

“双高”电力系统大扰动稳定性：问题、挑战与展望

杨 鹏¹, 刘 锋¹, 姜齐荣¹, 毛航银²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007)

摘 要: 随着能源绿色化转型的不断深入, 电力系统呈现出高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”特性。电力系统动态特性正在发生深刻的改变, 诸多新型稳定问题逐渐凸显。该文关注“双高”电力系统中的大扰动稳定问题, 首先对常见的大扰动失稳现象进行总结归纳, 然后结合“双高”电力系统的特性与需求, 探讨了现有理论方法的不足以及面临的关键挑战, 最后展望了未来“双高”电力系统大扰动稳定性理论与方法的可能发展道路。

关键词: 电力系统大扰动稳定性; 高比例; 可再生能源; 电力电子设备

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2021)05-0403-12

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.010

Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: Phenomena, challenges, and perspectives

YANG Peng¹, LIU Feng¹, JIANG Qirong¹, MAO Hangyin²

(1. Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company,
Hangzhou 310007, China)

Abstract: The green energy revolution is leading to power systems with high penetrations of renewable energy sources and high penetrations of inverter-interfaced devices. The dynamic characteristics of these power systems are very different from conventional systems, which has led to many new stability problems. This paper focuses on large-disturbance stability issues and the large-disturbance instability phenomena that appear in these “double-high” power systems. This paper also discusses the shortcomings of existing methods and upcoming challenges. Finally, this paper presents our perspectives on future theoretical models and methods to provide large-disturbance stability in “double-high” power systems.

Key words: power system large-disturbance stability; high penetration; renewable energy; inverter-interfaced devices

在能源短缺和环境污染的双重压力下, 世界能源正经历新一轮的重大变革。大力发展风电、太阳能发电等可再生能源, 实现能源生产的绿色转型, 是全球实现可持续发展的必由之路。近年来, 世界各国均向着清洁、低碳、智能的方向加速建设与发展新一代电力系统。为达成巴黎协定低碳减排目标, 根据测算^[1], 到 2050 年可再生能源占全球发电总量的比例需由当前的 26% 增长到 55%。在中国, 可再生能源发展增速更加明显。截至 2019 年底, 中国风电和光伏发电累计装机分别达到 2.1 亿 kW 和 2.04 亿 kW, 均位居世界第一^[2]。在高比例可再生能源发展场景下, 到 2050 年中国可再生能源将占总发电量达到 85% 以上^[3]。

随着大规模可再生能源的接入及负荷侧的再电气化过程, 大量的特性各异的电源、负荷、储能等装备以电力电子为接口接入现有电力系统, 使电力系统向着高比例可再生能源和高比例电力电子设备(简称“双高”)趋势快速发展。就稳定性问题而言, 本文所指的“双高”电力系统的核心特征不在于高比例是多少, 而在于“双高”是否对系统的动力学特性产生显著的影响, 乃至使系统发生本质变化。与由同步发电机主导的传统电力系统相比, “双高”电力系统的动态特性具有全新的、更加复杂的动力学特征, 在一次能源特性、元件数量、元件种类及时间尺度上均出现显著差异, 如见图 1 所示。特别是在由传统电力系统向具有“双高”特性的新一代电力系统过渡阶段, 各种特性交互影响, 动态过程尤为复杂。

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGZJ0000KXJS1900418)

作者简介: 杨鹏(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 刘锋, 副教授, E-mail: lfeng@tsinghua.edu.cn

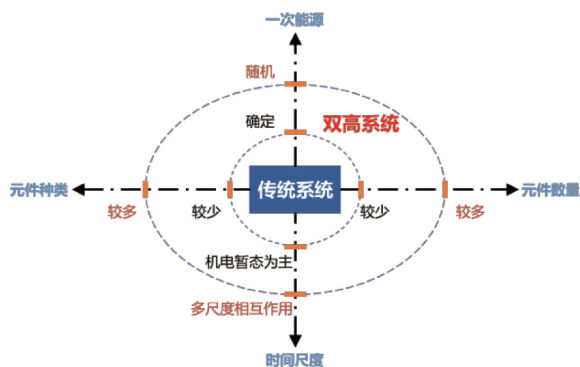


图1 (网络版彩图)传统电力系统与“双高”电力系统的主要差异

电力系统稳定性问题是制约可再生能源和电力电子设备占比进一步提高的主要原因之一^[4]。电力系统稳定性指的是“电力系统在给定的初始条件下,受到扰动后能回到平衡状态,同时大部分系统状态变量保持有界并使得全系统实际上保持完整的能力”^[5]。可再生能源和电力电子设备的广泛接入在小扰动失稳^[6]、大扰动失稳^[7]和低频/次同步振荡^[8]等方面都带来了许多新的问题。如何保证“双高”电力系统的安全稳定运行,是能源绿色转型过程中需要解决的关键技术难点之一。

本文关注“双高”电力系统中的大扰动稳定性问题。所谓大扰动稳定性,是指系统受到较大扰动(如短路故障),使得线性模型不足以刻画系统动态特性,而必须考虑系统的非线性特性和稳定域的一类稳定性问题。电力系统的大扰动稳定性不仅与系统本身的特性有关,还与受到的扰动有关。由于电力系统的高维强非线性特性,大扰动稳定性分析一直是电力系统稳定分析领域的难点。“双高”元件独特的动态特性带来了更加复杂多样的新型大扰动稳定性问题。更重要的是,“双高”电力系统全新的动力学特性及运行方式可能使得面向常规系统建立起来的经典的大扰动稳定性定义、理论和方法都难以直接应用。

本文首先梳理了“双高”电力系统中的大扰动失稳问题,重点分析“双高”接入带来的影响,然后分析了经典大扰动稳定性分析理论和方法在“双高”背景下面临的关键技术挑战,最后展望了“双高”电力系统大扰动稳定性分析理论方法的发展路径。

1 “双高”电力系统中的大扰动失稳问题

“双高”元件复杂多样的动力学特性已经引发了诸多新型的大扰动失稳问题,成为制约可再生能源和电力电子设备占比进一步提高的主要因素之一。

本节对“双高”电力系统中的大扰动失稳现象进行梳理,并重点分析“双高”元件特性在各类失稳问题中的影响。内容侧重输网侧的大扰动稳定性问题,但所讨论的诸多子问题其实同样是配网、微网等各类具备“双高”特征的电力系统中由“双高”带来的共性问题,例如设备级失稳问题、非同步电源与同步电源同步问题、系统功率平衡与频率稳定问题等。

1.1 分类

按照失稳的主要现象和源头,“双高”电力系统中的大扰动失稳问题可以分为大扰动下的设备级失稳和系统级失稳²大类,进一步可以划分为多个失稳问题子类,如图2所示。

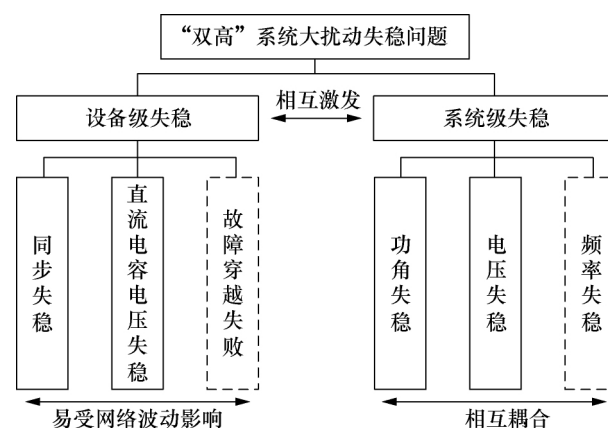


图2 “双高”电力系统大扰动失稳问题分类

大扰动下的设备级失稳,是指大扰动冲击使得电力电子设备不能正常控制,或者触发设备保护从而引起的稳定性问题。这类问题一般与设备的控制和保护有关。例如,电力电子设备锁相环(PLL)受到扰动后不能与电网保持同步,从而失去稳定。考虑到故障穿越仅与设备自身有关,且故障穿越失败可能导致严重的大扰动稳定性问题,本文将故障穿越失败包含到设备级失稳问题中。

大扰动下的系统级失稳,是指大扰动引发了系统较大范围内功率不平衡进而引起的稳定性问题。在传统电力系统的稳定性分类中^[5],大扰动稳定性包括功角稳定和电压稳定²类。频率稳定问题虽然没有大、小扰动之分,但一般考虑的是系统受到严重功率扰动后的稳定性问题。因此,“双高”电力系统的频率失稳也在本文的讨论范围之内。系统级功率不平衡导致的大扰动失稳虽然是传统电力系统中的老问题,但在“双高”背景下有着全新的现象与特点,“双高”接入带来的影响尚未明确。

需要注意的是,上述对大扰动失稳问题的分类存在一定的局限性,各分类并非完全独立。在实际

的失稳过程中,设备级和系统级失稳问题可能同时出现,甚至相互激发。例如,电力电子设备大面积故障退出可能引发系统功率不平衡,造成系统级失稳问题;反之,系统功率或电压的大幅波动可能引发电力电子设备失稳,造成设备级失稳问题。分类的必要性在于抓住主要矛盾简化问题,从而对失稳机理得出更深入的认识。秉承该思路,本文将依次对“双高”电力系统中的大扰动失稳问题进行分析,重点探讨“双高”接入带来的影响。

1.2 大扰动下的设备级失稳问题

大扰动下的设备级失稳问题与设备自身的控制保护特性和所受扰动有关。

“双高”电力系统中电力电子设备的稳定运行严重依赖于网络,尤其是对于并网型(grid-following)逆变器^[9]。设备级失稳的影响范围并不局限于单个设备。受大扰动影响,多个乃至成群的电力电子设备可能出现设备级失稳问题,甚至进一步引起系统级失稳问题。

目前设备级失稳受关注较多的有3类问题:同步失稳、直流电容电压失稳和故障穿越失败。

电力电子设备一般通过 PLL 或者功率环控制^[10]实现与电网的同步。通过 PLL 与主网同步是目前主流的电力电子逆变器控制方法。当逆变器并网电压出现较大波动时,PLL 可能无法准确探测相角和频率,从而与系统失去同步^[11-13]。文^[12]给出了一个典型的 PLL 导致的失稳过程(见图3)。该现象属于设备控制系统的稳定性问题,可以理解为观测器是否能够准确观测并网点的相角和频率。采用功率环控制同步的电力电子设备是通过模拟同步发电机的转子摇摆特性实现频率同步。在受到大扰动后,由于限幅保护或控制设计不当等原因,功率环可能无法继续模拟同步发电机特性,从而使电力电子设备与电网失去同步^[14-15]。

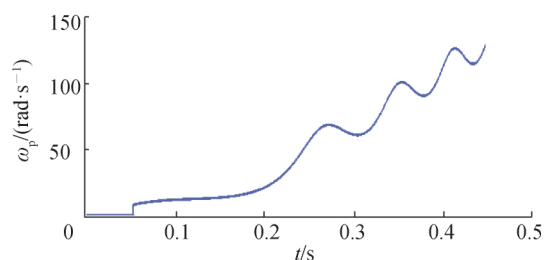


图3 并网点电压跌落导致 PLL 输出频率与同步频率之差发散^[12]

直流电容电压失稳关注的是逆变器直流侧的

稳定性,与逆变器控制特性和受到的电网侧扰动有关。在“双高”电力系统中,直流电容电压失稳一般有2种诱因:限幅^[16]和网侧波动^[17]。限幅导致失稳,是指当电力电子设备运行接近输出功率极限时,无功输出的增加会导致直流电容电压失稳。网侧波动导致失稳,是指网侧电压较大波动可能导致电力电子设备直流电容电压波动,从而失稳。

电力电子设备的故障穿越能力,是指故障发生后设备能够维持并网状态穿越故障过程的能力。电力电子设备对故障电流的承受能力远低于同步发电机,因此当电压或频率发生较大畸变时需要快速脱网以保护设备。故障穿越能力一般包括电压和频率的高穿和低穿。故障穿越能力对系统受到大扰动后的稳定性至关重要,决定了故障中和故障后电力电子设备能否为系统提供支撑。故障穿越失败可能导致电力电子电源大面积脱网,从而引发连锁故障^[7]。反之,“双高”电力系统中电力电子设备的故障穿越能力越强,设备就越能在故障发生后的关键时段内为系统提供功率支撑,系统的大扰动稳定性将显著增强^[18-19]。

1.3 大扰动下的系统级失稳问题

大扰动下的系统级失稳问题与系统大范围内的功率平衡有关,本文所讨论的系统级失稳问题包括功角失稳、电压失稳和频率失稳3类。这3类失稳问题虽然与传统电力系统的划分相同,但是“双高”的接入赋予了它们新的现象和特点。本文将重点分析“双高”对这3类系统级失稳问题的影响,主要结论总结如表1所示。

1.3.1 功角失稳

功角失稳,是指同步互联电力系统中的同步发电机受到大扰动后失去同步运行^[5, 20]。“双高”接入对功角失稳问题的影响主要体现在4个方面:系统惯性的降低、电力电子设备注入功率特性的引入、系统潮流分布的改变及新的控制手段的产生。

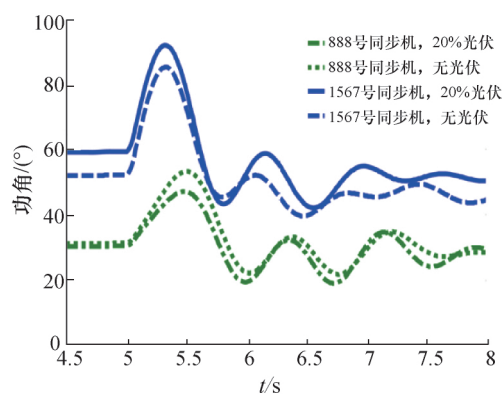
“双高”接入对功角失稳问题最直接的影响是使系统惯性的降低。系统惯性是维持暂态功角稳定性的重要因素,不仅影响稳定域的大小,还影响故障中和故障后系统的轨迹。绝大多数可再生能源和电力电子设备本身为低惯性甚至零惯性,因此“双高”接入将使得电力系统惯性降低,从而对系统的功角稳定性产生负面影响^[7, 21]。

表1 “双高”对大扰动下系统级失稳问题的主要影响和定性结论

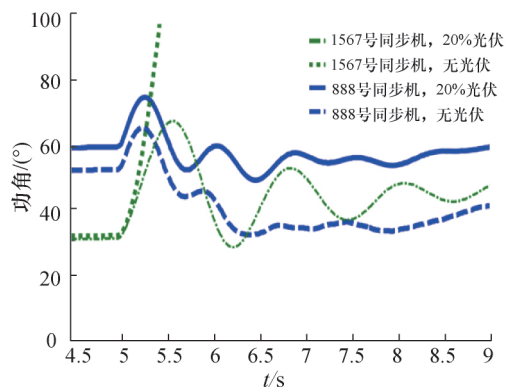
类别	“双高”带来的主要影响	定性结论
功角失稳	降低系统惯性	不利于稳定性
	引入新的注入功率特性	受渗透率、负载率、功率恢复速率、故障穿越能力等多因素影响,对稳定性的影响尚无定论
	改变系统潮流分布	潮流加重不利于稳定性;潮流减轻有利于稳定性
	带来新的控制手段	增强稳定性
电压失稳	引入新的无功-电压特性	受渗透率、故障位置、故障穿越能力等多因素影响,对稳定性的影响尚无定论
	引入交直流混连	产生新的电压失稳现象
	带来新的无功补偿装置	增强稳定性
频率失稳	降低系统惯性	不利于稳定性,频率初始跌落变快、最大偏差变大
	带来快速频率支撑技术	增强稳定性

电力电子设备在故障过程中的注入功率特性是影响功角失稳问题的另一关键因素。该特性主要指电力电子电源在受到扰动后的输出功率特性,包括恢复特性、爬坡速度等^[22-23]。无论是在高压侧集中接入的电力电子型电源,还是在中低压侧接入的以电力电子为接口的分布式电源,其输出功率特性与传统电源都有着显著区别。电力电子设备在受到大扰动后可能出现功率闭锁、穿越故障后功率爬坡恢复或者不能穿越故障从而脱网等不同的注入功率特性。在系统受到扰动后的暂态过程中,电力电子型电源通过功率与传统发电机组相互作用,影响发电机功角的摇摆曲线^[24-25]。因此,电力电子设备的注入功率特性对故障中发电机功角轨迹的发展及故障后功角的同步恢复都有直接的影响。然而,电力电子设备的注入功率特性对大扰动功角稳定性影响的性质目前学术界尚未达成共识,与“双高”渗透率、负载率、功率恢复速率、故障位置等多方面的因素都有关^[26-28]。对于一个相同的系统,不同位置的故障下,同样的电力电子型电源接入可能对功角稳定性造成截然不同的影响。文^[29]给出了一个典型的功角失稳案例,如图4所示。

“双高”接入对系统潮流分布的改变同样是影响功角失稳问题的重要因素。一方面,可再生能源具有明显的地域特点,其分布位置与现有大型发电厂大不相同。由于负荷分布不变,可再生能源大量接入替代原有同步发电机组,势必会改变系统的潮流分布。另一方面,大量分布式电源、电动汽车、储能等在中低压侧接入,系统功率双向流动,也会改变潮流分布。此外,可再生能源出力的随机性使得系统潮流的波动在运行过程中更加剧烈。从系统层面看,大量可再生能源接入导致系统潮流分布变化,对于功角失稳问题而言,潮流分布的影响比系



(a) 1569节点故障,接入光伏不利于系统功角稳定



(b) 1164节点故障,接入光伏有利于系统功角稳定

图4 接入相同的光伏对不同位置的故障产生的影响不同^[29]

统惯性降低带来的影响可能更加严重^[7]。例如,在高比例可再生能源接入的场景下,美国 California-Oregon 潮流断面将逼近现有传输通道容量极限,使得系统大扰动功角稳定性严重恶化^[7]。“双高”接入改变潮流分布对于系统大扰动功角稳定性的影响本质上是改变了系统平衡点,从而改变了稳定域的大小。一般的定性结论为,当系统潮流加重时,如

果大量可再生能源在送端接入,将产生负面影响;潮流减轻时,如果大量可再生能源在受端接入,将产生正面影响。

电力电子设备的快速灵活可控性也为增强大扰动功角稳定性提供了新的调控手段。虚拟同步机控制技术可以增加系统的等效惯性,提高功角稳定性^[30-31]。采用自适应惯量等控制方法的虚拟同步机还可以优化系统轨迹,进一步增强功角稳定性^[32-33]。在发电机附近配置具有快速响应能力的储能装置,可以帮助发电机消耗功角暂态过程中的不平衡能量,从而提升功角稳定性^[34-35]。

1.3.2 电压失稳

电压失稳,是指系统受到较大扰动后系统各节点电压不能维持平稳。“双高”接入对电压失稳问题的影响主要体现在3个方面:新的无功-电压特性的引入、交直流混连的影响及新的调节手段(如电力电子化无功补偿装置)的产生。

电力电子电源及电力电子化负荷的无功-电压特性是影响大扰动电压失稳问题的主要因素。高压输电侧电力电子型电源的无功-电压控制方式对系统的大扰动电压稳定性具有重要影响^[36],并且距离负荷中心越近的设备对稳定性的影响越显著^[37]。在“双高”系统的配电侧,有大量分布式电源尤其是大量光伏接入系统。在配电侧故障的大扰动下,如果光伏设备因故障穿越能力不足而大量脱网,可能导致高压侧电压失稳^[38],如图5所示。通过改善电力电子型电源的无功-电压特性、提升故障穿越能力,可以有效增强系统的大扰动电压稳定性。目前,对双馈风机、直驱风机、光伏等可再生能源的无功-电压特性及无功支撑控制都已经有了广泛的研究^[39-41]。在“双高”系统的负荷侧,电力电子化负荷的无功-电压特性对电压稳定性也起到十分重要的作用。这方面的研究主要集中在建模与分析2方面,如电动汽车等电力电子化负荷动态特性的建模与识别^[42],以及不同负荷动态特性对系统电压稳定性影响的分析^[43]。

交直流混连系统中的大量电力电子设备也对系统的大扰动电压失稳问题带来了影响。例如,特高压直流输电(HVDC)双极闭锁可能引起系统电压失稳^[44],故障较为严重时需要通过切除并联无功和部分负荷等紧急控制措施来维持稳定。相关问题在交直流混连系统中已有较多研究^[45-46],本文不再赘述。

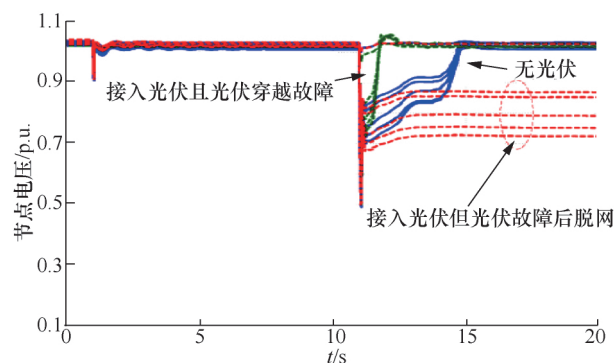


图5 (网络版彩图)不同光伏接入情况下,受扰后输电侧电压曲线^[38]

电力电子无功补偿装置的广泛应用是“双高”电力系统大扰动电压稳定性的利好因素。静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM)等电力电子无功补偿装置为系统的无功-电压控制提供了灵活有效的调控手段。目前,利用电力电子无功补偿装置提升系统大扰动电压稳定性的控制技术已经被广泛研究。例如,SVC可以补偿异步电机负荷^[47];STATCOM与风电场结合^[48],可以改善可再生能源的无功-电压特性,提升系统的大扰动电压稳定性。

1.3.3 频率失稳

频率失稳,是指在受到较大的功率扰动后,系统频率无法恢复稳定或无法维持在一定安全范围内^[5]。“双高”接入对系统频率失稳问题的影响主要体现在一反一正2方面:系统惯性的降低及电力电子设备快速频率支撑技术的产生。

“双高”接入使得系统惯性降低是影响系统频率失稳问题的重要原因,也是目前学术界和工业界重点关注的问题^[48-51]。对真实系统的仿真结果^[49]和基于数学模型的理论分析^[50]都已经论证了系统惯性在频率稳定性中的重要性,可再生能源大量接入使得系统惯性降低,从而威胁系统频率稳定性。具体来说,惯性降低会使得频率初始跌落增快,暂态过程中频率最大偏差增大,从而可能触发保护使设备脱网,进一步加剧频率偏差而引起连锁故障。

但是,电源侧和负荷侧的电力电子化也为系统频率调节提供了新的控制手段。与传统发电机相比,电力电子设备具有更快的响应速度,能够快速跟踪控制信号,调整输出功率^[52]。理论分析结果表明,对暂态过程中的频率最大偏差值而言,系统一

次调频响应强度的影响最大,一次调频响应速度次之,而系统惯性的影响反而是最小的^[53]。因此,充分利用电力电子设备快速灵活调控的优点,挖掘电源侧和负荷侧的频率响应调节能力,能有效提升系统的频率稳定性。目前的研究热点主要集中于电力

电子设备进行快速频率支撑的控制设计方法,主要包括新能源(风机)支撑^[54-55]、电力电子虚拟同步机控制^[56]、HVDC 频率支撑^[57]、电力电子负荷参与调频^[58]等。

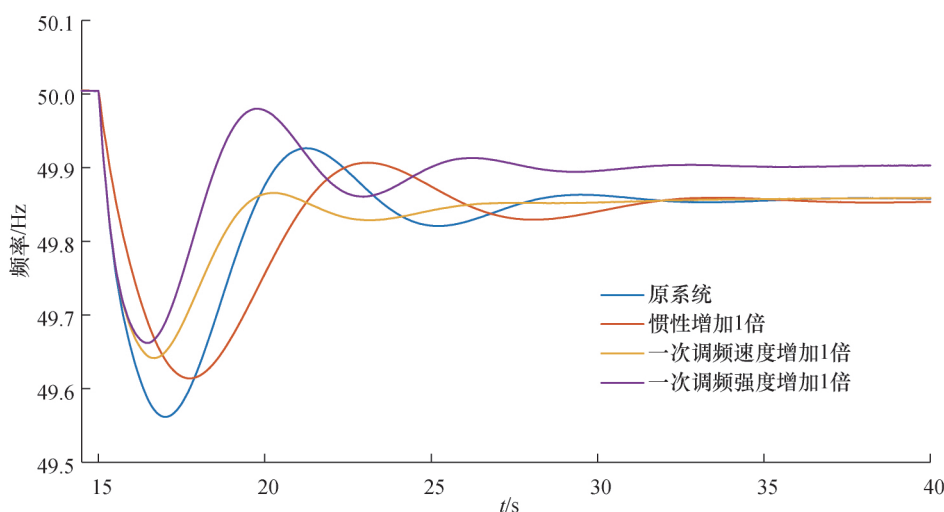


图6 (网络版彩图)不同惯性、一次调频响应强度和一次调频响应速度下系统受到扰动后的频率曲线^[53]

1.3.4 三者关系

上述的分类虽然有利于对电力系统中的系统级失稳问题进行分类研究与分析,但是需要明确的是,这3类失稳问题并非互不相干的,可能同时出现并相互激发^[5]。例如,严重的短路故障导致发电机功角大幅摇摆使得部分机组脱网,从而引起系统电压、频率崩溃。

需要注意的是,功角、电压和频率在“双高”电力系统中耦合更加紧密^[9, 59]。“双高”电力系统中的失稳更有可能表现为所有变量的失稳^[60]。已有仿真结果表明,对于同样的故障,随着风电渗透率的增加,系统失稳现象会由同步发电机的功角失稳主导转变为风电的电压失稳主导^[61]。系统变量之间的这种强耦合性,使得很难再将失稳现象简单地按照单一变量进行分类并独立研究,反而需要综合多变量,全过程进行稳定性分析。

2 “双高”电力系统大扰动稳定性分析的挑战

2.1 设备动态特性建模与仿真

“双高”电力系统的核心特征在于设备动态的新特点。可再生能源和电力电子设备的动态特性主要取决于其控制保护系统^[62-63]。相对于同步发电机组,新设备在受到扰动后的动态特性具有多时间尺度耦合及序贯切换的特点^[63]。电力电子设备的控制系统

涉及至少3个时间尺度的能量交互。以双馈风机为例^[64],不同的控制环节涉及到机电时间尺度(1 s)、直流时间尺度(0.1 s)和交流时间尺度(0.01 s),如图7所示。各个时间尺度的动态相互耦合,导致了复杂的动态特性及多样的失稳现象。此外,电力电子设备受到较大扰动时,在保护作用下控制系统可能发生序贯切换,产生非连续的动态特性。电力电子设备在暂态过程中的动态特性不仅与扰动深度有关,还与扰动持续时间有关^[63]。如此复杂的设备动态很难直接应用到现有的理论分析工具中。因此,针对具体的问题,需要对设备动态进行简化,但又不能失去设备动态的关键特征。如何准确刻画新型设备在不同问题背景下的动态特性,并建立适用于

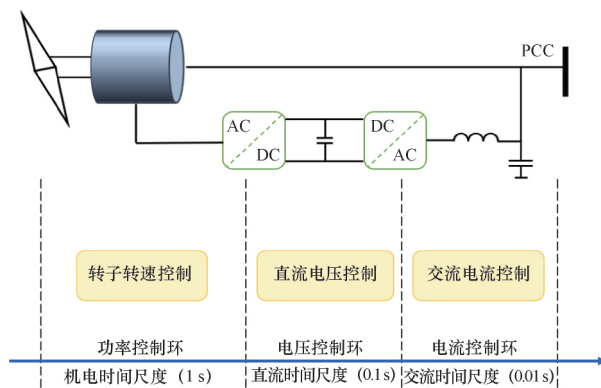


图7 双馈风机多时间尺度耦合动态特性

不同问题的简化分析模型,是亟待解决的关键问题之一。

在仿真分析方面,电力电子设备需要使用电磁暂态仿真来精确模拟其多时间尺度耦合的动态特性。对于设备级稳定性问题或规模较小系统,现有的仿真技术已经比较成熟^[65-66]。然而,在研究大规模系统级的大扰动稳定性问题,尤其是要考虑电力电子设备快时间尺度控制动态与系统慢动态的交互影响时,仿真系统将涉及电磁暂态和机电暂态2个时间尺度,仿真计算量巨大。超大规模“双高”电力系统的多时间尺度仿真是目前尚未解决的关键技术问题之一。

2.2 超高维异构系统稳定性快速分析

传统电力系统主要由大型同步发电机组构成,一个大型区域电网中需要考虑的动态元件数目一般为 $10^2 \sim 10^3$ 数量级。而在“双高”电力系统中,一方面大型同步发电机组被小型电源替代,另一方面海量分布式电源、电动汽车、分布式储能等以电力电子为接口的新型设备从中低压侧接入系统。这使得稳定性分析中需要考虑的动态元件数目可能达到 $10^5 \sim 10^6$ 量级^[67],并且各类设备动态特性差异较大,呈现出高度异构性。非线性系统的稳定性分析问题一般是NP-hard问题^[68]，“双高”电力系统的暂态稳定性分析需要解决由于维数爆炸带来的高计算和通信需求等严峻问题。

此外,“双高”电力系统的运行工作点将以更快的速度发生变化^[4]。这一方面是因为风、光等可再生能源出力的波动性,另一方面则有可能来自于海量电力电子设备的频繁投切和系统拓扑的快速变化。上述变化的时间尺度一般远慢于暂态过程关注的时间尺度,在稳定性分析模型中可以视为不变。但是需要注意的是,现有的稳定性分析理论与工具大都是针对给定平衡点进行的,当平衡点变化时稳定性分析需要重新进行。因此,系统工作点的快速变化要求更加频繁地对系统稳定性进行检验,这对大扰动稳定分析的速度提出了更高的要求^[7]。“双高”电力系统对分析速度的高要求与系统模型的高维数是互相矛盾的。如何实现超高维异构系统的快速稳定性分析也是“双高”电力系统亟需解决的一个重要技术问题。

2.3 稳定性定义与分类

经典的稳定性定义与分类是面向由同步发电机主导的电力系统建立起来的,相关研究很好地支撑

了过去几十年电力系统的稳定运行。然而,随着可再生能源和电力电子设备占比的不断提高,系统动态特性将发生由量变到质变的转换,新出现的稳定性问题可能难以归类到原有的框架中。

目前,经典的电力系统稳定性定义与分类是由CIGRE(国际大电网组织)和IEEE(国际电气电子工程师协会)联合成立的工作组在2004年提出的^[5]。其中将电力系统稳定性分为功角稳定、电压稳定和频率稳定3类,与中国在2001年发布的安全稳定导则^[20]类似。中国2020年正式生效的最新版安全稳定导则^[69]仍然沿用了传统的稳定性分类与定义。然而,随着可再生能源和电力电子设备占比的不断提高,原有的稳定性定义和分类将不能涵盖新出现的稳定性问题。其中,功角稳定性的定义在“双高”电力系统中的适用性问题最为明显。经典的功角稳定性特指发电机之间维持同步的能力。然而,电力电子设备的同步方式与同步发电机有着本质的区别,电力电子设备本身没有旋转部件,也就没有功角,而是通过PLL或功率环控制实现与电网的同步。因此,在“双高”电力系统中,经典功角稳定性的概念并不能覆盖系统的同步稳定性问题,已有学者提出采用广义同步稳定性替代功角稳定性^[70]。

当系统中电力电子设备占主导时,交流系统中最经典的频率概念也需要重新审视。在传统电力系统中,基于发电机转子的Newton运动定律,频率天然地与有功功率耦合,是反映系统不平衡功率的核心指标。正是基于频率,电力系统建立了一次、二次和三次调频控制体系,能够快速有效地维持系统功率平衡。电力电子设备输出的正弦电压和电流由脉宽调制(PWM)产生,在技术上输出电气量的频率可以完全与功率解耦,保证频率恒定不变。如果未来100%电力电子化的电力系统采用上述控制技术,则频率稳定性问题不再存在,此时需要找到能够反映功率不平衡的另一种指标,与之对应的稳定性问题也会随之出现。

3 “双高”电力系统大扰动稳定性分析的展望

3.1 新的建模与仿真方法

在理论分析中希望得到的是设备简化模型,该模型要足够简单以适用于理论推导,但又不能过于简单以至于掩盖了设备的关键动力学特征。这不仅要求研究者详尽掌握新型设备动态,更需要深入理

如何实现超高维系统稳定性的快速分析将成为不能回避的问题。这要求革新大扰动稳定性分析的基础理论与方法,形成弱中心化甚至去中心化的稳定性快速分析与调控体系。

当电力系统转变为完全由“双高”主导时,量变最终带来系统动态特性的质变。此时,原有的稳定性定义与分类等基础概念可能不再适用。建立全新的稳定性定义与分类是需要解决的首要问题。这不仅需要全面深入认知电力系统动态特性,更需要拓展稳定性的基础理论。

对稳定性定义的再认识尽管在可再生能源和电力设备占比较低的情形下尚不急迫,然而明确的定义与分类不仅有助于建立分析方法,对设备模型的合理简化也大有裨益。同时,电力电子设备的建模与仿真贯穿始终,为大扰动稳定性分析提供了基本对象及最可靠的检验方法。只有将这3方面的内容综合考虑、共同发展,才能形成真正适应未来“双高”电力系统的大扰动稳定性分析理论与方法。

4 结 语

本文总结了“双高”电力系统中已经出现的大扰动稳定性问题,并探讨了未来大扰动稳定性分析面临的关键挑战和可能的解决方法。要解决这些稳定性问题,必须从第一性原理出发,重新审视现有的稳定性理论与方法,包括建模、仿真、分析、甚至是基础定义和分类等各个方面。

本文仅关注了大扰动稳定问题,并未涉及“双高”接入带来的小扰动稳定、宽频振荡等其他稳定性问题。下一步将对“双高”电力系统稳定性问题进行更全面的梳理分析。

参考文献 (References)

- [1] IRENA. Global renewables outlook: Energy transformation 2050 [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [2] IRENA. Data & Statistics [EB/OL]. [2020-06-08]. <https://www.irena.org/Statistics>.
- [3] 国家发展和改革委员会能源研究所, 能源基金会. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, Energy Foundation. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study [R]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, 2015. (in Chinese)
- [4] LEW D, BARTLETT D, GROOM A, et al. Secrets of successful integration: Operating experience with high levels of variable, inverter-based generation [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 24–34.
- [5] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387–1401.
- [6] TSOURAKIS G, NOMIKOS B M, VOURNAS C D. Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 190–200.
- [7] MILLER N W. Keeping it together: Transient stability in a world of wind and solar generation [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(6): 31–39.
- [8] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究 [J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057–1066.
JIANG Q R, WANG L, XIE X R. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057–1066. (in Chinese)
- [9] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration? [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89–98.
- [10] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809–820.
- [11] GÖKSÜÖ, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683–1691.
- [12] HU Q, FU L, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220–3229.
- [13] MA S K, GENG H, LIU L, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 216–226.
- [14] XIN H H, HUANG L B, ZHANG L Q, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206–5207.
- [15] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578–591.

- [16] FARROKHABADI M, KÖNIG S, CAÑIZARES C A, et al. Battery energy storage system models for microgrid stability analysis and dynamic simulation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 2301–2312.
- [17] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grids [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 4(2): 445–458.
- [18] RAJAMOHAIED S, JEYANTHY P A, DEVARAJ D. Study on the impact of under voltage ride through characteristics of larger PV penetrations on the system transient stability [C]// 2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Coimbatore, India: IEEE Press, 2017: 1–6.
- [19] GENG H, LIU L, LI R Q. Synchronization and reactive current support of PMSG-based wind farm during severe grid fault [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1596–1604.
- [20] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2001. State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Guide on security and stability for power system: DL 755—2001 [S]. Beijing: China Electric Power Press 2001. (in Chinese)
- [21] TIELENS P, VAN HERTEM D. The relevance of inertia in power systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 999–1009.
- [22] GAUTAM D, VITTAL V, HARBOUR T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 1426–1434.
- [23] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 29–36.
- [24] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3832–3842. TANG L, SHEN C, ZHANG X M. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—Part I: Theoretical foundation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3832–3842. (in Chinese)
- [25] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 4043–4051. TANG L, SHEN C, ZHANG X M. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—Part II: Factors affecting transient angle stability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3832–3842. (in Chinese)
- [26] LIU Z, ZHANG Z A, LIN Y S. Impact of inverter-interfaced renewable generation on transient stability at varying levels of penetration [C]// IECON 2018–44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington DC, USA: IEEE Press, 2018: 4027–4032.
- [27] RAMPOKANYO M, KAMERA P. Impact of increased penetration levels of distributed inverter-based generation on transient stability [C]// 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica. Cape Town, South Africa: IEEE Press, 2018: 573–578.
- [28] 于珍, 沈沉, 刘锋, 等. 计及风电不确定性的含暂态稳定约束的经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7270–7282. YU Z, SHEN C, LIU F, et al. Transient stability-constrained economic dispatch considering wind power uncertainty [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7270–7282. (in Chinese)
- [29] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 893–901.
- [30] TAMRAKAR U, GALIPEAU D, TONKOSKI R, et al. Improving transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines [C]// 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands: IEEE Press, 2015: 1–6.
- [31] CHEEMA K M, MEHMOOD K. Improved virtual synchronous generator control to analyse and enhance the transient stability of microgrid [J]. *IET Renewable Power Generation*, IET Digital Library, 2020, 14(4): 495–505.
- [32] WU H, WANG X F. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1034–1049.
- [33] LIU J, YANG D J, YAO W, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(1): 1–8.
- [34] KIAEI I, LOTFIFARD S. Tube-based model predictive control of energy storage systems for enhancing transient stability of power systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6438–6447.
- [35] KANCHANAHARUTHAI A, CHANKONG V, LOPARO K A. Transient stability and voltage regulation in multimachine power systems vis-à-vis STATCOM and battery energy storage [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2404–2416.
- [36] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(9): 15–21.

- CHEN L, LIU Y Q, DAI Y H, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15–21. (in Chinese)
- [37] KHANI D, SADEGHI YAZDANKHAH A, MADADI KOJABADI H. Impacts of distributed generations on power system transient and voltage stability [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 488–500.
- [38] POURBEIK P, EFTEKHARNEJAD S, BELVAL R. An investigation of the impact of photovoltaic generation on a utility transmission system [C]// CIGRE Grid of the Future Symposium. Boston, MA: CIGRE Press, 2013: 1–8.
- [39] DEVARAJ D, JEEVAJYOTHI R. Impact of wind turbine systems on power system voltage stability [C]// 2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET). Tirunelveli, India: IEEE Press 2011: 411–416.
- [40] ALY M M, ABDEL-AKHER M, ZIADI Z, et al. Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 665–672.
- [41] DE RIJCKE S, ERGUN H K, VAN HERTEM D, et al. Grid impact of voltage control and reactive power support by wind turbines equipped with direct-drive synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 890–898.
- [42] DHARMAKEERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Modeling and planning of EV fast charging station in power grid [C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE Press, 2012: 1–8.
- [43] 汤涌, 林伟芳, 孙华东, 等. 考虑负荷变化特性的电压稳定判据分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 12–18.
- TANG Y, LIN W F, SUN H D, et al. Analysis of voltage stability criterion considering load characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 12–18. (in Chinese)
- [44] 潘小艳, 王建全. 特高压电网接入浙江电网的暂态电压稳定分析和控制策略 [J]. 华东电力, 2010, 38(6): 863–866.
- PAN X Y, WANG J Q. Transient voltage stability analysis and control strategies of UHV access Zhejiang grid [J]. East China Electric Power, 2010, 38(6): 863–866. (in Chinese)
- [45] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50–55.
- SHAO Y, TANG Y, GUO X J, et al. Transient voltage stability analysis of east china receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 50–55. (in Chinese)
- [46] TAN O T, THOTTAPILLIL R. Static var compensators for critical synchronous motor loads during voltage dips [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1517–1523.
- [47] 王树东, 杨钊, 高翔. 基于 GTO 的 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性的研究 [J]. 电气自动化, 2016, 38(5): 47–49.
- WANG S D, YANG Z, GAO X. A study on improvement of transient voltage stability of wind power generation farm through GTO-based STATCOM [J]. Electrical Automation, 2016, 38(5): 47–49. (in Chinese)
- [48] MILLER N W, SHAO M L, D'AQUILA R, et al. Frequency response of the US eastern interconnection under conditions of high wind and solar generation [C]// 2015 Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference. New Orleans, LA: IEEE Press, 2015: 21–28.
- [49] MILLER N W, SHAO M L, VENKATARAMAN S, et al. Frequency response of California and WECC under high wind and solar conditions [C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE Press, 2012: 1–8.
- [50] MILANO F, DÖRFLER F, HUG G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems [C]// 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). Dublin, Ireland: IEEE Press, 2018: 1–25.
- [51] PAGANINI F, MALLADA E. Global analysis of synchronization performance for power systems: Bridging the theory-practice gap [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019: 1–1.
- [52] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859–867.
- [53] WU S Y, YANG P, ZHANG Y F, et al. On the key factors of frequency stability in future low-inertia power systems [C]// 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Bangkok, Thailand: IEEE Press, 2020: 240–245.
- [54] XI X Z, GENG H, YANG G, et al. Torsional oscillation damping control for DFIG-based wind farm participating in power system frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3687–3701.
- [55] HUANG L B, XIN H H, ZHANG L Q, et al. Synchronization and frequency regulation of DFIG-based wind turbine generators with synchronized control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1251–1262.
- [56] XI J B, GENG H, ZOU X. Decoupling scheme for virtual synchronous generator controlled wind farms participating in inertial response [J/OL]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. DOI: 10.35833/MPCE.2019.000341.

- [57] KAUR J, YOGARATHINAM A, CHAUDHURI N R. Frequency control for weak AC grid connected to wind farm and LCC-HVDC system: Modeling and stability analysis [C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA: IEEE Press, 2016: 1–5.
- [58] ADREES A, MILANOVIĆ J. Effect of load models on angular and frequency stability of low inertia power networks [J]. *Transmission Distribution IET Generation*, 2019, 13(9): 1520–1526.
- [59] FARROKHABADI M, CAÑIZARES C A, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 13–29.
- [60] HATZIARGYRIOU N. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies PES-TR77 [R]. Piscataway, N J: Power System Dynamic Performance Committee (PSDP), 2020.
- [61] CHEN L, DAI Y H, MIN Y, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of wind power with power electronic interface [C]// 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Brisbane, QLD: IEEE Press, 2015: 1–5.
- [62] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5145–5154, 5395.
- YUAN X M, CHENG S J, HU J B. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5145–5154, 5395. (in Chinese)
- [63] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5457–5467, 5594.
- HU J B, YUAN X M, CHENG S J. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5457–5467, 5594. (in Chinese)
- [64] TANG W, HU J B, CHANG Y Z, et al. Modeling of DFIG-based wind turbine for power system transient response analysis in rotor speed control timescale [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6795–6805.
- [65] KRAUS R, MATTAUSCH H J. Status and trends of power semiconductor device models for circuit simulation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, 13(3): 452–465.
- [66] 施博辰, 赵争鸣, 朱义诚, 等. 电力电子混杂系统多时间尺度离散状态事件驱动仿真方法 [J/O]. *中国电机工程学报*. (2020-09-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200928.1320.002.html>.
- SHI B C, ZHAO Z M, ZHU Y C, et al. Discrete-state event-driven simulation approach for multi-time-scale power electronic hybrid system [J/O]. *Proceedings of the CSEE*. (2020-09-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200928.1320.002.html>. (in Chinese)
- [67] QUINT R, DANGELMAIER L, GREEN I, et al. Transformation of the grid: The impact of distributed energy resources on bulk power systems [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2019, 17(6): 35–45.
- [68] BLONDEL V D, TSITSIKLIS J N. A survey of computational complexity results in systems and control [J]. *Automatica*, 2000, 36(9): 1249–1274.
- [69] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code on security and stability for power system: GB 38755-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [70] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 3–9.
- XU Z. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 3–9. (in Chinese)
- [71] SCHIFFER J, ZONETTI D, ORTEGA R, et al. A survey on modeling of microgrids: From fundamental physics to phasors and voltage sources [J]. *Automatica*, 2016, 74: 135–150.
- [72] YAN S H, ZHOU Z Y, DINAVAH V. Large-scale nonlinear device-level power electronic circuit simulation on massively parallel graphics processing architectures [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6): 4660–4678.
- [73] BENIGNI A, MONTI A, DOUGAL R A. Latency-based approach to the simulation of large power electronics systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(6): 3201–3213.
- [74] SONG Y K, CHEN Y, YU Z T, et al. CloudPSS: A high-performance power system simulator based on cloud computing [J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 1611–1618.
- [75] YANG P, LIU F, WANG Z J, et al. Distributed stability conditions for power systems with heterogeneous nonlinear bus dynamics [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 2313–2324.
- [76] CALISKAN S Y, TABUADA P. Compositional transient stability analysis of multimachine power networks [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2014, 1(1): 4–14.
- [77] ZHANG Y, XIE L. A transient stability assessment framework in power electronic-interfaced distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 5106–5114.

(责任编辑 刘森)