

驾驭电网

不断改进广域测量功能，提高电网稳定性

Albert Leirbukt, Ernst Scholtz, Sergiu Paduraru

过去十年，由于世界上发生多次重大停电事故，调度控制中心因此迫切需要早期预警系统。自2008年起，ABB在SCADA和EMS领域的解决方案Network Manager™（电网管理器）已经能够提供广域监测和一系列新型工具，从而可以完全控制长达数千公里的电网。

计算机和通信技术的进步已使先进监控系统的能力远高于经验最丰富的操作人员。例如，主要汽车制造商现在都提供具备电子稳控系统的驾驶模块，用于替代人工控制。在飞机工业中，正在开发的智能飞行控制系统甚至可以帮助缺乏经验的飞行员将受到严重损坏的飞机安全着陆。输电行业领域的广域监测系统(WAMS)就是这种先进技术的一个例子，它已为业界所接受。当前，在输电基础设施缺乏，计划和运行人员不足，以及设备老化的情况下，输电系统运营商(TSOs)必须能应对更多的电力输送。WAMS 现已形成了重要的积木式组装模块以支持 TSOs 完成复杂的任务并满足其日益增加的应用要求，但这同时也促使 WAMS 不断提高其性能，并且增加新功能。

广域监测系统能向输电系统运营商提供电网运行的当前状态。

WAMS 技术能提供什么

交流系统中，电压和电流的信号是随时间变化的理想正弦波，如图 1a 所示。大规模电网中包含有许多分散的发电机组和用电设备，在不同地方的电压和电流幅值及相位都是不同的。常规的遥测单元(RTUs)只能测量其幅值而不能记录其相角。

但相角通常是能够反映电网状态的珍贵信息。WAMS 在测量简单的电压和电流幅值的同时也能采集到这些相角信息。

WAMS 由分散安装在电网中的相量测量单元(PMUs)组成，带有时标的测量值由 PMU 发送给相量数据收集器(PDCs)，并在 PDCs 中根据

要求进行数据处理。以历史数据为支持，WAMS 通过人机界面向 TSO 的调度员提供了电网的当前状态(见图 3)。

PMUs 是高精度的智能电子器件(IEDs)。除了测量频率、电压和电流的幅值，GPS 同步特性还使其能够直接测量变电站之间的电压相位，从而可对全系统快速进行状态评估。PMUs 暂态相量测量频率最高为每个周波一次(即在 60 赫兹系统中每秒 60 次)。

虽然 PMUs 提供的是在同一时刻取得的采样值，但由于以太网通信的随机延迟特性，这些采样值到达 PDC 的时间具有随机性。因此，在信号处理之前 PDC 先要将输入的带有时标的相量测量值进行分类。

信号处理用于将大量的 PMU 数据转换成可执行信息，以便直接提供或通过 SCADA/EMS 提供给调度员，用于执行相应操作。这样的信号处理方法通常只是作为 WAMS 的一种应用，WAMS 的应用概况见[1]。

作为 SCADA/EMS 系统的一部分或独立的 WAMS 系统，WAMS 应用结果通常显示在人机界面上，为操作人员提供实时电网关键信息和报警功能。

WAMS 历史数据在对事故进行事后分析过程中可提供非常宝贵的信息。这些数据所包含的信息有助于说明整个输电系统对扰动的响应，更好地理解系统的动态特性并有助于调整系统中的计算模型。

ABB 拥有最完整的 WAMS 解决方案，并能根据客户的要求进行量身定制，其中包括 PMUs 和能与 Network Manager SCADA/EMS 相集成的独立系统。

完整的 WAMS 产品系列

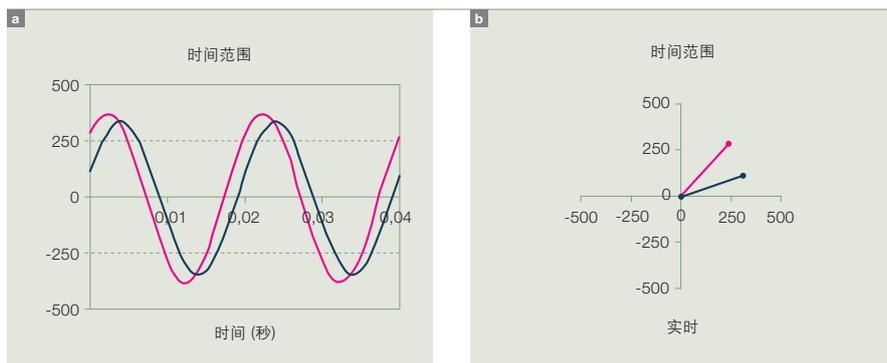
ABB 作为 WAMS 技术的开拓者，拥有最全的 WAMS 解决方案，并且能根据客户的特殊要求提供定制设计的系统。

ABB 的 WAMS 产品家族包括：PMUs、独立系统、能够与 SCADA/EMS 相集成的系统，以及客户定制的系统。

PMU 技术

2003 年，随着 RES521 产品的出现，ABB 发布了相量信号采集的数量和质量标准，而这时 PMU 工业标准还正处于制定之中。2007 年，ABB 对 RES521 进行了升级，使其符合同步相量 IEEE C37.118

1 矢量代表两个假设地点上交流电压的波形，一个地点上的电压为 260V(红色线)，另一个地点上的为 240V(蓝色线)



系统创新

通信协议标准。现在ABB正在开发下一代PMU。ABB正在提升其新型 IED REx670 平台的水平，采取的主要措施包括增加 PMU 功能，满足日益增加的模拟和数字 I/Os 要求，提高通信灵活性，引入 IEC 61850 协议，以及进一步完善的 WAMS 功能。部分功能随后加以介绍。

独立的 WAMS

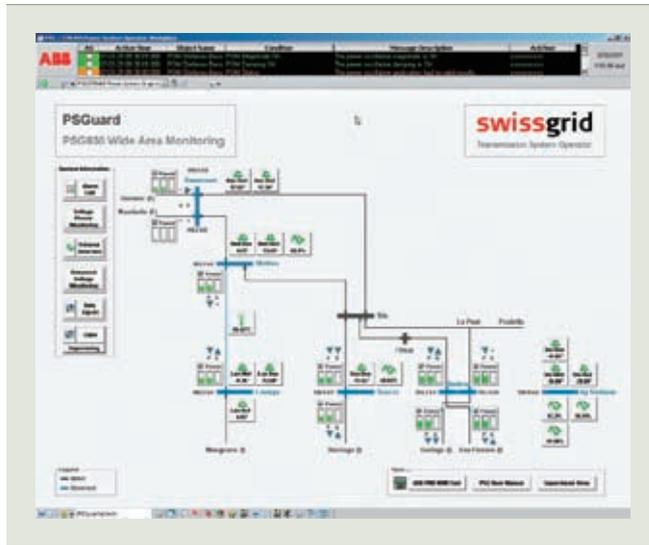
PSGuard 是 ABB 应用 WAMS 技术开发的 标准产品，也是世界上最先采用 PMU 测量技术的商业产品。基于过程控制系统 800xA，PSGuard 可提供 HMI、PMU 数据采集、数据存储和输出、报警功能、WAMS 应用以及与第三方 SCADA 系统的链接等功能。PMU 数据还能通过通信网关在不同 TSOs 之间进行实时交换。图 2 显示的是在瑞士电网进行 HMI 安装作业的情况，输电系统操作人员位于瑞士。

PSGuard 是 ABB 应用 WAMS 技术开发的 标准产品，也是世界上最先采用 PMU 测量技术的商业产品。

Network Manager WAMS

ABB 的 Network Manager SCADA/EMS 为电网系统的运行提供众多的功能，如电网控制、可广泛应用于发电、输电和配电的先进 SCADA 系统。这些系统能够使电网公司收集、存储和分析大量的数据，这些数据源自国家电网和地区电网中成千上万个数据测量点。ABB 的 Network Manager 已经包含了 WAMS。目前在 SCADA 的测量系统中已经可以采集常规的 RTU 信息

图 2 为瑞士“Swissgrid”电网安装的独立 WAMS。

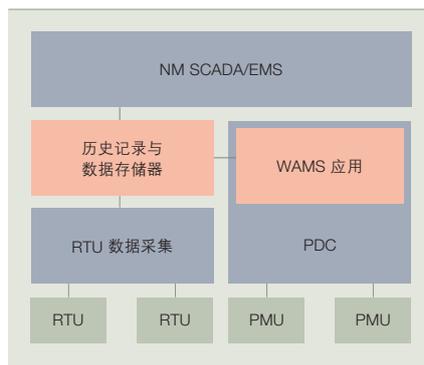


和 WAMS 信息，与 WAMS 有关的报警与指示信息也已包含在 SCADA/EMS 报警列表中。而且 EMS 系统也可以利用 WAMS 信息进行系统状态评估，以提高其分析精度。

图 3 WAMS 的一般结构



图 4 具有集成 WAMS 能力的 Network Manager



Network Manager 的标准通信前端系统 PCU400，也已具备 PDC 功能，用于接收和同步 PMU 测量信号，并执行 WAMS 应用功能。为实现未来广域控制功能，PCU400 还能与 ABB 的 MACH2™ 控制系统通讯，用于控制 FACTS (柔性交流输电系统) 和 HVDC (高压直流输电) 系统(见图 4)。

WAMS 的应用

ABB 对 WAMS 应用方面的模块化设计使客户可以自由选择 在 PMU 硬件，PDC 中或

在中央控制单元里实施对 WAMS 的应用，这就保证了通信和 CPU 负荷的最佳设计。目前已能实现的 WAMS 应用功能说明如下：

- 相角监测 (PAM) — 通过监测某些关键变电站之间的相角关系，可观测出系统扰动，即使这些扰动可能发生在 TSO 管理范围之外的电网中。
- 线路的热监测 (LTM) — 根据从输电线路两端所测的相量值来评估导线的平均温度。瑞士电网和奥地利 Verbund-Austrian 电力公司 (APG) 的电网中都已安装 LTM，更详细的情况请见 [2]。
- 电压稳定性检测 (VSM) — 利用输电走廊两端的相量测量值实时评估该输电走廊的电压稳定性。VSM 已经安装在克罗地亚 Hrvatska Elektroprivreda (HEP) 电力公司的电网中。
- 导致事件发生的数据存档 (EDDA) — 探测在事件发生前、发生过程中和发生后的某个时段内系统所受到的扰动，并记录 WAMS 对系统作出的反应。
- 功率振荡监测 (POM) — 输电网发生功率振荡时向调度员报警。

■ PMU 辅助状态评估 (PMUinSE) —Network Manager 的状态评估器能够利用 PMU 数据来提高状态评估的准确性。

上述最后两项，即 POM 和 PMUinSE，是最新开发的两个 WAMS 应用功能 [3]。

POM: 确定对稳定性的威胁
功率振荡是电力系统中很常见的一种现象。当个别发电机或者许多发电机通过输电系统相互作用时就会出现这种情况。

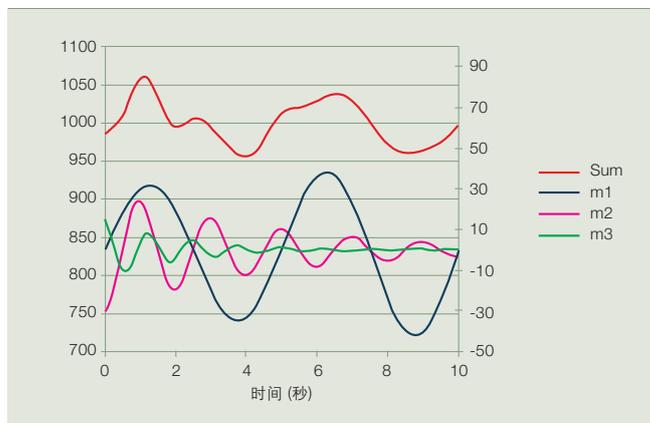
通常这样相互作用的情况不止一种，因此功率振荡可能呈现出多种模式，且每种都有一个特殊的频率。当系统具有较长的径向线路，同时发电站又远离用电中心，该系统就容易出现功率振荡。当功率振荡比较小且又能很快衰减时，那就可以不必关注，但是当振荡持续下去或者不断增强时，则必须立即引起操作人员的注意。

ABB 的 Network Manager SCADA/EMS 可为电网系统提供许多功能，如电网控制，可广泛应用于输电、发电和配电的先进 SCADA 系统。

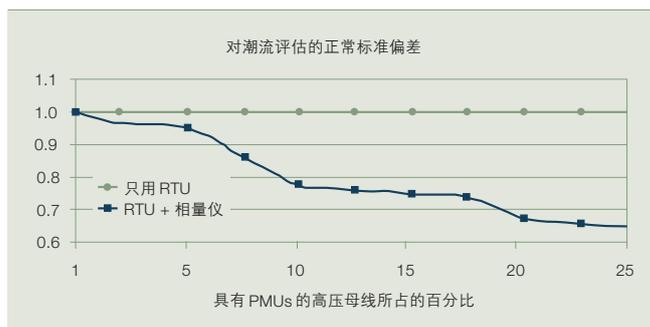
由于当前系统缺乏时间分辨能力，现有的 SCADA 系统不能实时反映功率振荡。但是利用 WAMS 提供的高精度测量值(带有时标)，再对这些测量值进行适当的信号处理后可以显示出这些功率振荡。

POM 的应用是一种享有专利权的

5 功率振荡会有多种模式，红线代表所测到的功率振荡值(左边刻度)。m1、m2、m3 表示所测电网中的振荡模式。



6 利用多次 PMU 测量值来提高对状态的评估精度(实验是在一个具有 39 条母线系统中进行的)。



方法，它可以发现和辨识功率振荡并可分辨出振荡中的各个主要模式，再把重点放在那些值得关注的模式上。为了说明起见，假设有一个功率振荡如图 5 (红色曲线) 所示，仅仅根据这个信息判断该振荡是否值得关注很困难。但是应用 POM 就能确定当前的功率振荡实际反映了三种模式 m1、m2、m3，而且模式 m1 是不断增加的，需要迅速引起操作人员的注意。能实时提供这种信息是对稳定性监测的一个突破。POM 功能已实现商业化，现已安装在世界多个电网中(例如：泰国发电局(EGAT)，芬兰的 TSO Fingrid 电网，克罗地亚的 Hrvatska Elektroprivreda (HEP) 电力公司，瑞士的 TSO Swissgrid 电网和挪威的 TSO Statnett 电网)。欲了解各相关方法的详细情况可参阅 [4]、[5]。

基于 PMU 的状态评估器

SCADA 对电压和电流的测量为系统操作人员提供了系统状态的静态短暂图景。但是这些测量值也常常显示出一些错误(例如测量偏差，远程测量中的误差)，状态评估器 (SEs) 主要用于给 SCADA 测量值和系统模型寻找一个最适宜的母线电压统计值。SE 是 EMS 的核心，SE 的每一项改进将有利于 EMS 的各方面应用(例如故障分析，电力市场的运作)。通过增大用于存储电压和电流相量的实时数据库容量，把精确的 PMU 测量值集成到 Network Manager 中去，使 ABB 能够提供更准确的 SE。有关 SE 在这方面的详细技术讨论请参阅 [6]。

图 6 显示的是随着 PMU 测量电网水平的提高，SE 的精度也随之提高。虽然 PMU 现在测量实际输电网络的水平依然较低，但是随着把测量装置 IEDs 改造成具有 PMU 功能，再结合系统中安装的新 PMUs，那么我们可以期望未来 5 到 10 年内，这种水平终会获得重大提高。可以相信，将相量测量与状态评估相集成必将在不久的将来得以广泛应用。

ABB WAMS 的相关记录

ABB PMUs 及其在各方面的应用记录有据可查，现已有 200 多台 RES521 PMUs 安装在世界各地，WAMS 也已安装在奥地利 (APG)、克罗地亚 (HEP)、芬兰 (Fingrid)、挪威 (Statnett)、瑞士 (Swissgrid) 和泰国 (EGAT) 等电网中。安装在欧洲的 WAMS 系统也可以通过通信网关

系统创新

实时交换一些经过筛选的 PMU 数据 (见图 7)。这些数据可用于监测功率振荡和全欧洲的电压相角差。

从 2007 年起, 第一款与 Network Manager 相集成的 WAMS 产品已经

在挪威 TSO (statnett) 控制中心运行, 并在四个不同的变电站中安装了 PMUs (见图 9)。此外, 通过通信网关从芬兰收集到的 PMU 测量值已可应用在 Fingrid 电网中, Statnett 上的 PDC 则对从 Hasst 变电站到瑞典

的线路上的潮流进行了 POM 分析。利用国家仪表研究所的 Labview 软件, Statnett 也已经开发出它们自己的分析应用软件, 可以同时访问 SCADA, WAMS 和暂态故障录波数据, 为事后故障分析提供强有力的工具。关于在 Statnett 电网中使用 Network Manager WAMS 的详细情况可参阅 [7]。

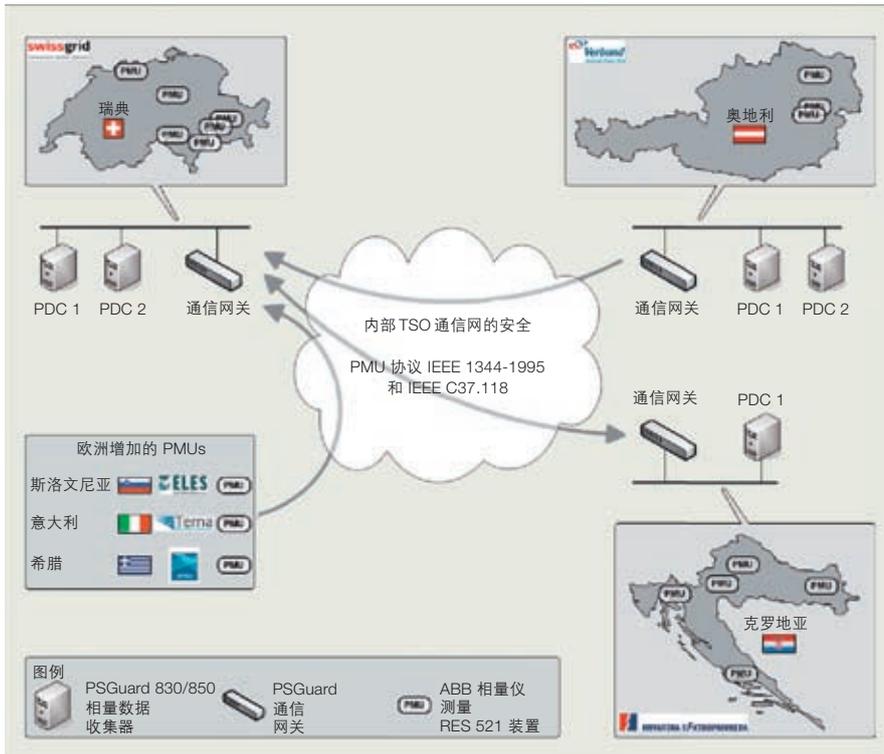
在欧洲, 实施 SmartGrids (智能电网) 的第一步是起草用于实现未来电网的技术路线图, 而 WAMS 正是所考虑的关键技术之一。

振荡事件

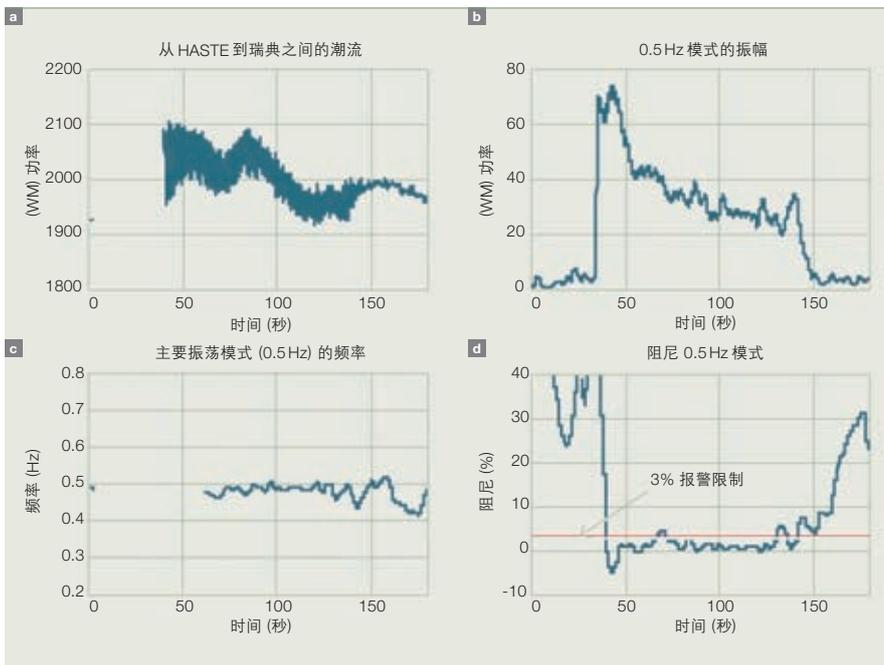
2007 年 8 月 14 日, Statnett 电网上运行的 WAMS 所记录的功率振荡是一个很有说明意义的例子。那天, 由于线路故障加上不适当的发电调度导致挪威输电系统出现持续的功率振荡。其相应的 POM 信号如图 8 所示。图 8a 所示为挪威到瑞典的潮流, 其中最重要的振荡模式对应的频率如图 8c 所示。由图可知, 0.5Hz 振荡模式, 即北欧电网广为人所知的特征模式, 被激发并成为主导振荡模式。图 8b 所示的是该模式的振幅, 当振荡刚出现并经过约 35 秒, 其振荡大幅增加, 直至最后。振荡出现期间, 这种模式的阻尼情况如图 8d 所示, 从满意值下降到负值后一直处于很低值, 把 POM 输出信号送入 SCADA 系统, 当振荡发生时就可为操作人员生成一个简单的显示信号。

值得注意的是, 即使功率振荡源自 Fardal 和 Nedre Rössåga 站之间的中间地区, 即离瑞典的交界处南部相当远, 但利用 POM 仍能很容易发现这些振荡。因此通过重点配置 PMUs 和 POM, 并利用它们对关键

7 在欧洲的 WAMS 数据交换



8 2007 年 8 月 14 日, 发生功率振荡事件时 POM 的反应



变电站进行监测就能观察到整个电网的稳定性。关于此次事件的更详细讨论请参见[8]。

ABB 全系列产品可提供：能与 Network Manager SCADA 相集成的 PMUs、PDCs、WAMS 以及各自独立的系统，或者提供能与第三方 SCADA 系统相集成的解决方案。

今后方向

电力行业已经开始认识到 WAMS 的好处，并且也已开始采用 WAMS

技术，因此在电力系统运行中采用同步测量仍有巨大的开发潜力。几个正在进行的大技术项目将有助于 WAMS 的推进。在欧洲，实施 Smart-Grids (智能电网) 的第一步是起草用于实现未来电网的技术路线图，而 WAMS 正是所考虑的关键技术之一。在美国，美国电科院 (EPRI) 也开展了一项研究计划，目标是为了大规模实现智能电网概念提供技术基础。在北美的同步相量启动项目 (NASPI) 是美国另一个处于领先地位的计划，其目标是增加 WAMS 的应用，同时加速其新功能开发，从而

进一步提高电网运行可靠性。

长期以来，ABB 一直是 WAMS 领域的开拓创新者，不断地开展研发工作，推动技术进步。例如对有利于提高监测和控制输电系统的 WAMS 的开发。由于这是一个很早就开始而现在仍在进行中的工作，ABB 因此具有最完整的产品组合，可以提供能与 Network Manager SCADA 相集成的 PMUs、PDCs、WAMS，以及各自独立的系统，或者能与第三方 SCADA 系统相集成的各种解决方案。

8 PMU 变电站



Albert Leirbukt
ABB 电力系统业务
挪威奥斯陆
albert.leirbukt@no.abb.com

Ernst Scholtz
ABB 研究中心
美国罗利
ernst.scholtz@us.abb.com

Sergiu Paduraru
ABB 电力系统业务
瑞典维斯特拉斯
sergiu.paduraru@se.abb.com

致谢：

本文作者感谢 Mats Larsson、Petr Korba、Reynaldo Nuqui、Neela Mayur、Michael Geiger、Hugo Meier 对本文所作出的贡献。

参考文献：

[1] Novosel, D., Madani, V., Bhargava, B., Vu, K., Cole J. (2008) Dawn of the Grid Synchronization. IEEE power & energy magazine January/February.
 [2] Weibel, M., Sattinger, W., Steinegger, U., Zima, M., Biedenbach G. (2006) Overhead Line Temperature Monitoring Pilot Project. CIGRE Session.
 [3] North American Synchro-Phasor Initiative Meeting June 11–12, 2008, Bellevue, Washington, <http://www.naspi.org/meetings/workgroup/workgroup.stm>
 [4] Korba, P. (2007) Real-Time Monitoring of Electromechanical Oscillations in Power Systems. IEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution. 1/80-88.
 [5] Turunen, J., Larsson, M., Korba, P., Jyrinsalo, J., Haarla, L. (2008) Experiences and Future Plans in Monitoring the Inter-area Power Oscillation Damping. IEEE PES General Meeting.
 [6] Scholtz, E., Nuqui, R. F., Finney, J. D., Larsson, M., Subramanian, M., Lin G. Estimation of Real-Time Power System Quantities using Time-Synchronized Measurements. US Patent Application 11/609,393
 [7] Leirbukt, A., Breidablik, Ø., Gjerde, O., Korba, P., Naccarino, J., Uhlenand, K., Vormedal, L. K. (2008) Deployment of a SCADA Integrated Wide Area Monitoring System. IEEE T&D Latin America.
 [8] Uhlen, K., Warland, L., Gjerde, J. O., Breidablik, Ø., Uusitalo, M., Leirbukt, A., Korba P. (2008) Monitoring Amplitude, Frequency and Damping of Power System Oscillations with PMU Measurements. IEEE PES General Meeting.