

广域保护（稳控）技术国际现状及展望

蔡运清
美国许继公司

汪磊, Kip Morison, Prabha Kundur
加拿大 Powertech Labs, Inc.

周逢权, 郭志忠
北京许继公司

摘要

稳控系统在电网保护控制中是基本定位于常规保护及 SCADA/EMS 之间的系统保护控制手段。北美及欧洲从 60 年代起就有这类装置的应用，到 80 年代各大电网的规划，运行，及调度均对这类装置的功能及运行提出了非常明确的要求，由此积累了不少的实际运行经验。随着计算机技术及通讯技术的发展，新一代的稳控技术正在形成，这就是基于广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurements System) 及在线动态安全分析 (On-Line Dynamic Security Assessment) 的广域保护 WAP (Wide Area Protection)。

关键字：稳定控制，广域保护，SPS，RAS，WAMS，PMU

简介

由于世界上发生的多起稳定事故造成巨大损失，现代大电网的运行已经对系统的稳定与控制提出明确的需求。国际大电网会议 (CIGRE)，IEEE，及北美的区域性系统可靠性委员会均成立了专门的工作小组对此问题进行交流研究[1,6,7,10]。稳控系统在电网保护控制中是基本定位于常规保护及 SCADA/EMS 之间的系统保护控制手段。北美及欧洲从 60 年代起就有这类装置的应用，到 80 年代各大电网的规划，运行，及调度均对这类装置的功能及运行提出了非常明确的要求，由此积累了不少的实际运行经验。传统上这类保护控制被称为特殊保护系统 SPS (Special Protection System)，补救控制系统 RAS (Remedial Action Scheme)，或稳控系统。随着计算机技术及通讯技术的发展，新一代的稳控技术正在形成，这就是基于广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurements System) 及在线动态安全分析 (On-Line Dynamic Security Assessment) 的广域保护 WAP (Wide Area Protection)。

传统保护是隔离故障，保证设备人身安全；而 SPS 及广域保护是保证电网在故障后仍能保持所需的安全稳定工况。传统保护主要通过开关动作来实现故障隔离。而 SPS 及广域保护则是通过系统有功、无功、电压，以及发电机组和负荷的调节来实现，即系统的 $P-d$ 和 $Q-V$ 调节来实现。其中自然会有本地、远程开关的动作。

这里我们分两部分分别就广域保护技术及稳控技术现状进行技术分析。第一部分为广域保护技术展望，第二部分为稳控技术运行现状及实例介绍。

1. 广域保护技术展望

1.1 广域保护（稳控）的目标

从应用的角度来看，电力系统广域

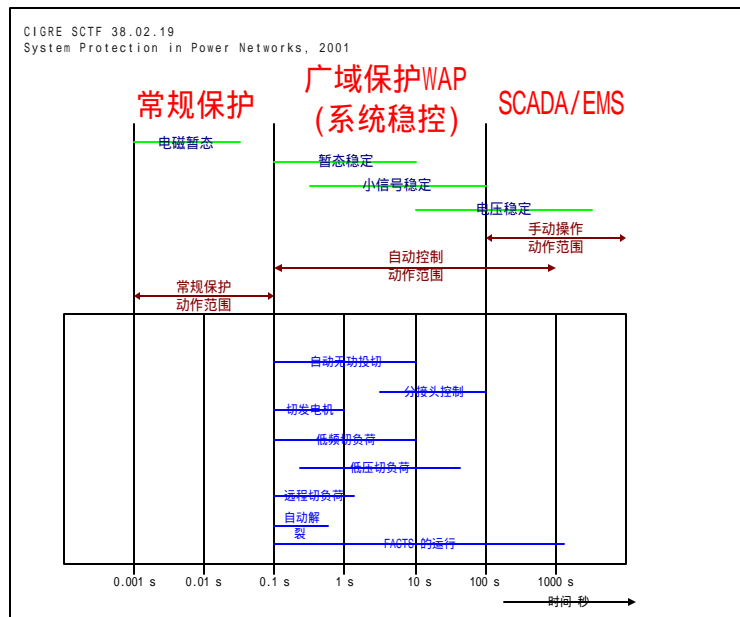


图 1 广域保护（WAP）的定义

保护（稳控）及相应的监视测量系统带来三方面的效益：

- 保证大电网的安全稳定运行；
- 实时掌握及充分利用电网的输电能力，是电力市场运行的有力工具；
- 更准确的电网规划。

第一功能显然是广域保护的首要目标，而第二，三目标则主要是 WAMS 及 DSA 实现带来的成果。国际大电网会议（CIGRE）将广域保护其功能及控制手段和目标进行了定义，参见图 1。

从这个定义中可以看见，广域保护（稳控）的动作时间范围在 100 毫秒到 100 秒之间，但各种保护功能均需要 100 毫秒至 1 秒左右的实时性。

电网稳定问题可以大致分为三大类：暂态稳定（包括功角，低频振荡，暂态电压），中长期电压稳定，及频率稳定。传统保护通常只锁定在单一元件上发生的单一稳定现象，如低频切机。而在现代互联电力系统的实际运行中，威胁区域甚至全网的稳定问题通常涉及到多元件上的复杂现象。如何在实时运行所要求的时间内制定出合适的全网运行方案（包括控制保护装置的整定值）就是广域保护（稳控）要解决的关键问题。例如，互联系统因故障失去关键联络线后，输入功率的孤立子系统中频率会下跌。如仅依赖传统的低频切机，则系统很可能会因连锁切机而崩溃（这类事故曾在许多电力系统中发生过）。但如使用广域保护（稳控）在系统中的关键点协调实施切机，切负荷，甚至人为解裂，系统中的大部分负荷有可能被保存。这个例子说明广域保护（稳控）和传统保护类似，都是在系统出现某些最能影响电网稳定的事件后，如何正确判别及迅速确定控制策略，并迅速准确执行这些控制策略。和传统保护不一样的是，在整个过程中信息的获取及控制策略的执行都可能涉及到较广阔的地理范围，而控制策略的制定则往往需要复杂的计算。

除了稳定控制功能，广域保护（稳控）系统能够对电网的运行状态作完整的实时监测。由于功角测量设备（PMU）能提供实时同步的电网运行数据，基于 WAMS 的系统状态估计比现有的技术将有一个飞跃。快速准确的状态估计使得一些高级系统分析成为可能。例如，电压及低频振荡失稳的监视及报警，系统动稳极限输电功率的确定等。

1.2 广域保护（稳控）的性能要求

一个成功的广域保护（稳控）系统应具有以下的性能特点：

- 可测性：有足够的采样点从而能准确得到所需的系统状态，包括正常运行状态及故障（如跳线等）。
- 选择性：能根据运行准则准确判别不安全的系统状态（包括预警及安全运行域的确定）。这是一个广域保护（稳控）系统的核心要求。这不仅需要准确可靠的测量数据，还依赖于有效的实时分析能力。自然还必须选择正确的和最小的动作行为来执行预期的控制，以避免大面积的甩负荷。
- 安全性：广域保护（稳控）系统在不必须时能随时退出运行，而且不能作为紧急控制的手段动作，除非在系统崩溃的情况下。
- 可靠性：整个广域保护（稳控）系统的运作要有足够的可靠性。这牵涉到各个环节，从数据采集，通讯系统，软件分析，到执行终端（切机，切负荷等）。应考虑适当的冗余及备份，并保证关键设备故障时备用件的自动切换。
- 有效性：这主要指稳控措施的实施速度和精度。任何稳控措施的实施都有速度要求，满足这样的要求需要硬件和软件的协调配合。稳控措施的实施精度直接影响到稳控的效果，因而也需仔细考虑。
- 鲁棒性：在整个动态和稳态运行条件下可靠地、安全地和稳定地运行的前提下，广域保护（稳控）系统的设计应考虑到各种可能的系统运行方式。对未考虑的运行方式应有反误动措施。
- 易维护及易扩展性：这些要求是显而易见的。在实现上，采用开放式及模块式的系统结构能较好地满足这样的要求。

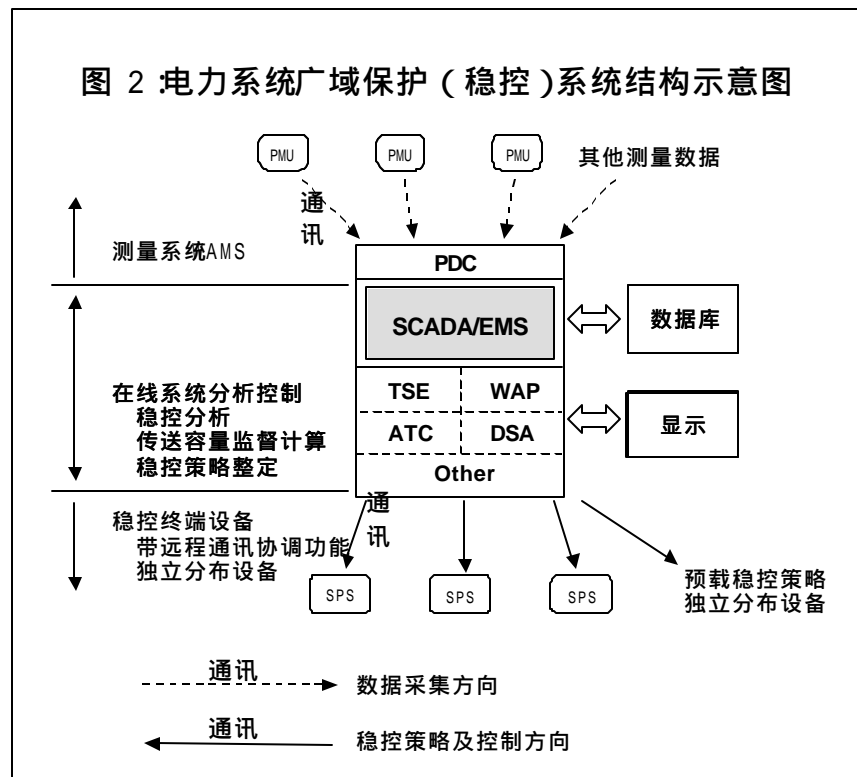
- 其他：在广域保护（稳控）系统的设计中，还应考虑其他的一些因素，例如，和现有稳控系统的协调，互联电网中外部等值网的处理等。

1.3 广域保护（稳控）的实现

广域保护（稳控）是近几年才创建的新技术，目前在世界上还在逐步发展中。从一些在建的系统来看，一个广域保护（稳控）系统应具有以下部分或全部功能：

1.3.1 系统基本结构及功能

图 2 展示了广域保护（稳控）系统的基本框架，主要包括监视测量，系统分析控制，稳控终端设备，通讯等主要系统，以及数据库，与 SCADA/EMS 的接口，显示等辅助系统。



1.3.2 功角矢量测量设备（PMU）

功角矢量测量设备（Phasor Measurement Unit）的基本功能为：

- GPS 同步采样。功角测量设备和常规测量设备的主要区别是 AD 转换的采样按 GPS 标准时钟同步进行，因此无论系统覆盖的地理范围有多大，采样点有多少，所有测得的数据都有精确的同步性。
- 完全实时测量采样点电压/电流的幅值及正序功角。更新速率至少为 1/30 秒或 1/25 秒。
- 故障记录功能。类似传统的故障录波仪。录波点的时间精度按微秒(us) 计算。格式按 IEEE 1344 规定。

除了功角测量设备采集的系统运行数据外，常规测量设备所能提供的其他数据（如开关位置，发电机组投切状态，继电保护动作信号等）也可作为广域保护（稳控）系统的输入。目前国际上商业化的 PMU 产品有 5 家左右。

1.3.3 功角数据集中器 (PDC)

功角数据集中器 (Phasor Data Concentrator) 的基本功能为接受，集成，及储存功角测量设备（或其他测量设备）采集的数据，并向上一级分析软件提供这些数据。储存在 PDC 内的数据还可用于各种离线分析。

1.3.4 数据库

电力系统稳控中心计算机系统的一个重要部分就是数据库。数据库不仅包括实时的功角数据及系统的潮流解（状态估计输出），同时管理各种分析所需的数据（如预想事故集，稳控策略，功率交易方案，稳定数据等）。系统稳控中心计算机系统之间还必须进行通讯数据库的交换。

1.3.5 显示

系统及设备实时状态，监视分析结果，稳控策略选择及动作结果，等等。

1.3.6 系统分析软件

如前所述，系统分析是一个广域保护（稳控）系统的核心。它应包括如下应用软件：

- TSE：拓扑状态估计 (Topology State Estimator)
- WAP：广域保护 (Wide Area Protection)
- ATC：有效输电容量计算 (Available Transmission Capacity)
- DSA：动态安全分析 (Dynamic Security Assessment)
- 其他，如电压及低频振荡失稳的监视及报警等

1.3.7 稳控装置终端 (SPS)

稳控装置终端的基本功能为：

- 根据本身测量（以及和其它设备的通讯），实时判别系统的非正常运行状态（如功角不稳定，频率不稳定，电压不稳定等）及事故类型。
- 控制逻辑的计算或接受。
- 执行控制逻辑。
- 控制逻辑的投入或退出。

目前 CIGRE 及北美对 SPS 均发表了较详细明确的功能需求文件。

1.3.8 通讯

广域保护（稳控）系统的通讯要求分两个方面，一方面是监测测量（即 PMU 与 PDC 之间的通讯），另一方面是稳控系统和稳控装置终端之间的通讯。监测测量，常常也称为广域测量系统 (WAMS)，包括两个内容—实时功角测量和动态性能/扰动监视 (Dynamics Performance and Disturbance Monitoring)。实时功角测量必须具有专用通道，连续实时通讯，保证每秒 50/60 次功角测量的更新速率。动态性能/扰动监视通常是用来作为扰动事件或故障后的数据收集管理分析，不必为实时。需要的通道甚至可以是电话拨号。动态性能/扰动监视功能不仅需要 PMU 数据，同时需要故障录波，SOE 记录仪等其它设备的录波信息。

稳控系统和装置终端之间的通讯根据整个稳控系统的控制要求不同相差很大。在分散方式下，稳控装置可以完全独立运行，其控制方式可预先设定。如果控制方式需要根据 WAMS 的数据，各稳控装置采集的设备状态，经实时整定并下载到各稳控装置，而控制实施时间需要为秒级以下。这时，稳控系统和装置终端之间的通讯要求就非常高，通讯速率要保证，通讯通道需有备份。在有些情况下稳控装置之间可能还需要直接通讯。

1.4 广域保护（稳控）的应用前景

随着广域测量系统及动态安全分析技术的快速发展，广域保护（稳控）有着广泛的应用前景。以下是一些可能的应用领域：

- 系统监测及事故记录。这是广域测量系统最基本的应用之一。记录下的数据可用来复现事故过程，评估控制及保护系统动作，从而改进系统在发生类似事故时的安全性。
- 状态估计。由于功角测量设备可以得到实时同步的系统工况（电压/电流相量的幅值及正序功角），在此基础上进行状态估计可大大提高结果的精度。
- 自适应保护。广域保护（稳控）技术在原理上非常适应于自适应保护的整定，特别是当这类保护的整定值依赖于大区域系统的运行状况（如失步保护）。
- 各类广域稳控系统。广域测量系统和动态安全分析技术的结合使得在线广域稳控成为可能。这项技术可在实时系统工况上对预想事故集进行稳定分析扫描（以功角，低频振荡，电压，或频率的稳定性作为准则）。对于潜在的不安全事故，可根据一定的稳控策略来制定相应的稳控措施，从而大大改善系统的安全性。

2. 稳控技术运行现状及实例介绍

2.1 传统稳控系统 SPS/RAS

北美在早在 80 年代中，就明确规定对稳控设备/系统的设备性能，运行维护的要求。NERC（北美电力可靠委员会）制定的全北美规划标准中[1]，专门有一个章节来阐述电网使用稳控的必要性及必遵循的原则。其中对稳控也进行广泛接受的定义。其定义是“特殊保护系统 SPS 或补救策略 RAS 是设计用于监测系统非正常状态并采取预先计划的修正措施（而不是故障的切除）从而提供可接受的电网系统指标。SPS 的动作，和其它一起，改变电网需求（如切负荷），发电，或者电网结构来维持系统稳定，可接受的电压，或者可接受的设备负荷承受力。”各电网根据 NERC 的标准，制定了更详细的要求。[3,4,5]

从这个定义可以看出，稳控保护的保护对象并不是象常规保护一样有固定非常明确，各电网完全一样的故障或者称一致的“系统非正常状态”。过流保护，各个线路均能用，仅仅是整定值不一样，最后均跳闸。但各电网可能出现的系统非正常状态可能不一样，并且稳控的动作对象及控制策略也不是靠修改整定值所能实现的。这就导致稳控的实现没有一个完全通用的系统设备。北美及国际上其它电网 20 年的稳控运行经验也表明了这一点。在欧洲，SPS 为 Special Protection Schemes。

IEEE/CIGRE 1992 年的一个报告中[10]对国际上使用稳控情况进行了一个总结。在 111 套统计的稳控中，各种稳控策略使用的比例为：

切机组 (Generator rejection)	21.6%
切负荷 (Load rejection)	10.8%
分散励磁控制 (Discrete excitation control)	1.8%
系统解裂 (System Separation)	6.3%
稳定器 (Stabilizers)	4.5%
高压直流控制 (HVDC Controls)	3.6%

失步保护 (Out-of-step relaying)	2.7%
电气制动 (Dynamic braking)	1.8%
机组滑降 (Generator runback)	1.8%
无功补偿 (VAR compensation)	1.8%
各种组合 (Combination of schemes)	11.7%
切机组负荷 (Load and generator rejection)	4.5%
汽轮机阀门控制 (Turbine valve control)	6.3%
低频切负荷 (Under-frequency load shedding)	8.2%
其它	12.6%

在 NERC 的标准中,对稳控系统设备的可靠性要求高于常规的保护。在投运的传统各电网稳控系统中,除中心控制的双通道外,双 CPU 控制器,甚至 3 CPU 控制器的冗余结构是非常普通的。

2.2 典型实例

2.2.1 加拿大的 Hydro - Quebec 电力公司自己开发的可编程减负荷系统 PLSS 有 20 年的经验。Hydro - Quebec 电网的特点是,长距离传送,距离可达 1000 公里。其在 2000 年底投运了一套自称世界上第一个类似规模的稳控系统,以满足 NPCC 的电网要求。包括四个子系统,涉及的稳定问题包括电压崩溃和暂态稳定。要求的系统反映时间在 200 毫秒左右。

- 严重扰动检测子系统 (ECDS)
- 远程系统减负荷子系统 (RLSS)
- 发电机切除子系统 (GRS)
- 可编程减负荷子系统 (PLSS)

系统结构参见图 3。

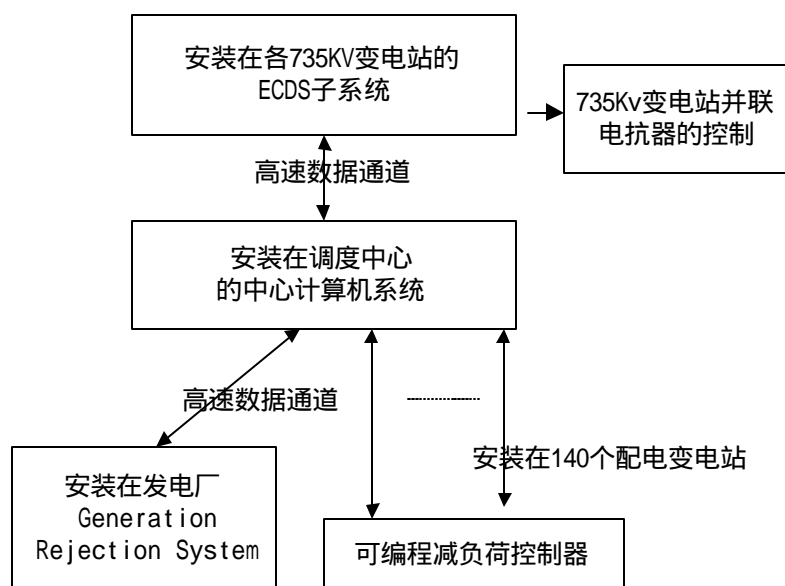


图 3 Hydro-Quebec 的稳控系统示意图

2.2.2 巴西 1999 年 3 月发生了巴西历史上最严重的大停电,一个 440kV 母线故障,导致 HVDC 和 750kV 线路跳闸,失去 24731MW 负荷。以此,巴西进行了稳控方面的大量工作。他们重新审查原有稳控系统的稳控策略,设计投入新的快速考虑各种严重故障的 SPS 系统。巴西稳控系统将整个电网分为多个稳定安全区。各个稳定安全区依各区电网情况投入 SPS 系统,各区 SPS 的主 PLC 安装在变电站。各安全区域的 SPS 之间通讯也有充分的保证。巴西的 SPS 系统完全采用商业化的可编程逻辑控制器 PLC 组成。通道完全采用双通道备用,整个 SPS 的响应时间在 200 毫秒左右。

2.2.3 日本东京电力公司 TEPCO 的稳控系统,TEPCO 称其为解裂系统。东京市及市郊的自己发电容量远远不够。因此在发生大故障时,TEPCO 的目标是解裂系统以保证重要用户的供电。

TEPCO 的稳控系统按计算出的相角差来作为判别稳定的指标,双机热备用的中心计算机与九个变电站的控制采集设备 RTU 通过高速双通道通讯。相角稳定计算,控制在中心计算机 500 毫秒内保证完成,并且每 2 秒计算,正常系统运行条件下,减负荷及电抗器容量,以供解裂后电压控制使用。监视的模拟量 202 个,开关量 271 个。整个系统花费约两千三百万美元。TEPCO 的稳控系统在 1999 年 11 月

成功动作。当天下午 1:42，一架飞机撞上了给东京供电的 275KV 线路。损失负荷 1610MW，稳控系统的正常动作却保证了约 400MW 重要用户的供电。

2.3 基于相角测量的广域测量系统/广域保护实例

采用相角测量的状态估计。西班牙的 CSE (Sevillana de Electricidad) 电力公司，第一个 SCADA/EMS 在线系统中利用相角测量来进行状态估计。CSE 修改了 SCADA 系统，使其能够直接和相角测量设备之间通讯，读取电压正序向量，同时 CSE 修改了传统的状态估计算法，利用相角测量的电压正序向量来改善状态估计的迭代过程。结果是，估计温差指标的降低，反映出状态估计得到的其它测量值更接近真实值。CSE 的经验同时也表明，相角测量的同步精度不能小于 20us，否则对状态估计没有明显的改善。相角测量不能完全取代常规测量。

法国 EDF 电力公司的稳控系统。EDF 电网由 20 个稳控区域组成。稳控系统类似 SPS 系统，但采用各区的相角测量来判别稳定。EDF 建立一个集中广域保护（稳控）中心计算机系统。广域保护（稳控）目标是，在检测到失去暂态稳定时，解裂电网，进行减负荷。从监测到广域保护动作完成，必须在 1.3 秒完成。整个系统花费五千万美元。

加拿大 Hydro-Quebec 的利用相角测量作为发电机的 PSS 控制输入，以改善互联网电网的振荡衰减。分析发现，对某些振荡模式和运行方式下，仅仅是一少部分发电机的 PSS 在具有全网功角信息后，对这些振荡模式的可控性最好。PSS 控制具有两个反馈控制信号，一个是常规的发电机转速，一个是由相角采集系统通过的两个远程电网的频率差。相角测量系统由一个数据集中器和分布安装在 9 个电网区域的功角测量设备组成。数据集中器则提供给各发电机 PSS 所需信息。结果证明，这种控制方式可以稳定一系列以前分析的不稳定事故，并且还可以改善不稳定事故时的母线电压。如果 PSS 进一步使用远方的频率测量，电网能大大改善对远方母线电压的支持。

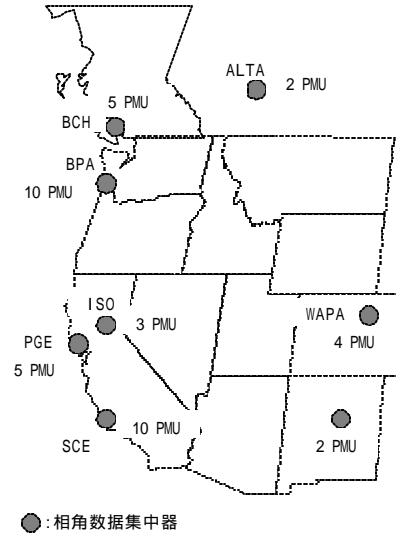


图 4 WSCC 的 WAMS 网络

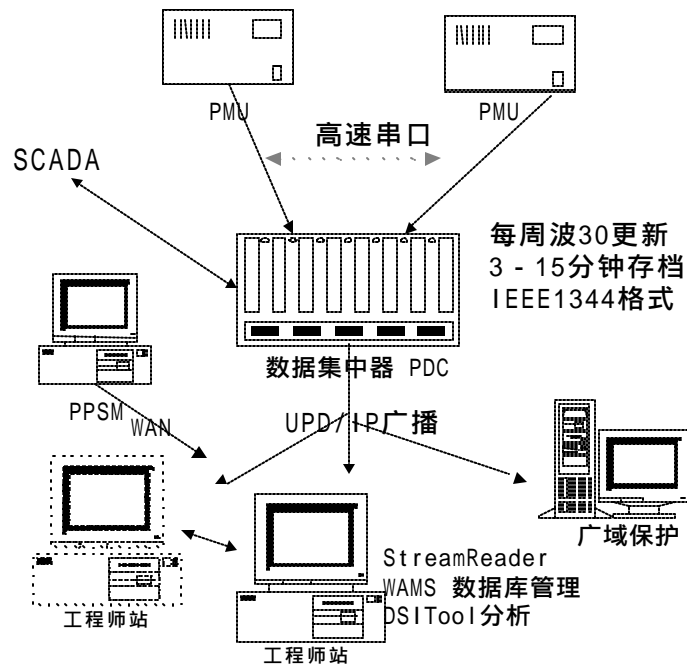


图 5 WSCC 的 WAMS 系统示意图

北美 WSCC 的基于相角测量的广域测量系统 WAMS 可是说是目前规模最大的。参见图 4。其中 BPA，SCE 和加州 ISO 电网的三个相角数据集中器相互之间相互连接。总共有 77 台采集设备。其中，47 台专用功角测量设备，20 台基于 PC 的功角测量 PPSM，10 台其它测量设备。监视约 1200 个信号[7]。参见图 5。

WSCC 的广域测量系统 WAMS 的目的是系统的动态扰动监视。并且 NERC 在 1997 年就制定了相应标准。这些电网没有如何基于 WAMS 的控制。

WSCC 的 WAMS 的功能主要有实时连续测量监视和事件记录。自然可以定义需要记录的事件触发。称其为事件监测逻辑 EDL - Event Detection Logic.

每个输入通道保证两周波的更新速率即每秒 30 次。PDC 记录最新 3 分钟所有输入通道的数据和事件前 55 秒数据。

PDC 功能:

- 采用 VME 工控机，实时操作系统；
- 多个高速串口通讯；
- 多个网络通讯口；
- 与 SCADA 的通讯能力；
- IEEE 1344 格式；

WSCC 的 WAMS 另外具有非常强的分析建模功能。WSCC 的 WAMS 读取分析系统（工程师站）具有自己特殊的数据库管理来管理功角矢量数据,称为 WAMS 数据库管理器。

WSCC 的 WAMS 分析功能（称为 DSI toolset - Dynamic System Identification）有三个目标:

- 电网暂态响应的模式识别（频率，衰减等）；
- 识别电网降阶线性模型参数；
- 识别电网每个动态子系统或分量的参数。

DSI 分析包的基本算法采用付里埃变换及 PRONY 算法。WSCC 的 WAMS 分析包对北美 1996 年大停电事件进行了分析。参见图 6[8]。其中一个结论是，当时有 6 分钟事件来避免后来的解裂。

WSCC 的 WAMS 在 2001 年 5 月对 WSCC 电网成功进行了 FRR - frequency responsive reserves 测试。同时在 2000 年及 2001 年出现的几个大事故中，记录了非常有用的数据。WAMS 在 WSCC 从某个角度，称为了电网性能监视系统（Performance Monitoring）。运行到现在，WSCC 的 WAMS 也有不少问题需要回答。除规约，传感器，GPS 对时问题外，主要问题是如何充分利用这些非常有价值的大量数据。

结论

稳控国际上已有近 20 年历史。传统的 SPS/RAS 系统已经具有积累了丰富的运行经验，成为各个互联电网不可缺少的保护稳定，避免灾难性事故的手段。新一代基于在线相角测试的技术产品为互联电网的稳定运行监视，电网性能动态特性监视，以及广域保护提供了更有效的手段。基于在线相角测试的广域测量系统 WAMS 已逐步成熟。

欢迎和作者联系讨论 jimcai@dsius.com

参考文献

[1] IEEE Publication, 90TH0358-2-PWR, 1990

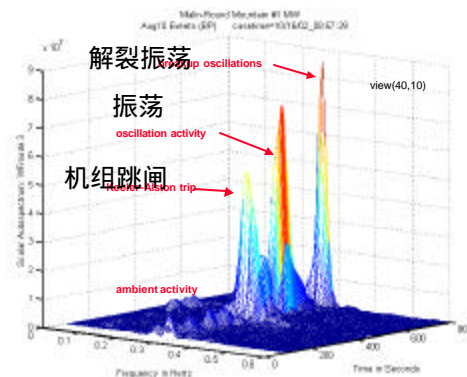


图 6 WSCC 1996 年事故瀑布图



- Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and industry Experience
- [2] North American Electric Reliability Council (NERC), June 2001
Planning Standards
 - [3] Northeast Power Coordinating Council (NPCC), 1988
Special Protection System Guideline
 - [4] Western Systems Coordinating Council (WSCC), 1991
Guide for Remedial Action Schemes
 - [5] Mid Atlantic Area Council (MAAC), 2000
MAAC Special Protection System Criteria (Document A-3)
 - [6] IEEE/PES Working Group C-6, 2002
Wide Area Protection and Emergency Control
 - [7] CIGRE Technical Brochure No. 187, CIGRE Task Force 38.02.19, June , 2001
System Protection Schemes in Power Networks
 - [8] WECC Disturbance Monitoring Work Group, Draft Oct., 2002
The WECC WAMS in 2002
 - [9] PowerTech Labs's Report # 13675-21-00-1, Oct. 2002
Technology Review of Phasor Measurement and Its Application in Remedial Action
Schemes(RAS), Alarming, and State Estimation
 - [10] P.M. Anderson B.K. LeReverend (IEEE/CIGRE Committee Report)
Industry Experience with Special Protection Schemes
IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 11, No.3, Aug., 1996

Current Status and Future of Wide-Area Protection (Dynamic Stability Control) Technologies

Jim Y Cai Lei Wang, Kip Morison, Prabha Kundur Zhou Feng Qiang, Guo Zhi Zhong

XJ(USA), Inc.

PowerTech Lab.

XJ (Beijing)

Abstract

Power system grid's stability had cost a lots for all electric utilities around the world , modern power grid has specific mandatory requirements on the stability control. Dynamic stability control is between conventional protective relay control and SCADD/EMS. Traditional dynamic stability control schemes – SPS (Special Protection System)/RAS (Remedial Action Scheme) has been widely used since 1960s from Europe to North America and have tremendous experiences. Along the development of computer and digital communication technologies, new generation of dynamic performance monitoring system, wide-area protection based on phasor measurement , on-line dynamic stability assessment have been emerged.