

基于 PMU 同步数据的电力系统暂态稳定分析方法综述

付强,王少荣,程时杰

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 同步相位测量单元利用全球定位系统(GPS)提供的精确时间基准对电力系统的状态进行数据采集。传统的暂态稳定分析方法主要是基于各节点的异步采样数据来判断稳定。PMU的同步采样数据为电力系统的暂态稳定分析和控制提供了一条新的途径,也为传统的电力系统暂态稳定分析方法提出了改进的条件。本文首先简要介绍了相量测量单元应用现状,然后综述了PMU出现后在电力系统暂态稳定分析方面出现的新方法和取得的新进展。

关键词: 相量测量单元; 暂态稳定分析; GPS

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0076-04

1 引言

暂态稳定分析是暂态稳定控制的基础。暂态稳定控制的主要作用是在故障发生后,快速准确地测量出系统的暂态能量,采取正确的控制措施,使系统的暂态扰动能量能够被系统自身平息,保持系统稳定性。因此,寻求快速、准确的暂态稳定分析方法具有重要的意义。在暂态稳定分析中,准确性和计算速度的不可兼顾一直是困扰各种分析方法在线使用的主要问题。这是由于:一方面,以往暂态稳定分析中使用的数据是对异步采样的数据经过状态估计得到的,这使暂态分析结果的准确性受到很大影响。另一方面,为了达到在线分析控制的目的,需要选择合适的计算模型。过于复杂的模型在实时条件下很难应用,而简单模型得到的稳定判据往往准确性差。

近年来,电力系统出现了一种新型的监测设备——相位测量单元(PMU)。相位测量单元利用GPS系统的高精度授时信号,实现对电力系统的各个节点数据的同步采集,为电力系统的分析和控制提供了崭新的研究空间。PMU的出现对电力系统暂态稳定分析方法产生了两个方面的影响:(1)出现了一些针对原有模型和方法的改进和简化措施,这些措施使原有方法在速度或者准确性上得到了提高。(2)给暂态稳定分析方法带来了新思路,主要表现在对功角运行轨迹的预测和估计方法上。

由于精度和速度上的提高,这些影响给暂态稳定在线分析的实用化带来了新进展。本文主要针对前述两点影响,综述了PMU的产生对电力系统暂态稳定分析方法带来的新进展。

2 相量测量单元(PMU)应用现状

PMU基本功能是利用GPS信号对电压电流同步测量,并进行分析,提供频率、相位和幅值信息,对电力系统全网状态进行同步监测。美国在90年代初期已有PMU装置投入使用,试验表明PMU具有监测系统暂态过程的能力^[1-2]。IEEE于1995年制定了PMU的标准^[3]。台湾在90年代中后期也开展了PMU的研制工作^[4-5],目前已经商业应用。在我国大陆,PMU在黑龙江^[6-7]和湖南^[8]等省已有装置投入,其他省市也在计划安装PMU装置。与此同时,PMU的功能也在扩展,比如通过发电机转子直接测量功角等^[9]。可以说在PMU本身的发展和完善上,科研人员已经完成了大量的工作。但是如何利用相量测量单元的同步数据却还有待深入研究。许多研究人员目前正在开展这方面的工作,并取得了一些成果。

3 PMU对传统暂态稳定分析方法的改进

传统的暂态稳定分析方法大致分为三类:直接法、数值积分法和模式识别法。直接法是基于Lyapunov或Popov稳定定理的能量函数法。它将扰动后的系统看作初态下的自治系统来研究其稳定性,通过计算扰动发生时刻的能量函数以及稳定边界来判定系统暂态稳定情况。其优点是暂态稳定判别速度比较快,所存在的问题是能量函数构造困难。数值积分法通过求解电力系统机电微分方程组和网络代数方程组,计算发电机功角的变化趋势,判断系统的稳定性,它的主要问题在于计算时间长。模式识别的方法不需建立系统的数学模型,直接从样本中

寻求状态参数与稳定性或稳定指标间的映射关系。这种方法的速度很快,但是如果设计不当,可靠性将大打折扣。

PMU 为暂态稳定分析提供了一个新的条件:在分析中可以使用多个节点的同步数据,且这些数据均是实时测得的,具有较高的可信度和精度。科研人员以此为背景,开阔思路,研究提供暂态稳定分析更好的解决方案。

3.1 PMU 在直接法中的应用

在直接法中,基于等面积法则的暂态稳定分析方法是目前广泛使用的方法之一。这种方法原理简单,计算速度快,在现有的硬件水平上完全可能达到实时应用的要求。美国 Florida-Georgia 联络线的暂态稳定控制^[10]是该方法目前实际应用的一个例子。

等面积法则方法虽然计算快,但是在实际应用中也存在着一些问题和局限。首先,该方法的模型本身源于单机-无穷大母线系统,对于两机系统仍然可以推广应用,但对于由三机以上构成环网结构的电力传输网络难以应用。其次,系统的运行情况复杂多变,负荷升降、发电机调速器控制等等随时影响系统动态过程,等面积法则中的等效机械功率 P_m 需要考虑功率输出侧发电机出力 and 该侧实际负荷波动情况,具有一定的不确定性。另外,线路的参数会受到环境条件和系统运行状态的影响而变化,存在着不确定性因素,加上电机励磁控制等的作用,使得系统功角运行曲线的参数不易确定,功角运行曲线的形式非理想化。PMU 能够提供传输线两侧电压相角的同步采样值,为等面积法则应用创造了有利条件。

美国 Florida-Georgia 联络线系统是一个可以等效为两机系统的电力网络。在实际使用中,其使用了等面积法则来分析系统暂态稳定情况。其利用 PMU 同步数据,提出了解决等效机械功率 P_m 的不确定性等方法。文献^[10]利用线路两端功角差的变化与机械功率 P_m 的关系,给出了根据功角差的历史数据推算当前功率 P_m 的公式。功角差的历史数据由 PMU 测量得到。该文献给出了经过简化和改进的功角运动方程。利用该方程以及估计得到的 P_m 计算功角差的变化趋势,判断系统稳定性。

PMU 的出现为控制系统同时掌握多台发电机的功角创造了条件。文献^[11]提出了一种基于部分能量函数法的原理进行局部切机控制以保证系统暂态稳定性的方法,它通过离线计算,求出受控机组相

对于系统惯性中心的临界转速,然后利用 PMU 测量的同步功角数据在线计算各发电机的转速,一旦发现受控机组的相对转速超过临界值,则进行切机控制。功角和电机转速是系统暂态能量的基本组成,该文献表明使用转速作为暂态稳定的判据是可行的。

传统的多机系统暂态能量函数法的研究还提出了许多方法,但是这些方法往往需以某种假设为基础,理论上不十分严格^[12]。同时,由于多机系统的动态过程极其复杂性,加上还可能存在着混沌等复杂现象^[13],使得直接法在多机系统暂态稳定实时应用上仍然有一定的困难。EEAC 法是迄今唯一得到严格证明的直接法^[14]。和其他直接法相比,EEAC 法突出优点是速度快,但是该方法有赖于正确识别临界机组群^[15]。文献^[16]认识到临界机组群在故障发生后的暂态过程中具有相同的功角变化趋势,利用 PMU 对功角同步采样数据,再加上对发电机功角相对变化的趋势的分析,可将功角变化趋势相近的发电机合并成一台等效发电机组群,以此识别故障时的临界机组群。

直接法具有快速的特点,对于系统的全局暂态稳定控制来说,直接法仍是最有发展前景的。利用 PMU 的同步数据将有利于提高直接法的准确性和计算速度。如何在直接法中进一步利用 PMU 采样信息还待研究。

3.2 PMU 在数值积分法中的应用

数值积分法利用系统网络方程和发电机机电方程计算功角的变化趋势,预测功角在未来一段时间内是否会超出范围,从而判断系统的稳定性。传统的暂态稳定分析数值方法对于功角变化的计算已经有了相当深入的研究,这类方法的精度高,不仅可以判断首摆失稳,还可以判断多摆失稳,但是这些方法计算量大,只适合离线计算分析使用。在线分析时需要对这些方法做局部简化或者改进,以达到实时分析的目的。PMU 也为传统的数值积分法的改进提供了可能。文献^[17]提出分段固定负荷电流法 (PCCLE)。它从传统的暂态分析数值方法出发,使用分段的方法来解决数值计算模型中变量太多的难题,在一定的时间段内固定负荷电流的变化,适应计算速度的需要。该方法使用 PMU 测量的数据对模型计算的结果进行判别,当误差超过某一数值时,重新计算负荷电流,这样可以节约时间,加快稳定判断速度。

3.3 PMU 在模式识别方法中的应用

模式识别法通过对各类典型运行方式下系统的特征值进行分析,依据各种故障类型下特征量的分布,离线制定系统暂态稳定分类判据,得到系统暂态稳定性的判定方法。

PMU 的同步采样数据具有较高的精度,可以利用系统发电机同步功角和节点电压相位信息来作为特征量,制定决策表。文献[18]利用各种系统运行状态下功角轨迹数据离线制定决策树,同时利用 PMU 在线测量功角数据,经过简单计算,然后查表判断暂态稳定性。决策树方法的实质思想为多级分类、分级查询,其目的是提高查询判断速度。在实际应用中,由于事先已经考虑了系统中多种可能发生的情况,这使得所得到的判据具体化,判定过程无需微积分运算,因而分析速度非常快,但是对于非预料事故无法处理,同时它还需要搜集系统各种运行情况下的数据和大量的离线计算。

在使用模糊技术和神经网络的方法来判断系统暂态稳定方面,PMU 的同步采样数据也得到了广泛应用。文献[19]利用 PMU 在故障切除后 8 个周波内的测量数据作为输入。文中提供了对新英格兰 10 机系统的测试结果,对于训练样本的识别正确率为 99%,对于未训练的测试样本识别正确率为 94%。文献[20]提出使用神经网络决策树(neuronal tree network)来代替常规的决策树,其分类指标为 PMU 提供的系统各发电机的功角、各个节点电压相角的同步数据和系统各发电机的机械功率。文献[21]提出了一种基于模糊聚类的径向基神经网络暂态稳定控制方法,其所利用的数据源为 PMU 提供的故障后各发电机的同步功角信息,将功角经过简单运算,作为神经网络的输入,网络的输出是系统的稳定性分类。数值仿真结果表明,网络训练时间短,分类精度高。但是不得不承认由于神经网络的训练需要大量的实际运行数据作为样本。样本的选取要考虑到各种运行情况,这是一个不易达到的要求。

4 基于 PMU 的暂态稳定分析的新方法

PMU 的出现为电力系统的暂态稳定预测开辟了新方法。我们知道,发电机间功角差的变化在系统稳定允许范围之内,则系统处于稳定。利用预测模型对电机功角摆动进行预测,也可以用于判断系统稳定。

文献[22]根据单机—无穷大系统转子运动方程,在实际应用中利用最新的 N 次采样数据和最小

二乘法估计该方程中的系数,然后用该方程来计算功角的运行轨迹,判断系统的稳定性。该方法不涉及网络的参数,也不需要顾及线路参数随环境条件变化的影响,仅仅需要功角的测量值。该方法使用的前提条件是线路参数的变化和机械功率的变化在 N 个采样间隔内可以认为是不变的,同时为了能对 进行有效跟踪,还要假定线路参数和机械功率的变化足够缓慢。对于 PMU 的高速采样频率而言,这点是可以满足的。

文献[23~24]的方法和[22]有异曲同工之处。文献[23]的方法是利用线性多项式来估计功角的变化。根据 PMU 的历史数据,利用最小二乘法来估计多项式的系数,再用估计得到的多项式进行功角预测,同时在适当的时候对预测公式进行修正。文献[24]则采用自回归(AR)模型来预测功角,同时利用功角的变化分析稳定性。从另一个角度来看,按照功角变化所实施的暂态稳定控制,其实是预测控制的一种形式,因而,模糊集理论和神经网络技术这两项预测控制的新技术也被引入到功角预测中来。文献[25]将通过 PMU 获取的不同时刻系统最大摇摆角作为模糊神经网络的输入,而把故障切除后系统第一摆时段内的最大摇摆角作为模糊神经网络的输出,以此判断系统首摆暂态稳定性。

这类方法的一个共同点是未考虑电力系统的完整数学模型,而是通过构建预测模型,估计功角变化以达到判断系统稳定性的目的,应该说这是 PMU 在功角预测上带来的新思路。

5 结论

PMU 的出现为暂态稳定分析方法增添了新的活力,使得原有方法在速度和精度上得到了提高,同时也为暂态稳定分析方法带来了一些新的思路。基于 PMU 的电力系统暂态稳定控制的研究,是近年来暂态稳定研究的热点方向。尽管 PMU 已有不少投入使用的报道,但基于 PMU 的在线暂态稳定控制实施,目前在国内还未见文献报道。可以相信,随着研究的深入,PMU 的广泛应用必然会将电力系统暂态稳定控制推向一个新的水平。

参考文献:

- [1] Burnett R O, Jr Butts M M, Cease T W, Centeno V, Michel G, Murphy R J, Phadke A G. Synchronized phasor measurements of a power system event[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.

- [2] Robert O Burnett, Jr Marc M Butts and Patrick S SteLina. Power system applications for phasor measurement units[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1994, (1) : 8-13.
- [3] Martin K E, Benmouyal G Adamiak M G, et al. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(1) :73 - 77.
- [4] Jiang Joe-Air, Lin Ying-Hong, Yang Jurr-Zhe, Tong-Ming Too and Liu Chir-Wen. An adaptive PMU based fault detection/ location technique for transmission lines, II PMU implementation and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4) : 1136-1146.
- [5] Jiang Joe-Air, Yang Jurr-Zhe, Lin Ying-Hong, Liu Chir-Wen and Ma Jih-Chen. An adaptive PMU based fault detection/ location technique for transmission lines, I: Theory and algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2) : 486-493.
- [6] 闵勇,丁人杰,任勇,等. 电力系统全网同步监测系统[J]. 清华大学学报, 1997, 36(7) :86 - 88.
- [7] Wu Jingtao, Kong Wong Chi and Han Yingduo. Dynamic monitoring and control system based on synchronized phasor measurement in Heilongjian Eastern Power System[J]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting, Singapore :2000:23 - 27.
- [8] 谭振宇,王少荣,苗世洪,等. 基于 GPS 的电网状态监测系统. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十四届学术年会论文集[C], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998:579 - 583.
- [9] 王少荣,孙海顺,苗世洪,等. 同步发电机功角高精度测量方法及其实现[J]. 中国机械工程, 1999, 10(6) :667-670.
- [10] Centeno V, Phadke A G, and Edris A. Adaptive Out-of-step Relay With Phasor Measurement Developments in Power System Protection[C]. Sixth International Conference on Conf, Publ No. 434.
- [11] Staton S E. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, :297-306.
- [12] 夏道止. 电力系统分析(下)[M]. 水利电力出版社, 1995.
- [13] Chir-wen Liu James s. Thorp and Jin Lu. Detection of transiently chaotic swings in power systems using realtime phasor measurements[J]. IEEE Transaction on Power Systems, August 1994, 9(3).
- [14] 薛禹胜. 电力系统暂态稳定快速分析和控制的现状和发展[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(1) :6-13.
- [15] 刘笙. 电力系统暂态稳定分析的能量函数方法[J]. 电网技术, 1995, 19(2) :11-18.
- [16] Ota Y, Ukai H, Nakamura K and Fujita H. Evaluation of stability and electric power quality in power system by using phasor measurements[C]. International conference on Power System Technology. Proceedings of PowerCon 2000, Vol 3:1335-1340.
- [17] Liu C W, Thorp J. Application of synchronised phasor measurements to real-time transient stability prediction[J]. IEE Proc- Gener Transm Distrib, July 1995, 142(4).
- [18] Steven Rovnyak, Stein Kretsinger, James Thorp and Donald Brown. Decision trees for real-time transient stability prediction[J]. IEEE Transaction on Power System, August 1994, 9(3) :1417-1426.
- [19] Liu Chir-Wen, Su Mu-Chun, Tsay Shuenr-shing, Wang Yi-Jen. Application of a novel fuzzy neural network to real time transient stability swings prediction based on synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2) :665-692.
- [20] Rorbert T. F., King AH and Harry C. S. Rughooputh. Real time transient stability prediction using neural tree networks [Z]. Systems, Man and Cybernetics, 1995 Intelligent Systems For The 21st Century, IEEE vol. 3, :2182-2187.
- [21] 刘玉田,林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基神经网络的暂态稳定性预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2) :19-23.
- [22] Wang Yr-jen, Liu Chir-Wen and Sue Leir-Dar. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurement units[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 7.
- [23] 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.
- [24] 李国庆. 电力系统暂态稳定预测控制的研究[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(3) :25-32.
- [25] 苏建军,廖培金,周佃民. 基于 GPS 同步量测量的模糊神经网络用于暂态稳定预测研究[J]. 继电器, 2001, 29(2) :13-15.

收稿日期: 2002-01-10

作者简介:

付强(1977-),男,硕士,研究方向为电力系统暂态稳定分析;

王少荣(1960-),男,博士,研究方向为电力系统控制;

程时杰(1945-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析与控制、人工智能应用及电力通信。

(下转第 83 页)

的求解过程即是根据文章开始所描述的模型及算法进行的。由仿真曲线来看,其模型和算法均具有一定的精确度。实际上,正是因为 EMTDC 异步电机模型考虑了转速的变化,所以能够用来仿真电机的起动过程。同时,电机内部故障时起动过程中包含了丰富的故障特征,通过这些故障特征即可判断出电机是否发生了故障。

6 结论

通过对 EMTDC 仿真软件中三相异步电动机模型,尤其是机械部分模型以及算法的介绍说明该仿真软件可以用来仿真计及电机转速变化的暂态过程,然后对异步电动机正常情况、匝间短路及断条故障下的起动转速—转矩关系进行了仿真计算并给出了仿真曲线,分析表明 EMTDC 的异步电机模型及算法在处理考虑转速变化问题时均具有一定的精确度。同时,电机内部故障时,起动转速—转矩曲线中包含了丰富的故障特征,根据这些故障特征即可做出电机是否发生故障的判断。因此,EMTDC 为内部故障诊断提供了一个仿真环境。

参考文献:

- [1] 宋萍,张小兵.三相异步电动机机械特性的直观表达式[J].淮南矿业学院学报,1998,18(2):58~60.
- [2] 吴凯,等.小型异步电动机转矩转速曲线自动测试系统[J].微电机,1997,30(2):38~42.
- [3] Penman J,Stavrou A. The effects of broken rotor bars on the transient run up of induction machines [A]. Electrical Machines and Drives[C]. 1995,Seventh International Conference on, 1995:47~51.
- [4] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M].北京:水利电力出版社,1991.
- [5] 岳国良,等.异步电机鼠笼转子断条的频谱分析及诊断[J].河北电力技术,1999,18(5):19~22.

收稿日期:2002-06-25; 修回日期:2002-07-24

作者简介:

高爱云(1977-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

蔡泽祥(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护,电力系统稳定分析与控制。

The mechanical model and its simulation of the induction motors in EMTDC

GAO Ai-yun, CAI Ze-xiang

(Electrical Engineering Department of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper introduces the three-phase induction motor model of EMTDC in details, especially the mechanical model. It provides the interface between the mechanical part and the electrical part and the transient resolution process. Based on EMTDC it simulates the start up speed-torque relations of healthy motor and motors with stator turn-to-turn shorts and broken bars, as a result, it produces the simulation curves. The analysis proves that EMTDC can provide a simulation environment for internal faults diagnosis.

Key words: EMTDC; mechanical model of the induction motors; speed-torque relation; internal faults diagnosis

(上接第 79 页)

Summary on the methods of power system transient stability analysis based on the synchronously sampled data of PMU

FU Qiang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The phasor measurement units based on the precise clock of GPS can measure the parameters of the power system synchronously. The conventional methods of transient system analysis are always based on the asynchronous measured data. The synchronously sampled data provided by PMU exploit a new research area of the system transient stability analysis and control. This paper introduces the activity of PMU application, and then summing up the new approaches and progress in power system transient stability analysis with PMU.

Key words: phasor measurement unit; transient stability analysis; GPS