

电力系统中基于 PMU 同步数据的应用研究综述

丁剑,白晓民,王文平,赵伟,方竹

(中国电力科学研究院,北京 100085)

摘要: 基于同步相量测量技术的广域测量系统为电力系统各领域中新应用功能的研究开发提供了全新的数据支撑平台。文章简要介绍了同步相量测量技术及在此基础之上的广域测量系统的发展现状;着重分析了 PMU 量测数据在包括阻尼控制、暂稳分析及控制、电压稳定、解列控制在内的电力系统动态领域以及包括线路参数测量、状态估计、潮流计算在内的电力系统稳态领域和继电保护领域中的应用研究情况;同时对这些应用研究的特点、优点以及存在的主要问题进行了相应的评述。

关键词: PMU; 同步相量测量技术; 广域测量系统; 电力系统动态; 电力系统稳态; 继电保护

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0000-00

0 引言

在过去的几十年里,世界上许多国家的区域互联电网都曾发生过大停电事故^[1],给社会生活和经济发展带来了巨大的冲击。随着全球电力市场化浪潮的兴起,电网运行的条件和环境日益复杂,电网安全稳定问题日渐突出。这也导致近年来全世界大停电事故的发生频率和严重程度都有加重的趋势。为了应对电力市场化给电网运行带来的严峻考验,电力系统迫切需要有新的技术手段来加强电网的动态安全监控能力,提高电网安全稳定水平。

近年来,基于同步相量测量技术的广域测量系统在电力系统中的应用日渐增多^[2-4],为上述问题的解决提供了新的技术手段。广域测量系统中的同步相量测量单元(PMU)利用 GPS 系统的高精度授时信号,能实现对电力系统各个节点动态数据的同步采集。其在电力系统中的广泛应用不仅为解决电网安全稳定问题,提高电网动态安全水平和防止大停电事故提供了新的技术途径;同时 PMU 装置采集的同步数据也为电力系统在线应用领域中的分析、控制功能的研究开发提供了新的数据源。

同步相量测量技术及在此基础之上的广域测量系统已成为电力系统中一个非常活跃的研究领域,文献[5~7]从广域测量系统的体系架构、同步相量技术的发展过程等角度对广域测量系统自身的发展现状和前景展开了综述;文献[8]对 PMU 同步数据

在暂稳分析方法中的应用情况进行了介绍。而在广域测量系统自身的一些关键测量技术已基本解决的今天,基于其同步测量数据的高级应用研究仍需进一步的开展和完善。本文就主要针对电力系统相关领域中基于 PMU 同步数据的应用研究情况展开综述,主要介绍 PMU 同步数据在电力系统动态、电力系统稳态、二次保护等领域的应用研究情况,以期对该领域的研究工作有所促进。

1 PMU 技术的发展现状

经过多年的发展,同步相量测量技术领域中的一些关键测量技术问题已得到了基本解决;基于同步相量测量技术的广域测量系统在国内外也已经有了不少成功应用的先例^[2-7,9]。

当前广域测量系统的 PMU 装置以 GPS 为采样基准,能全网同步采集机组和线路的电压、电流以及重要的开关保护信号;并能计算得到电压和电流相量、频率和频率变化率、机组和线路功率、发电机内电势(功角)以及根据机组键相信号实测机组功角;同时还能提供扰动触发的暂态记录。以韩国电力公司(KEPCO)实施的广域监测系统为例,其时间同步数据采集系统 TSDS(time synchronized data acquisition system)所测数据的采样频率为 7 680Hz,每个周波采样 128 次^[4]。

以上 PMU 装置能测量和计算得到的数据类型及其性能指标表明:基于 PMU 的广域测量系统能实现对电力系统动态过程的监测,其测量的数据能反映系统的动态行为特征。PMU 技术及在此基础之上的广域测量系统为电力系统提供了新的测量和监

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划资助项目(2004CB217904)。

控手段,其突出的优点是:可以在时间-空间-幅值三维坐标下同时观察电力系统全局的机电动态过程全貌。

当前 PMU 技术及在此基础之上的广域测量系统所处的发展阶段为:该领域中的关键测量技术已经基本解决,应用理论体系尚需完善,目前的热点研究方向是直接应用向量实现控制^[10]。

2 基于 PMU 同步数据的电力系统动态应用功能

现有 EMS 系统仅采集电压、电流、有功、无功等的有效值,缺乏对描述系统机电动态行为十分重要的相角、内电势及其派生量;且其得到的系统数据是历史的、不同步的,因此只能监测系统的稳态或准稳态运行情况。故障滤波装置只能记录扰动前后局部量的动态,也无法给出全局的同步动态过程描述。只有基于同步相量测量技术的广域测量系统能在时、空、幅值三维坐标下实时并且同步地观测系统全局的动态过程,弥补了现有 EMS/SCADA 系统和数字故障滤波系统的不足,同时也为电力系统动态分析与监控提供了最直接的技术手段。因此,基于 PMU 同步数据的电力系统动态应用功能的研究已成为了当前电力领域关注的热点问题。

2.1 阻尼控制

现代电力系统中,互联电网的规模越来越大,远距离功率传输的容量也日益扩大,使得低频振荡问题日渐突出。要抑制低频振荡,保持系统的动态稳定,首先必须对低频振荡的模式等有深入的了解。传统的经典低频振荡分析方法是特征值分析法,只能适用于离线分析。而电力系统的振荡模式总是随着运行条件的改变而变化,离线获得的结果并不能保证在线计算的精确性。文献[11,12]基于 PMU 的广域量测数据进行了低频振荡模式及其在线识别方法的研究。文献[11]讨论了机电振荡模式的在线评估,利用 PMU 采集的系统动态数据来识别系统正常运行时的振荡主频率和阻尼。文献[12]提出了基于广域测量的低频振荡在线动态跟踪的改进 Prony 算法,用样本矩阵奇异值分布的特征来识别降阶信号模式。所提方法在原始信号中有大量噪声的情况下,仍表现出了较好的性能。

传统的稳定控制装置均是采取就地信息进行控制,随着电力系统的不断扩大和复杂化,这种分散就地控制的缺陷日益显现:缺乏全系统的信息,分装在不同点的装置之间不能相互协调,在严重的情况下

甚至不能有效地实现稳定控制。而完全由一个控制中心实现全局的集中控制,相对于电力系统的大规模、分散性、多层次、地理分布广、暂态过程快的特点,也是较困难的。文献[13~15]针对这些情况,提出了一种引入远方信号反馈的广域 PSS 的设计方法,同时还提出了分散/分级的稳定控制结构(decentralized/hierarchical architecture)。其中,文献[13]对基于约束优化的 PSS 设计原理展开了讨论。其优化问题可以归结为用如下公式描述:

$$\min_p J(p) \quad \text{subject to } \{C_1, C_2, C_3, C_4\} \quad (1)$$

其中: J 是作为目标函数的模型性能指数(modal performance index), p 代表 PSS 参数向量, $C_1 \sim C_4$ 为各种约束条件,具体如下: C_1 为稳定性约束条件; C_2, C_3 为系统的鲁棒性约束条件(Robustness Constraints); C_4 为抗干扰约束条件(Noise rejection constraints)。文献[14]在此基础上,应用状态空间系统识别方法得到了魁北克水电系统的大规模的小信号分析模型,并利用该线性化的多输入-多输出模型设计了引入远方 PMU 量测的广域稳定控制器(global stabilizing controller)。文献[15]在前叙两文的基础上,着重讨论了分散/分级式的控制结构。该分散/分级式控制结构的理论基础是大系统的多层控制理论,不同于严格意义上的集中式控制。与常规控制结构相比,具有更高的运行灵活性和可靠性。

在工程实际应用中,为了获得更好的稳定控制效果,远方 PMU 装置数据传输的通讯延时也必须在阻尼控制的设计中予以考虑^[16,17]。文献[16]提出了一种考虑远方反馈信号通讯延时的阻尼控制设计方法:基于预测器的 H 控制设计策略。但是文中对任何的通讯传输通道都假定其延时为固定值。该假定与实际情况不符,因此有待进一步的改进。

文献[18]开展了交直流电力系统中的阻尼控制研究。提出了一种基于 PMU 的直流附加控制器,具体作法是利用 PMU 装置得到的区域间电压相角差信号作为控制器的输入信号对系统进行角度控制。该方法能够较好地阻尼系统的低频振荡,提高交直流系统的传输能力,同时具有较好的鲁棒性。

2.2 暂稳分析及控制

稳定破坏是电网中较为严重的事故之一,大型电力系统的稳定破坏事故,往往会引起大面积的停电,因此快速、准确的暂稳分析及控制对于防止系统的稳定破坏意义重大。现有的暂态稳定分析方法按其采用的系统模型情况,大致可以分为三类:一是经

典的时域仿真法,或称逐次积分法,需要考虑系统的精确模型;二是经验型预测方法,如数值预测、人工智能方法等^[19~24],这类方法无需考虑系统的物理模型;三是介于前两者之间的考虑系统简化模型的分析方法^[25~30],例如直接法等,这类方法通常都采用了合理的系统简化模型。

经典的时域仿真法是一种可靠的暂稳分析方法,可以精确地考虑各种复杂模型。但是其计算量很大,计算速度慢,且不能给出系统稳定裕度的定量指标,在现有技术条件下还较难应用于电力系统的在线稳定分析。而经验型预测方法和考虑系统简化模型的分析方法,前者不考虑系统模型,后者采用简化的系统模型,这样就大大减少了计算工作量,提高了暂稳分析的速度;再结合 PMU 装置提供的快速广域同步量测数据,有望取得较好的在线应用效果。

在经验型预测方法的研究中,文献[20]基于 PMU 实测的发电机转子角度,采用自回归方法进行预测,当预测出系统失稳后,就进行切机控制。文献[21]在此基础上对切机控制策略进行了改进。文献[22]利用 PMU 采集的功角数据,通过多项式的方法快速预测功角的未来变化,同时采用了动态智能修正来提高精度。文献[23]提出了一种模糊神经网络算法,用于暂态稳定的失稳预测和切机控制。为了解决系统规模大带来的训练困难问题,文章又提出先对输入样本进行模糊分类,然后对各类样本分别训练径向基网络的作法。由于经验型预测方法不考虑系统的物理模型,且通常不需要系统的先验知识,因此,计算速度较快;但是其结果的准确性有待进一步的验证。

而在考虑系统简化模型的分析方法^[25~30]中,国内外的研究方向主要是以下两个。

一是改进现有的模型和方法,以提高速度和准确性。例如文献[25,26]基于 PMU 量测数据,对 EEAC 直接法进行了改进,提出了紧急 EEAC (Emergency EEAC, EEEAC)的思想。与 EEAC 不同的是: EEEAC 所需的电气量均是实测得到,因此 EEEAC 完全反映了暂态稳定的三要素:故障前的运行方式和潮流,故障的冲击和故障后的运行情况。这就突破了暂稳分析中基于“预想事故”的思维模式,可以进行实时分析、实时控制。

二是寻找新的稳定求解的理论和方法。例如,文献[29,30]提出了基于 PMU 量测的系统失步预测方法。该方法的具体作法有如下五个步骤:1)根据 PMU 测量并计算得出的各发电机的相对相角,选

择和确定具有相似摇摆性的机组群;2)将每一个机组群聚合为一台等效的发电机模型;3)通过相量测量对简化后的系统模型进行状态评估;4)通过对摇摆方程的求解,预测各等效发电机的相角;5)检测预测相角,判别机组群的失步情况。文献[29]给出了机组群相似判别指标 I_{ij} (coherent decision index) 的计算公式:

$$I_{ij} = \sum_{t=t_i}^{t_i+T} (\delta_i(t) - \delta_j(t))^2 \quad (2)$$

式中: δ_i, δ_j 为发电机 i 和 j 的相角, t_i 为测量的起始时间, T 为时间段。文献[30]在得出相似机组群的基础上,应用单机-无穷大母线模型进行失步预测并计算得出了各机组群的稳定裕度。

就考虑系统简化模型的分析方法而言,由于其对系统模型进行了合理的简化,既降低了计算量,提高了计算速度;又保留了必要的分析精度,因此在在线分析领域中,具有较好的实用前途。

2.3 电压稳定

电力系统的电压不稳定,通常出现在电源远离负荷中心或输电系统带重负荷的情况,当无功电源突然切除,或者无功电源不足,而负荷持续增加到一定程度时,就有可能使电压大幅度下降,诱发电压稳定问题。

传统的保持电压稳定的方法如低压减载和基于单一母线上电网戴维南等效评估方法等的共同特点在于其分析数据都是本地静态量测值。而近年发展起来的基于 PMU 直接量测值的电压稳定分析方法^[31~33]与这些传统的方法相比,由于其使用了基于 PMU 量测的广域动态数据,因而有着明显的优越性,具体体现在以下两点:(1) PMU 直接量测值的更新频率远快于传统的本地静态数据,这样就消除了传统方法中固有的延时问题;(2)直接使用 PMU 量测值进行分析,可以避免在使用经过状态估计得到的数据时,可能存在的误差重叠带来的数值不精确问题。其中文献[31]基于 PMU 直接量测,提出了用于电压安全水平预测的分类型决策树模型(DT)。由于决策树模型算法无需进行浮点的数值运算,运行速度快,再结合 PMU 的快速直接量测,可以迅速地完在线电压安全评估,这样可以在运行过程中为修正和预防措施的采取预留更多的时间。而文献[32]提出的输电走廊电压稳定评估新方法,由于使用了 PMU 的快速直接量测,其近似稳定裕度结果的更新速度很快,在确定线路最大功率传输极限时,可以作为在线动态额定值的设定基础。与传统离线电

压稳定极限的计算方法相比,该方法使用反映电网实际运行状况的 PMU 直接量测数据,可以降低计算结果的保守性。

2.4 解列控制

失步解列作为稳定控制的后备,是减轻失步造成的后果和防止系统大面积停电的重要措施。目前国内高压电网解列装置使用的失步判据主要有以下三类:基于阻抗的变化规律;基于 U 和 I 的相位角的变化规律;基于 $U \cos \phi$ 的变化规律。这些传统的基于本地量的失步判据存在着以下两个缺陷:一是无法在第一个异步周期内对系统实施解列;二是无法精确确定振荡中心的位置。

由于 PMU 装置能准确判断失步振荡中心的位置,且其数据具有很高的刷新频率,因此,进行失步解列应是 PMU 很有前途的应用领域^[34-37]。其中文献[35]提出了基于同步相量测量单元的预测型振荡解列方法,指出振荡中心两侧母线电压的相角差反映了功角差,利用该相角差的变化速度及符号,可以实现预测解列功能。文献[36]提出了基于广域量测系统的协调型失步保护系统(coordinated out-of-step protection system)。该系统主要有失步检测、快速解列和优化解列三个功能模块。由于使用了具有高刷新频率的广域量测数据,因此与传统的失步保护相比,该系统具有以下三个优点:一是能在第一个异步周期里发出解列指令;二是由于能够确定振荡中心的位置,因此能在振荡中心对系统实施解列;三是由于所用的数据仅是线路的广域量测值,因此对电网结构和运行方式的变化有较好的适应性。

与一般意义上的解列控制有所不同,分布式发电设备的解列装置其功能是:当分布式发电设备带负荷与主网分离时,必须由孤立检测系统(islanding detection system)将分布式发电设备与负荷解开。文献[37]提出的基于 PMU 量测的电压角度差的新型孤立检测方法,与传统的基于频率的保护系统相比,可以较大程度地提高检测的灵敏度。

3 基于 PMU 同步数据的电力系统稳态应用功能

尽管在电力系统中开发和应用 PMU 装置的主要目的是用于稳定控制,但是 PMU 装置所能提供的量测信息也为稳态领域中传统应用功能的改进和新应用功能的研究提供了新的数据源^[38-42]。

准确的线路参数是正确进行潮流计算、故障分

析、网损计算和继电整定等电力系统计算的基础。传统的测量方法为停电测量,即所测线路必须停电,且脱离电网。而要实现线路参数的带电测量,其主要难点在于零序参数的测量。文献[38]针对该问题,提出了基于同步相量测量的不对称增量法,能够随时提供线路正序参数,在负荷不平衡度较大或所测线路附近发生不对称故障时,可在线测量线路零序参数,相对于传统方法而言,具有设备简单、易于操作、不影响正常供电等优点。

状态估计的主要功能是从含有误差的遥测数据中获取系统当前状态的最佳估计,为 EMS 提供电网实时状态。如何在传统的状态估计中有效利用 PMU 量测以提高状态估计的性能已经成为了当前的一个重要研究方向。目前在状态估计中应用 PMU 量测的模型有 3 类:线性估计模型、非线性估计模型以及线性与非线性相结合的混合模型^[39,40]。其中文献[40]针对非线性估计模型中,很难直接利用 PMU 支路电流量测的问题,提出了通过量测变换来计及 PMU 支路电流幅值和相角量测的模型,有效地在状态估计中利用了 PMU 量测,有利于状态估计精度的提高。

同步相量测量单元(PMU)能够提供电力系统节点电压相量的直接测量值,从而改变了潮流计算的条件。文献[41]提出了潮流方程直接可解的概念和能使潮流方程直接可解的电压型 PMU 配置算法。文献[42]从节点电压初值选择、多平衡节点潮流计算、潮流方程直接可解等三个方面初步分析了应用 PMU 后电力系统的潮流计算问题,结果表明应用 PMU 量测数据可以在不同程度上使潮流计算得到改善。

4 基于 PMU 同步数据的二次保护应用功能

现代电力系统日趋复杂,对二次保护的要求也越来越高,主要表现在以下几点:1)需要动态的测量和描述事件;2)必须在保护设计中引入广域系统的观点;3)需要对保护动作进行协调和优化;4)要有处理连锁故障的能力。而传统的保护装置显然无法适应这些要求。因此,必须引入以同步动态量测数据为基础的广域保护系统来适应这些要求。

直接利用广域信息完成继电保护功能是当前该领域的研究方向之一^[43-45]。例如文献[43]给出了基于 PMU 量测的广域保护系统方案的总体设计,与常规保护方案相比,其优点是能给出系统的动态描述,便于提高保护性能。文献[44]基于 PMU 装置

提出了对于换位/不换位平行输电线路的自适应保护方案。所提出故障诊断及定位指标具有很好的精度和可靠性。文献[45]则在PMU量测的基础之上提出了距离保护的自适应整定方案,可以实现参数的在线整定,克服了传统保护参数离线整定的诸多缺点,确保了保护装置对系统的各种运行方式都有很好的灵敏性。

5 结论

PMU装置及在此基础之上的广域动态监控系统技术的成熟及其在电力系统中的推广应用,具有重要的意义。本文综述了基于PMU量测数据的电力系统动态、稳态和二次保护方面的应用功能研究情况。得出如下三点结论:

1) PMU装置提供的新的量测数据,为电力系统中诸如状态估计、潮流计算、继电保护等许多传统功能的改进和完善提供了全新的数据源,将会有力地促进这些领域的发展。

2) PMU装置及其基础之上的广域测量系统所具备的对电力系统的全局和动态特性的监控功能,将成为解决电力系统动态领域中一些热点问题(例如互联电网稳定控制等)和一些难点问题(例如电压、功角的在线稳定预测及控制等)的有效途径。

3) PMU装置及其基础之上的广域测量系统为电力系统各领域中的新应用功能的研究提供了技术上的新思路和新手段,随着其应用理论体系的成熟完善以及在电力系统中的推广应用,将会把现有电力系统分析与监控技术全面提升到一个新的水平。

参考文献:

- [1] Taylor C W, Erickson D C. Recording and Analyzing the July 2 Cascading Outage [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(1): 26-30.
- [2] 罗建裕,王小英,鲁庭瑞,等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78-80.
LUO Jian-yu, WANG Xiao-ying, LU Ting-rui, et al. The Application of Grid Real-time Dynamic Monitoring System Based on Wide Area Measurement Technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 78-80.
- [3] 黄永皓,何南强,代飞,等. 新型功角与相量广域测量系统及其在河南电网中的全面实施[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 97-100.
HUANG Yong-hao, HE Nan-qiang, DAI Fei, et al. A Wide Area Angle & Phase Measurement System Implemented in Henan Power System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 97-100.
- [4] Yi K K, Choo J B, Yoon S H, et al. Development of Wide Area Measurement and Dynamic Security Assessment Systems in Korea [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001. 1495-1499.
- [5] Bertsch J, Zima M, Suranyi A, et al. Experiences with and Perspectives of the System for Wide Area Monitoring of Power Systems [A]. 2003 CIGRE/IEEE PES International Symposium. 2003. 5-9.
- [6] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements a Historical Overview [A]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia Pacific: 2002. 476-479.
- [7] 许树楷,谢小荣,辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present Application Situation and Development Tendency of Synchronous Phasor Measurement Technology Based Wide Area Measurement System [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49.
- [8] 付强,王少荣,程时杰. 基于PMU同步数据的电力系统暂态稳定分析方法综述[J]. 继电器, 2003, 31(1): 76-79, 83.
FU Qiang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Summary on the Methods of Power System Transient Stability Analysis Based on the Synchronously Sampled Data of PMU [J]. Relay, 2003, 31(1): 76-79, 83.
- [9] Cai J Y, HUANG Zhen-yu, Hauer J, et al. Current Status and Experience of WANS Implementation in North America [A]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition Asia Pacific: 2005.
- [10] 韩英铎. 区域电力系统安全防御系统新构想 [A]. 华北地区学术年会论文集. 2004. 1-35.
HAN Ying-duo. New Conceptions on Security Defense System for inter-area Power System [A]. North China Academic Annual Meeting 2004. 1-35.
- [11] Korba P, Larsson M, Rehtanz C. Detection of Oscillations in Power Systems Using Kalman Filtering Techniques [A]. Proceedings of IEEE Conference on Control Applications 2003. 183-188.
- [12] XIAO Jin-yu, XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo, et al. Dynamic Tracking of Low-frequency Oscillations with Improved Prony Method in Wide-area Measurement System [A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2004. 1104-1109.
- [13] Kamwa I, Gerin-Lajoie L, Trudel G. Multi-loop Power System Stabilizers Using Wide-area Synchronous Phasor Measurements [A]. Proceedings of the American Control Conference Philadelphia (Pennsylvania): 1998. 2963-2967.
- [14] Kamwa I. Using MIMO System Identification for Modal Analysis and Global Stabilization of Large Power Systems [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000. 817-822.
- [15] Kamwa I, Grondin R, Hebert Y. Wide-area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems—a Decentralized/Hierarchical Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 136-153.
- [16] Chaudhuri B, Majumder R, Pal B C. Wide-area Measurement-based Stabilizing Control of Power System Considering Signal

- Transmission Delay[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1971-1979.
- [17] XIE Xiao-rong, LI Jian, XIAO Jin-yu, et al Inter-area Damping Control of STATCOM Using Wide-area Measurements[A]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies Hong Kong: 2004. 222-227.
- [18] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 7-12
HUANG Ying, XU Zheng HVDC Supplementary Controller Based on Synchronized Phasor Measurements Units[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 7-12.
- [19] Bretas N G, Phadke A G Real Time Instability Prediction Through Adaptive Time Series Coefficients[A]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE 1999. 731-736.
- [20] 郭强, 刘晓鹏, 吕世荣, 等. GPS同步时钟用于电力系统暂态稳定控制的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3): 23-28
GUO Qiang, LU Xiao-peng, L ū Shi-rong, et al Application of GPS Synchronized Clock to Power System Transient Stability Control[J]. Proceedings of the EPSA, 1996, 8(3): 23-28.
- [21] 郭强, 刘晓鹏, 吕世荣, 等. GPS同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(6): 11-13.
GUO Qiang, LU Xiao-peng, L ū Shi-rong, et al Application of GPS Synchronized Clock to Power System Transient Stability Predict and Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 11-13.
- [22] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 基于 PMU的电力系统暂态稳定实时快速预测的研究[J]. 继电器, 2000, 28(1): 3-5, 9.
L ū Zhi-lai, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu Real-time Transient Stability Prediction for Multi-machine Power System Based on Phasor Measurement Units[J]. Relay, 2000, 28(1): 3-5, 9.
- [23] 刘玉田, 林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 19-23.
LIU Yu-tian, L IN Fei Application of PMU and Fuzzy Radial Basis Function Network to Power System Transient Stability Prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 19-23.
- [24] 林飞, 张文, 刘玉田. 基于同步相量测量技术的暂态稳定性实时预测[J]. 继电器, 2000, 28(11): 33-35.
L IN Fei, ZHANG Wen, LIU Yu-tian PMU Based Transient Stability Prediction in Power System[J]. Relay, 2000, 28(11): 33-35.
- [25] LI Yi-qun, TENG Lin, LU Wan-shun, et al The Study on Real-time Transient Stability Emergency Control in Power System[A]. Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering Canada: 2002. 138-143.
- [26] 腾林, 刘万顺, 负志皓, 等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
TENG Lin, LU Wan-shun, YUN Zhi-hao, et al Study of Real-time Power System Transient Stability Emergency Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
- [27] 彭疆南, 孙元章, 王海风. 基于广域量测数据和导纳参数在线辨识的受扰轨迹预测[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 6-11.
PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng Research on the Perturbed Trajectories Prediction Based on Wide-area Measurement and On-line Admittance Matrix Identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 6-11.
- [28] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10-14.
XIE Xiao-rong, LI Hong-jun, WU Jing-tao, et al Feasibility Study on Using Synchrophasor Technology for Power System Transient Stability Control[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 10-14.
- [29] Ota Y, Ukai H, Nakamura K, et al Evaluation of Stability and Electric Power Quality in Power System by Using Phasor Measurements[A]. Proceedings of International Conference on Power System Technology. 2000. 1335-1340.
- [30] Ota Y, Ukai H, Nakamura K, et al PMU Based Midterm Stability Evaluation of Wide-area Power System[A]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia Pacific: 2002. 1676-1680.
- [31] Nuqui R F, Phadke A G, Schulz R P, et al Fast On-line Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements and Decision trees[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2001. 1347-1352.
- [32] Larsson M, Rehtanz C, Bertsch C. Monitoring and Operation of Transmission Corridors[A]. IEEE Bologna PowerTech Conference Proceedings Bologna (Italy): 2003.
- [33] Borka Mibosevic, Miroslav Begovic Voltage-stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [34] 宗洪良, 孙光辉, 刘志, 等. 大型电力系统失步解列装置的协调方案[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 72-75.
ZONG Hong-liang, SUN Guang-hui, LIU Zhi, et al Coordination of Out-of-step Prediction Equipment in Large Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 72-75.
- [35] 周良松, 夏成军, 彭波, 等. 基于 PMU的预测型振荡解列初步研究[J]. 继电器, 2001, 29(3): 9-13.
ZHOU Liang-song, XIA Cheng-jun, PENG Bo, et al Study on Predictive System Separation Controls Based on PMU[J]. Relay, 2001, 29(3): 9-13.
- [36] WANG Ying-tao, YN Yong-hua, HOU Jun-xian Coordinated Out-of-step Protection System Based on WANS[A]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition Dalian (China): 2005.
- [37] Ishibashi A, Imai M, Omata K, et al New Type of Islanding Detection System for Distributed Generation Based on Voltage Angle Difference Between Utility Network and Distributed Generation Site [A]. Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004. 542-545.
- [38] 范琦, 穆钢, 王克英. 基于同步相量测量的线路参数在线测量的试验研究[J]. 东北电力学院学报, 2002, 22(4): 1-5.
FAN Qi, MU Gang, WANG Ke-ying Studies on Lines Parameters Measurement Based on Synchronized Phasor Measurement [J].

- Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(4): 1-5.
- [39] XU Dong-jie, HE Ren-mu, WANG Peng, et al Comparison of Several PMU Placement Algorithms for State Estimation[A]. 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004. 32-35.
- [40] 赵红嘎, 薛禹胜, 汪德星, 等. 计及 PMU 支路电流相量的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 37-40.
ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng, WANG De-xing, et al State Estimation Modal with PMU Current Phasor Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 37-40.
- [41] 王克英, 穆钢, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-16.
WANG Ke-ying, MU Gang, HAN Xue-shan, et al Placement of Phasor Measurement Unit for Direct Solution of Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 14-16.
- [42] 王克英, 穆钢, 陈学允. 同步相量测量技术在潮流计算中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 1-3.
WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun The Application of Phasor Measurement Units in Power Flow[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(4): 1-3.
- [43] Rehtanz C, Bertsch J. Wide Area Measurement and Protection System for Emergency Voltage Stability Control[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002. 842-847.
- [44] CHEN Ching-shan, LIU Chih-wen, JIANG Joe-air A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/untransposed Parallel Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 395-404.
- [45] FAN Chun-ju, LI Sheng-fang, YU Wei-yong, et al Study on Adaptive Relay Protection Scheme Based on Phase Measurement Unit(PMU) [A]. Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004. 36-39.

收稿日期: 2005-08-09; 修回日期: 2005-09-06

作者简介:

丁剑(1977-),男,博士研究生,研究方向为电力系统故障诊断、人工智能、电网动态安全; E-mail: djnailsky@yahoo.com.cn

白晓民(1951-),男,博士生导师,副总工程师,研究方向为电力系统分析、电网动态安全;

王文平(1973-),男,博士,研究方向为 EMS/DMS 及人工智能警报系统。

Overview of application researches based on synchronous data measured by PMUs in power system

DING Jian, BAI Xiaomin, WANG Wenping, ZHAO Wei, FANG Zhu

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The technology of synchronized phasor measurement makes it possible that monitoring and controlling dynamic characteristics of grids synchronously, which will greatly facilitate the research advancements of related applications in power systems. The development and the applications of synchronized phasor measurement technology and wide-area measurement system (WAMS) are briefly described. The focus of the paper is the detailed advancements of the various application researches based on the measurement of the synchronized phasor measurement units (PMUs) in system dynamics field where damping control, transient stability analysis and control, voltage stability and separation control are included, system steady state field where parameter measurement of lines, state estimation and power flow calculation are included and relay protection field. The features, advantages and defects of these application researches are also presented respectively.

This project is supported by the National Basic Research Program (973 Program) (No. 2004CB217904).

Key words: phasor measurement unit (PMU); synchrophasor measurement technology; wide-area measurements system (WAMS); system dynamics; system steady state; relay protection

(上接第 77 页 continued from page 77)

- [8] Ward S, Dahlin T, Ince B. Pilot Protection Communication Channel Requirements[A]. 57th Annual Conference on Protective Relay Engineer, 2004.

作者简介:

王树春(1977-),男,工程师,从事继电保护检修管理工作; E-mail: wscy2k@sina.com.cn

赵志江(1963-),男,助理工程师,从事变电站设备检修管理工作。

收稿日期: 2005-07-12

Analysis of a rare case of PLC channel failure

WANG Shu-chun, ZHAO Zhi-jiang

(Jiaxing Electric Power Bureau, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Dual redundant pilot protection configuration for 220 kV line has become a standard configuration in some power systems. PLC channel aided pilot protection is the most popular one. PLC channel is vital in such scheme. In or out of service state of the channel decides that of the relay. This paper analyses a rare case of PLC channel failure and presents an alteration from HF channel to optic fiber channel for pilot protection.

Key words: relay protection; HF channel; diffidence attenuation