

DOI: 10.7667/PSPC152200

基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述

赵晋泉¹, 邓晖¹, 吴小辰², 徐光虎², 金小明², 张勇²

(1. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 中国南方电网公司, 广东 广州 510623)

摘要: 电力系统暂态稳定控制是维持电网安全稳定运行的核心问题之一。随着 PMU/WAMS 的广泛应用, 基于广域响应的暂态稳定控制技术已成为重要发展方向。从受扰轨迹快速预测、暂态失稳实时判别、暂态稳定紧急控制三个方面, 以理论和应用相结合的观点, 对广域量测在电力系统暂态稳定控制研究中的应用进行了评述。最后, 进一步探讨了现有控制技术所亟待解决的问题。

关键词: 相量测量单元; 广域量测系统; 受扰轨迹预测; 暂态失稳判别; 暂态稳定控制

Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS

ZHAO Jinquan¹, DENG Hui¹, WU Xiaochen², XU Guanghu², JIN Xiaoming², ZHANG Yong²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: Transient stability control technology is one of the core problems of power system for maintaining security and preventing blackouts. With the development of wide-area measurement system (WAMS) based on phasor measuring units (PMU), the response-based transient stability control technology has become an important development direction. From a viewpoint of combining both theory and application, researches of wide-area protection are reviewed on three important subproblems. They are perturbed trajectory prediction, transient instability detection and transient emergency control. Moreover, potential deficiencies and solutions are also discussed based on the analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577049) and Open Foundation of State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (Grant No. LAPS14005).

Key words: WAMS; PMU; perturbed trajectory prediction; transient instability detection; transient emergency control

0 引言

维持电力系统的安全运行一直以来是保障社会安定和经济发展的重要因素之一。为保障电网稳定运行, 我国大型互联电网通常配置了特定的继电保护及安全稳定控制系统, 构成了电网安全稳定运行的三道防线^[1]。其中, 常规二道防线具有针对性强、速度快、可靠性高等特点, 但若实际扰动超出了它所涵盖的事件范围, 则无法做出有效应对。此外, 二道防线的失稳判据和控制策略都是基于离线仿真计算得到, 其可靠性严重依赖于仿真模型和参数的准确性。因此, 我国现有的暂态稳定控制技术在适应性、控制效率、可靠性等方面仍存在诸多不足^[2-3]。

随着相量测量单元(PMU)的不断发展和完善^[4], 广域量测系统(WAMS)已可同步监测能量管理系统(EMS)观测量以外的功角、相角、发电机电势等派生量, 可作为描述系统机电动态行为的重要途径^[5]。至今, 我国电网公司已在单机容量 300 MW 及以上的电厂、总装机容量 500 MW 及以上的电厂, 直流换流站、500 kV 变电站配置大量 PMU 装置。当前 PMU 的基本配置已能够满足电网稳定监视、分析、预警和决策的需求^[6]。

PMU/WAMS 具有广域高精度同步测量、高速信息通信和快速反馈处理等技术特点, 现已在美国、法国等国家的电网协调防御系统中发挥重要作用^[7-9]。我国在该领域所挖掘的功能主要面向数据监测方面, 包含: 全网电压和功角监视、线路温度监测、故障录波等。而在基于广域响应的电力系统稳定控制技术方面鲜有涉及, 是值得深入研究和拓展

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577049); 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS14005)

的重要方向^[10]。

基于上述原因,本文针对基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术,将现有研究成果划分为受扰轨迹快速预测、暂态失稳实时判别、暂态稳定紧急控制三个子问题。从理论和应用相结合的观点,对上述子问题的研究方法进行评述。在此基础上,进一步指出现有研究所存在的问题及可能的解决途径。

1 基于广域响应的受扰轨迹快速预测

发电机功角等系统特征受扰轨迹的快速预测是辨识暂态稳定性的重要途径之一。通过研究系统特征量测的历史数据,建立特定的数学模型,可计算未来时刻的受扰轨迹,并为失稳判别提供依据。根据预测算法所建立的数学模型类型不同,可分为基于网络降阶化简的超实时数值仿真和基于曲线拟合的受扰轨迹外推方法两大类。

1.1 基于网络降阶化简的超实时数值仿真

基于网络降阶化简的超实时数值仿真技术主要基于电力系统经典模型。通过 PMU/WAMS 获取广域受扰量测,估计系统模型参数并计算该模型方程,利用数值仿真技术得到系统未来受扰轨迹。

J. Thorp 等人率先开展了基于网络降阶化简的功角轨迹超实时仿真方法研究:对观测窗内的实测轨迹进行同调聚合,得到全网简化模型,利用实时量测值作为该动态方程初值,通过高速计算机和并行计算技术进行受扰轨迹的超实时计算,从而预测系统未来轨迹^[11-12]。在此基础上,文献[13]提出了导纳参数整体在线辨识的受扰轨迹预测方法。该方法利用实测系统内发电机变量,通过参数辨识重构能够正确反映系统当前拓扑和元件参数的导纳矩阵,避免了对系统拓扑状态和元件参数的依赖性。但是,该方法未对发电机进行聚合等值,导致随着系统中发电机数目的增大,需辨识的参数数量增大,难以满足工程实际需求。为弥补上述缺点,文献[14-16]提出基于 PMU 测点的降阶等值方法,避免了离线或者在线同调等值过程。

基于网络降阶化简的超实时数值仿真方法建立在系统模型的基础上,可以实现未来轨迹长时间仿真分析。然而该类方法一般计算量较大,且依赖于系统的模型和参数。由于电力系统的时变性、非线性等因素,往往难以建立准确的模型及参数,对结果的准确性将造成较大影响。

1.2 基于曲线拟合的受扰轨迹外推

基于曲线拟合的受扰轨迹外推技术不依赖于电力系统的模型。主要根据离散采样点的变化特征,

建立符合其变化趋势的时间序列模型,并利用观测窗内的历史数据进行参数的最小二乘估计,进而外推未来一段时间内的数据。根据预测模型的不同,基于曲线拟合的受扰轨迹外推方法主要有以下几类。

(1) 基于多项式模型

Haque 等人首先提出发电机功角和角速度的受扰轨迹可以采用时间序列展开式表达,并利用多项式模型进行首摆轨迹的快速预测^[17]。文献[18]在此基础上采取二次多项式进行角速度曲线拟合。此后,文献[19]提出数据窗滚动预测方式,根据最新量测数据实时计算模型参数,以提高轨迹预测精度。文献[20]在滚动预测的基础上,通过模糊控制器进行参数的在线智能修正,进一步提高预测效果。此外,文献[21]将“机器人抓球算法”运用于发电机功角轨迹预测,其本质是首先对角速度轨迹进行多项式插值计算,然后将所得多项式进行积分得到功角表达式,实现未来时刻功角轨迹外推。

(2) 基于自回归模型

文献[22]首先提出基于自回归模型的功角轨迹预测方法,将单台发电机的功角轨迹表示为基于历史功角数据的线性组合。此后,文献[23]提出以误差的方差最小为整定原则来确定自回归预测模型的参数。文献[24]提出自记忆功角预测方法,它将现有的自回归模型统一在自记忆方程的框架内,提高了模型参数辨识的准确性。文献[25]根据二阶自回归模型的参数变化特征,在一定区段内实现参数方案的自动调整,提高预测的准确度。文献[26]在前人的基础上,以预测误差为整定目标,实现预测模型参数动态调整,以适应轨迹非线性度的变化,进一步提高预测性能。

(3) 基于三角函数模型

文献[27]从简单电力系统调速控制模型出发,推导功角-时间的函数关系,得到功角轨迹随时间呈现正弦衰减变化关系,从而提出了基于三角函数的功角受扰轨迹拟合预测方法。

(4) 基于灰色模型

文献[28]根据发电机功角轨迹的受扰特征,选择具有相似变化规律的灰色时间序列模型,提出了一种基于灰色模型的功角轨迹预测方法。

基于曲线拟合的轨迹外推方法不依赖于系统模型,具备方法简单、计算快速的特点。但是该类方法通过挖掘历史数据的内在变化规律建立数学模型并进行参数辨识,难以准确表征电力系统的真实动态特征。因此,该类方法仅可用于短时间曲线拟合外推,无法实现受扰轨迹的长时间预测。

2 基于广域响应的暂态失稳实时判别

对于大型电网,任一时间断面下的可获取信息量都十分庞大。从海量的数据中选取特定的测量信息,以客观反映全网的暂态稳定特征,是基于PMU/WAMS的暂态失稳判别的关键。根据所提取的系统关键特征量不同,可将现有的失稳判别方法分为基于发电机量测信息、基于支路量测信息和基于节点电压量测信息三大类。

2.1 基于发电机量测的失稳判别方法

发电机受扰轨迹是直观表征机组是否同步运行的重要信息。现有的暂态失稳判别方法大多都建立在机组功角、角速度量测的基础上,需要电网中发电机的受扰响应,并计算系统的惯量中心。该类方法的分析机理一般由发电机转子角运动方程入手,主要涉及以下几个重要研究方向。

(1) 传统门槛值类判据

早期的系统暂态失稳判别主要通过实时采集发电机状态量信息,并与预设门槛值比较,若某时刻量测数值越过门槛值则判定系统失稳。1995年J. Thorp等人首先提出:当电网中任意一台发电机的功角数值大于限定值,则认为该机组将失去同步,判定系统暂态失稳^[29]。文献[30]提出各发电机均存在特定的暂态能量约束限值,若其转子角转速在某一时刻超过同步运行所能承受的极限,将会脱离系统的约束而失稳。

该类方法为电力系统传统的功角失稳判别方法,仅依靠当前时刻单一机组的量测信息,具备方法简单、可实施性强的优点。但是在电网实际运行中,单台机组的失稳门槛值选取存在较大困难,容易造成误判情况的发生。

(2) 扩展等面积法则判据(EEAC)

薛禹胜等人首先提出基于EEAC的稳定性量化分析理论,根据离线故障仿真得到机组受扰轨迹,将全网发电机分为临界机群和剩余机群,对两群分别进行等值聚合,然后映射为单机无穷大母线,评估在预想故障下的电网暂态稳定性指标^[31]。此后,文献[32]根据发电机同调运动机理,提出了基于实测功角轨迹的临界机群辨识方法,为EEAC的在线应用开辟了道路。在此基础上,文献[33]提出紧急EEAC方法:根据实测轨迹的间隙角实现机组快速分群,并实时计算等值系统参数,预测系统完整减速面积,实现系统稳定性在线量化评估。在后续的研究中,文献[34-36]放弃了等值单机系统加减速面积的计算与比较,转而从功角-不平衡功率相平面中搜寻轨迹特征点,以动态鞍点(DSP)作为判定系统暂

态失稳的标准,并进一步探讨系统时变性对DSP辨识的影响。

EEAC方法经过长年的发展和演变,够克服系统时变性等因素的影响,具有良好的适用性。但是其在线应用时,需要对全网发电机的受扰信息进行等值计算,交互的数据量较大,对量测及通讯要求较高。此外,等值系统能否准确映射全网的动态特征,很大程度上依赖于机组快速分群的准确性。

(3) 相平面轨迹几何特征判据

该类方法通过建立可表征系统动态运行特征的特定相平面,由相平面轨迹的实时变化指标进行暂态失稳特征辨识。L. Wang首先提出了基于功角-角速度相平面的失稳判别方法,对于系统中若任一发电机,若该机相平面内的运行轨迹在某一时刻表征为凸性,则判定系统暂态失稳^[37]。在此基础上,文献[38]提出根据功角-角速度相平面的斜率增量正负值进行暂态稳定性判别,可提高失稳判别的准确度。文献[39]还进一步研究了系统时变参数对轨迹特征的影响,从而提出基于不平衡功率的失稳增补判据。文献[40]指出:单机受扰轨迹具有极强的非自治性,难以准确表征全网的稳定性特征,判别方法应建立在等值单机系统的基础上,需进行发电机分群及聚合,以提高方法对大系统的适应性。此外,文献[41]提出机组功角-暂态动能相平面可表征发电机的暂态稳定性,文献[42]则通过功角-暂态动能相平面的轨迹曲率矢量计算实现暂态失稳的实时判别。另外,文献[43]推导了转速差-功角差相平面与系统稳定性的关系,并采用二次多项式拟合技术进行轨迹参数估计,在一定程度上减小了相平面轨迹不平滑对失稳判别造成的影响。

基于轨迹几何特征的判别方法,仅通过1~2个时间断面量测即可进行系统稳定性判别,判别快速、计算效率高。然而该类方法一般采用差分运算评估相平面轨迹的微变化特征,容易放大误差,造成失稳误判。因此,该类方法的可靠性严重依赖于量测数据的精度,抗干扰能力较差。

(4) 单机能量函数判据(IMEF)

A. N. Michel等人首先提出了IMEF暂态稳定性分析理论,认为系统的分离并不依赖于全网的暂态能量,而是趋向于从系统分离出来机组的暂态能量^[44]。在此基础上,文献[45-46]根据发电机在暂态过程中动能与势能的变化关系,建立能量转化指标以量化评估系统的暂态稳定及不稳定程度。文献[47]提出受扰严重机组的辨识方法,并通过计算受扰严重机组的实时能量变化率来判别全网的暂态稳定性,可应用于系统多摆稳定性的判别。

IMEF 方法仅依靠电网中受扰严重机组信息,所需量测较少。但是在复杂电网中,单机的动态特征往往具有极强的时变性。而该类方法通过分析单机的能量变化特征进行失稳辨识,可能会造成误判。因此,基于单机量测的全网稳定性判别方法,在实际应用中可能难以取得较好的效果。

(5) 人工智能算法判据

该类方法是利用特定智能算法构造系统暂态稳定分类器,通过对大量离线仿真或历史录波数据的学习,建立输入量机组功角、角速度与输出量系统稳定性之间的映射关系。在线应用时,根据发电机量测预测系统的稳定性。涉及的算法主要包括人工神经网络(ANN)^[48-49],支持向量机(SVM)^[50-51]及混合智能算法^[52-53]。

基于人工智能算法的稳定性判别方法,通常需要通过大量离线仿真进行样本学习,以此建立非线性规则参数。其在线稳定性判别的准确度依赖于离线样本的特征范围,若发生的扰动超出样本涵盖的特征范围则可能无法做出正确判别。

2.2 基于关键支路量测的失稳判别方法

发电机和网络是紧密相联的,网络的结构变量以及运行变量也可反映系统的稳定性特征。因而,可通过系统受扰后网络中关键支路的量测信息进行暂态稳定性判别。该类方法的分析机理一般基于机组与网络的暂态能量转换过程,可分为下述两个主要研究方向。

(1) 支路势能法判据

蔡国伟等人通过研究故障后支路能量的分布以及变化特征^[54],首先提出了基于支路势能法的系统暂态稳定性定量评估方法:利用系统的支路量测计算暂态势能变化指标,量化评估该支路的结构脆弱性及全系统的暂态失稳程度^[55]。方法不依赖于机组量测信息,能够有效拓展至多群、多摆的失稳判别中。在上述研究的基础上,文献[56]结合了支路势能函数和势能脊方法的特点,提出支路势能脊判据,在一定程度上简化了原有方法的复杂计算流程。

基于支路势能的失稳判别方法,仅基于电网的薄弱结构特征,无需健全广域量测。该方法不依赖于机组量测,无需进行发电机分群聚合,具备一定的工程可实施性。但是所述算法相对复杂,失稳判别时间一般也较长。

(2) 振荡中心支路判据

文献[57]通过分析振荡中心所在联络线的动态响应特征,提出一种基于振荡中心所在支路量测的互联电网区间暂态失稳判别方法:根据区间联络线的有功功率、相角差及频率变化信息判断互联电网

的区间暂态稳定性。该方法的本质是以联络线受扰响应建立角度-不平衡功率相平面,实时分析系统的暂态能量转化过程,DSP的轨迹特征辨识方法达到失稳判别的目的。

基于振荡中心支路的失稳判据,仅通过互联电网的区间联络线量测,实时判别全网的暂态稳定性。该方法所需量测少,方法简单。然而由于分析模型的限制,本方法仅能应用于互联电网的区间暂态失稳案例,无法有效应对其他失稳模式。

2.3 基于节点电压量测的失稳判别方法

发电机功角的摇摆是暂态稳定性的表象,节点电压的跌落与回升也是系统稳定特征的另一种表现形式。因而,可通过节点受扰电压特征进行系统暂态失稳辨识。该类方法的分析机理主要基于暂态电压与系统稳定性的联系,主要研究成果如下。

(1) 母线电压积分判据

C. W. Taylor 等人提出一种基于电压轨迹-时间积分的工程化方法进行区间暂态失稳判别:针对美国西部电网北电南送的基本特征,利用重要传输走廊的关键变电站母线电压进行加权平均,以综合轨迹对于时间的积分面积大于某一门槛值,作为南部-北部区间暂态失稳判据^[58]。在此基础上,文献[59-60]提出计及电压下坠速率的复合积分算法,并通过辨识系统故障时域来规避电压突变引起的误判,进一步提高了失稳判别的快速性和准确性。

基于母线电压积分的失稳判据,只需对系统中重要送电通道的母线电压幅值进行监测,所需量测少。该方法采用积分计算方式可降低单一数据误差对判别产生的影响,容错性较好。然而,其所能监测的系统失稳模式极大程度上依赖于广域量测方案,无法有效应对所有故障情形。

(2) 人工智能算法判据

A. D. Rajapakse 等人首先将节点电压量测作为人工智能算法的输入量,进行系统暂态功角稳定性分类,并且取得了极高的预测准确度^[61]。在此基础上,文献[62]通过大量算例校核,并与基于发电机量测的同类方法进行对比,结果表明:节点电压量测作为系统特征输入值时,能够更好地反映系统的暂态稳定特征,失稳判别的准确率更高,所需量测数也相对更少。

该方法仅需扰动后少量节点电压量测,即可作出系统稳定性的快速预测,判别准确率较高。但和基于发电机量测的同类方法存在相同问题:其预测准确度很大程度上依赖于训练样本所涵盖的系统失稳特征范围。

3 基于广域响应的暂态稳定紧急控制

由于系统的广域响应已包含了电网的所有特征信息, 包括运行工况、事故信息等, 基于广域响应确定最优的紧急控制地点并计算相应控制量已成为可能。该类控制技术无需制定针对性的策略表, 省去了繁琐的计算过程, 且基于当前系统的真实性状进行计算, 达到“全局分析, 实时决策”的目的。此外, 通过 PMU/WAMS 开展数据集中分析, 可根据全局信息实现各地区控制装置间的协调、经济运行, 是最理想的稳定控制模式。

目前, 基于广域响应的紧急控制方法研究大多建立在 EEAC 基础上。文献[63]提出了一种基于量测数据的闭环暂态稳定紧急控制方法: 基于等值单机轨迹, 应用广义 Hamilton 理论定量估计所需的紧急控制量, 从而实现在线紧急切机决策。文献[33]根据等值功角-不平衡功率相平面轨迹, 利用曲线拟合外推方法预测系统的完整减速面积。文献[64]基于单机能量函数, 以判别失稳时刻等值单机系统的动能作为剩余减速面积, 计算系统到达不稳定平衡点前需降低的等值机械功率, 并在计算过程中进一步考虑了失稳判别与紧急控制间的时延所带来的影响。在此基础上, 文献[65]根据等值单机面积积分公式, 通过迭代求解方法计算需降低的等值机械功率, 提高了切机量的计算精度。

该类紧急控制方法基于等值单机受扰轨迹进行切机量计算。对系统模型参数依赖性小, 可应对复杂故障场景, 具有良好的适应性。但是, 该类方法依赖于全网发电机量测, 计算量大、通讯要求高。由于当前广域信息尚存在不确定性时滞, 可能会严重影响紧急控制的时效性。

4 展望

基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术, 摆脱了传统事件驱动型稳控技术对系统元件模型和参数的依赖, 可应对各种复杂运行工况与故障情形, 具有极大的在线应用前景, 是未来电网安全稳定控制技术的重要发展方向^[66-71]。但 WAMS 技术尚处于发展初期, 虽然在广域动态数据的同步采集和通讯方面已经取得了长足的进展, 但在如何高效利用 PMU 数据, 挖掘可靠的系统稳定性特征方面还需进行大量工作, 应涉及以下几个方面内容:

(1) 相关研究中尚未涉及时滞问题和坏数据问题。实际电网在采样和通讯过程中, 存在不确定性时延和噪声干扰, 将对暂态稳定控制技术的时效性产生重大影响。因此, 需建立合理的数学模型研究广域通

信时滞的机理, 分析所带来的影响并制定有效的应对方法。同时, 可研究针对性的滤波方法, 从而提高暂态稳定控制技术的抗干扰能力。

(2) 需进行基于多种控制措施的紧急控制策略研究。实际电网中可用于改善系统暂态性能的控制措施包括: 切机/切负荷、HVDC 功率调节等。因此, 可综合各类控制措施的特点, 根据系统实际需求启动最佳的紧急控制策略, 以最小代价维持电网暂态稳定。

(3) 基于实际响应的暂态稳定控制技术, 无法准确获知系统未来的真实轨迹, 不能对控制后系统的特征进行先验评估。为防止紧急控制过控或欠控所造成的损失, 可结合一定的系统快速仿真手段, 实现失稳判别的防误和控制策略的校核, 进一步提高暂态稳定控制技术的可靠性。

此外, 基于广域响应的暂态稳定控制技术尚属前瞻性研究, 建议对相关装置与设备的设计原则、协调配合原则进行研究和规范, 以利于该类控制技术的进一步推广和应用。

参考文献

- [1] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-9.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-9.
- [3] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [4] BURNETT R O, BUTTS M M, CEASE T W, et al. Synchronized phasor measurements of a power system event[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
- [5] DE LAREE J, CENTENO V, THORP J, et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.
- [6] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for

- defending blackouts part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [7] TRUDEL G, GINGRAS J, PIERRE J. Designing a reliable power system hydro-Québec's integrated approach[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 907-917.
- [8] MAKAROV Y V, RESHETOV V I, STROEV A, et al. Blackout prevention in the United States, Europe, and Russia[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1942-1954.
- [9] LACHS W R. Area-wide system protection scheme against extreme contingencies[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1004-1027.
- [10] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于电力系统广域保护的评述[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 1-8.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. Review on wide area protection of electric power systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 1-8.
- [11] LIU C W, THORP J. Application of synchronized phasor measurements to real-time transient stability prediction[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1995, 142(4): 355-360.
- [12] LIU C W, THORP J S. New methods for computing power system dynamic response for real-time transient stability prediction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47(3): 324-337.
- [13] 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 Jiangnan, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. 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.
- [14] 韩英铎, 严剑峰, 谢小荣, 等. 电力系统机电暂态过程主导动态参数的在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 1-6.
HAN Yingduo, YAN Jianfeng, XIE Xiaorong, et al. Research on the identification of dominant dynamic parameters of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 1-6.
- [15] 李琰, 周孝信, 周京阳. 基于广域测量测点降阶的系统受扰轨迹预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 9-13.
LI Yan, ZHOU Xiaoxin, ZHOU Jingyang. Perturbed trajectories prediction for multi-machine power systems based on WAMS measurement placement of reduced order[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 9-13.
- [16] 李琰, 周孝信, 周京阳. 基于引入虚拟负荷的发电机暂态稳定预测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 103-107.
LI Yan, ZHOU Xiaoxin, ZHOU Jingyang. The perturbed trajectories prediction based on an additional virtual node[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 103-107.
- [17] HAQUE M H, RAHIM A H M A. Determination of first swing stability limit of multi-machine power systems through Taylor series expansions[J]. IEE Proceeding C, 1989, 136(6): 373-379.
- [18] 孙建华. 一种电力系统暂态稳定性快速实时预测方法[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 60-66.
SUN Jianhua. Transient stability real-time prediction for multi-machine power systems by using observation[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 60-66.
- [19] 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.
LIN Fei, ZHANG Wen, LIU Yutian. PMU based transient stability prediction in power system[J]. Relay, 2000, 28(11): 33-35.
- [20] 苏建设, 陈陈. 基于 GPS 同步量测量的时间序列法暂态稳定预测[J]. 电力系统自动化, 2001, 21(9): 7-9.
SU Jianshe, CHEN Chen. Transient stability prediction using time-series based on GPS synchronized measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 7-9.
- [21] 刘兆燕, 江全元, 曹一家. 基于广域测量系统的快速暂态稳定预测方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 1-4.
LIU Zhaoyan, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Fast learning algorithm for transient stability prediction based on wide-area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 1-4.
- [22] 李国庆, 余贻鑫, 张崇见. 多机系统暂态稳定性的快速判断的新方法[J]. 天津大学学报, 1996, 29(1): 12-17.
LI Guoqing, YU Yixin, ZHANG Chongjian. Fast determination for transient stability of multi-machine power system by part dynamic data[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29(1): 12-17.
- [23] 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, LIU Xiaopeng, LÜ Shirong, 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.
- [24] 谢欢, 张保会, 郝治国, 等. 基于电力系统同步多参量测量的自记忆轨迹预测算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 1-5.

- XIE Huan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Self-memory prediction based on synchronous measurement of power system multi-variable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 1-5.
- [25] BRETAS N G, PHADKE A G. Real time instability prediction through adaptive time series coefficients[C] // Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, USA, 1993: 731-736.
- [26] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 暂态稳定受扰轨迹预测的模型参数自适应研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 827-834. WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Research on self-adaption of model parameters for prediction of disturbed trajectories in transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 827-834.
- [27] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 27-31. SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Perturbed trajectory prediction method based on wide area measurement systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 27-31.
- [28] 邓晖, 赵晋泉, 吴小辰, 等. 基于改进灰色 Verhulst 模型的受扰轨迹实时预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 18-23. DENG Hui, ZHAO Jinquan, WU Xiaochen, et al. A novel post-fault rotor-angle trajectory prediction method based on modified gray Verhulst model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 18-23.
- [29] LIU C W, THORP J. Application of synchronized phasor measurements to real-time transient stability prediction[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1995, 142(4): 355-360.
- [30] STANTON S E. Application of phasor measurements and partial energy analysis in stabilizing large disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 297-306.
- [31] XUE Y, CUSTEM T V, PAVELLA M R. Extended equal area criterion justifications, generalizations, applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(1): 44-52.
- [32] OTA Y, UKAI H, NAKAMURA K, et al. Evaluation of stability and electric power quality in power system by using phasor measurements[C] // Proceedings of International Conference on Power System Technology, Australia, 2000: 1135-1140.
- [33] 滕林, 刘万顺, 贲志皓, 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, LIU Wanshun, YUAN Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
- [34] 邵振国, 薛禹胜, 陈关荣. 一种并不导致失步的滑步现象[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 6-9. SHAO Zhenguo, XUE Yusheng, CHEN Guanrong. Slip phenomenon without loss of synchronization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 6-9.
- [35] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊, 等. 基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角失稳判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 18-22. QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun, et al. Power system transient stability assessment based on WAMS dynamic trajectories[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 18-22.
- [36] 殷明慧, 薛禹胜, 邹云. 受扰轨迹上的动态鞍点的病态及其识别[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 6-9. YIN Minghui, XUE Yusheng, ZOU Yun. Trajectory characteristic based identification of ill-conditioned DSP in EEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 6-9.
- [37] WANG L, GIRGIS A A. A new method for power system transient stability detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1082-1089.
- [38] 谢欢, 张保会, 于广亮, 等. 基于相轨迹凹凸性的电力系统暂态稳定性识别理论[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 38-42. XIE Huan, ZHANG Baohui, YU Guangliang, et al. Power system transient stability detection theory based on characteristic concave or convex of trajectory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 38-42.
- [39] 谢欢, 张保会, 于广亮, 等. 基于轨迹几何特征的暂态不稳定识别[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 16-22. XIE Huan, ZHANG Baohui, YU Guangliang, et al. Transient instability detection based on trajectory geometrical characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 16-22.
- [40] 谢欢, 张保会, 李钢, 等. 基于广域发电机状态信息的电力系统暂态不稳定性实时预测[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 28-32. XIE Huan, ZHANG Baohui, LI Gang, et al. Real-time prediction of transient instability based on wide-area information of generator state[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 28-32.
- [41] 赵磊, 单渊达. 基于轨迹信息的发电机暂态稳定指标分析方法[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 25-28. ZHAO Lei, SHAN Yuanda. An approach to generator transient stability index analysis based on trajectory information[J]. Power System Technology, 2002, 26(8):

- 25-28.
- [42] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域测量系统的电力系统多摆稳定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 38-45.
SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Study on WAMS based multi-swing stability assessment for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 38-45.
- [43] 顾卓远, 汤涌, 孙华东, 等. 一种基于转速差-功角差变化趋势的暂态功角稳定辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 65-72.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. An identification method for power system transient angle stability based on trend of rotative speed difference-angle difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 65-72.
- [44] MICHEL A N, FOUAD A A, VITTAL V. Power system transient stability using individual machine energy functions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1983, 30(5): 266-276.
- [45] 穆钢, 王仲鸿, 韩英铎, 等. 暂态稳定性的定量分析: 轨迹分析法[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(3): 23-30.
MU Gang, WANG Zhonghong, HAN Yingduo, et al. A new method for quantitative assessment of the transient stability of power systems: trajectory analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(3): 23-30.
- [46] 穆钢, 黎平, 蔡国伟. 描述发电机暂态不稳定性的一种新指标[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 16-20.
MU Gang, LI Ping, CAI Guowei. A new index for indicating transient unstable degree of generators in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 16-20.
- [47] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于暂态能量变化率的电力系统多摆稳定性判别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 13-18.
SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Multi-swing stability assessment approach based on variation rate of transient energy for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 13-18.
- [48] 刘艳, 顾雪平, 李军. 用于暂态稳定评估的人工神经网络输入特征离散化方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 56-61.
LIU Yan, GU Xueping, LI Jun. Discretization in artificial neural networks used for transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 56-61.
- [49] SAWHNEY H, JEYASURYA B. A feed-forward artificial neural network with enhanced feature selection for power system transient stability assessment[J]. Electrical Power System Research, 2006, 76(12): 1047-1054.
- [50] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 基于支持向量机的暂态稳定评估双阶段特征选择[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 28-34.
YE Shengyong, WANG Xiaoru, LIU Zhigang, et al. Dual-stage feature selection for transient stability assessment based on support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 28-34.
- [51] MOULIN L S, SILVA A P A, SHARKAWI M A, et al. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 818-825.
- [52] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 基于 Stacking 元学习策略的电力系统暂态稳定评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 12-16.
YE Shengyong, WANG Xiaoru, LIU Zhigang, et al. Power system transient stability assessment based on Stacking meta-learning strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 12-16.
- [53] AMJADY N, MAJED S F. Transient stability prediction by hybrid intelligent system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1275-1283.
- [54] 蔡国伟, 孟祥霞, 刘涛. 电力系统振荡中心的暂态能量解析[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 30-34.
CAI Guowei, MENG Xiangxia, LIU Tao. Study on transient energy around power system oscillation center[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 30-34.
- [55] 蔡国伟, 穆钢, CHAN K W, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.
CAI Guowei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [56] 王科, 游大海, 尹项根, 等. 基于支路势能脊的电力系统暂态稳定分析和临界割集识别[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 262-269.
WANG Ke, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. Power system transient stability analysis and critical cutset detection based on branch ridge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 262-269.
- [57] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 利用实测响应信息的暂态功角失稳实时判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 171-178.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Real-time transient instability criterion based on post-disturbance response data[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 171-178.

- [58] TAYLOR C W, ERICKSON D C, MARTIN K E, et al. WACS — wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 892-906.
- [59] 邓晖, 赵晋泉, 吴小辰, 等. 基于受扰电压轨迹的电力系统暂态失稳判别: 机理与方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 27-32.
- DENG Hui, ZHAO Jinquan, WU Xiaochen, et al. Transient instability detection of power system based on perturbed voltage trajectories part one theory and method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 27-32.
- [60] 邓晖, 赵晋泉, 吴小辰, 等. 基于受扰电压轨迹的电力系统暂态失稳判别: 算例分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 58-63.
- DENG Hui, ZHAO Jinquan, WU Xiaochen, et al. Transient instability detection of power system based on perturbed voltage trajectories part two case analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 58-63.
- [61] RAJAPAKSE A D, GOMEZ F R, NANAYAKKARA K. Rotor angle instability prediction using post disturbance voltage trajectories[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 947-956.
- [62] GOMEZ F R, RAJAPAKSE A D. Support vector machine-based algorithm for post-fault transient stability status prediction using synchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1474-1483.
- [63] 彭疆南, 孙元章, 程林. 基于受扰轨迹的紧急控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 17-22.
- PENG Jiangnan, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. A novel approach for transient stability emergency control based on perturbed trajectory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 17-22.
- [64] 顾卓远, 汤涌, 张健, 等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 95-102.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 95-102.
- [65] 吴为, 汤涌, 孙华东. 基于系统加速度能量的切机控制措施量化研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6134-6140.
- WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong. Quantitative research of generation capacity tripped based on acceleration energy of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6134-6140.
- [66] TERZIJA V, VALVERDE G, CAI D, et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 80-93.
- [67] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
- CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [68] 余文辉, 王少荣, 柳斐, 等. 基于在线自组织同步MAS的电网广域保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 69-76.
- YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, et al. A wide-area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 69-76.
- [69] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.
- LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.
- [70] 谷松林. 基于广域保护系统的距离后备保护整定方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 40-47.
- GU Songlin. A distance backup protection setting scheme based on wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 40-47.
- [71] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
- LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.

收稿日期: 2015-12-20; 修回日期: 2016-02-05

作者简介:

赵晋泉(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统优化、稳定分析与控制和主动配电网等方面的研究工作;

邓晖(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统暂态稳定分析与控制方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)