同,由此建立状态方程如下。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_a \\ \Delta Q_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & F \\ G & N \\ M_a & F_a \\ G_a & N_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (6)$$

同步相量测量实时监测全系统暂态现象的进程,为系统暂态稳定性分析提供了新的途径。其提供的状态变量及导出量不仅用于观测,同时可通过一定的指标计算,预测未来一段时间内系统运行的可靠性,并依此采取相应的保护和控制措施。

“离线计算、实时匹配”和“在线与决策、实时匹配”成为目前实际应用系统中的两个主流。但由连锁故障引起的“不可预见性事故”威胁着电网安全与稳定,WAMS 系统在地区电网中的应用能够在纵向

上为区域电网和地区电网调度人员提供实时信息,为“超实时计算、实时匹配”提供了基础,提升地区电网整体安全性。

### 3.3 系统模型验证与参数校正

电力系统的设计、监视、控制、保护及运行和维护等,都需依据一定的系统模型参数。模型的有效性,是电力系统动态分析和控制的起点,而模型的有效性并没有得到评估。因为 SCADA 数据采集在非统一时标下完成,对于同一个断面的电力系统状态不能有效反映。WAMS 的时间序列信息能够为系统模型辨识和参数校正提供支持,保障地区电网系统模型的有效性和实时性,为地区电网安全稳定运行提供支撑。

### 3.4 系统广域保护与故障定位

作为简单快速的保护方式,传统电流纵差保护因时钟同步精度不高,在对长线路进行保护时存在多种困难。在 GPS 时钟同步下,若采样同步误差小于  $1 \mu\text{s}$ ,电流值带上时间标签后送到对端,可简单完成线路纵差保护。

目前的故障定位方法分为行波法和阻抗法,而以行波法为基础的单端测量和双端测量成为目前故障定位主要采用的方式,总体来说,行波法优于阻抗法,双端测量优于单端测量,WAMS 的发展,为统一时标下精确双端故障定位奠定了基础,提高了定位精度。对于故障原因电网发生解列之后,缩短了地区电网与区域电网恢复安全稳定运行的时间。

### 3.5 故障录波

通过配置 PMU 记录动态过程全相量参数(幅值、相角、瞬时频率、正序分量)。在同一参考时间框架下,全网动态过程的信息能够被 PMU 记录,实现故障录波功能。动态过程信息,既可以上传至地区电网调度中心进行实时监视和控制,也可以对事故进行分析。

## 4 结论与展望

以 WAMS 为依托,通过总结 WAMS 在系统动态过程监测、状态估计及稳定预测控制、系统模型验证

与参数校正、系统广域保护与故障定位、故障录波等方面的应用,针对地区电网安全稳定的要求对 WAMS 的应用进行了相关探索。

快速仿真和建模是一个自愈系统的必备条件,传统的模式识别的电网静态安全分析方法有较高的快速性,如能进一步有机结合静态数据和动态信息提供其准确性,可为快速的仿真与建模做出有益的探索。

基于 WAMS 技术构建地区电力系统的广域安全监测及控制系统将作为一个独特视角,同时,多元化与统一建模、多源信息融合、超实时仿真、全网数字化与协同决策技术将进一步促进地区电网安全稳定运行高层应用与控制的发展。

### 参考文献

- [1] 鞠平,代飞. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 孙华东,王雪冬,马世英,等. 贵州主网及其地区电网孤网运行的安全稳定控制[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 35-39.
- [3] 李配配,黄家栋,赵永雷. 基于双端不同时测距的配电网单相接地故障定位研究[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(8): 20-23.
- [4] 傅周兴,郭颖娜,何文林. 基于 GPS 同步时钟的相量测量在电力系统中的应用研究[J]. 继电器, 2001, 29(7): 31-34.
- [5] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
- [6] 路志刚,刘俊勇,谢连芳. 广域测量系统中 PMU 优化配置方法的比较[J]. 现代电力, 2009, 36(3): 19-22.

作者简介:

郭翔(1978),男,高级工程师,从事电力系统调度自动化和节能减排工作;

黄潇文(1989),男,硕士研究生,从事电力系统分析研究;

苟竞(1988),男,硕士研究生,从事电力系统分析研究。

(收稿日期:2012-03-01)

欢迎投稿 欢迎订阅