

高比例新能源和电力电子设备电力系统的 宽频振荡研究综述

马宁宁¹, 谢小荣^{1*}, 贺静波², 王衡³

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

3. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830063)

Review of Wide-band Oscillation in Renewable and Power Electronics Highly Integrated Power Systems

MA Ningning¹, XIE Xiaorong^{1*}, HE Jingbo², WANG Heng³

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumchi 830063, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

ABSTRACT: High proportion of renewables and high proportion of power electronics gradually becomes a significant feature of the power systems. However, the wide-band oscillation resulting from the interaction between power electronics and the power grid is one of the important problems for power system stability. First, the influence of power electronic trend on power system oscillation was discussed, and the definition of wide-band oscillation was introduced in a broad sense. Secondly, wide-band oscillation was compared with the traditional oscillation of power systems. The morphological characteristics of wide-band oscillation were summarized, and formation mechanism were analyzed. Then, the present research status, including mathematical model, spatial-temporal characteristics and suppression measures were outlined, and then the existing problems and challenges in researching of wide-band oscillation were pointed out. Finally, the research approaches and methods of wide-band oscillation in renewables and power electronics highly integrated power systems were put forward from four aspects: modeling method, mechanism research, propagation characteristics and suppression measures.

KEY WORDS: renewable energy; power electronics device;

wide-band oscillation; time-varying characteristic; wide-area propagation; stability

摘要: 电力系统正逐步向高比例新能源和高比例电力电子设备趋势发展, 而电力电子设备与电网之间相互作用引起的宽频振荡成为影响电网安全稳定运行的重要问题之一。该文首先阐述了电力系统电力电子化趋势对电力系统振荡的影响, 并从广义角度对电力系统宽频振荡进行定义。其次, 与传统电力系统的振荡进行对比, 对宽频振荡的形态特征进行总结, 分析了宽频振荡的形成机制。然后, 整理了宽频振荡的数学模型、时空分布特性和抑制措施等方面的研究现状, 指出宽频振荡研究目前存在的问题及面临的挑战。最后, 分别从宽频振荡的建模方法、特征分析、机理研究及抑制措施等4个方面, 提出了电力系统宽频振荡的研究思路和方法。

关键词: 新能源发电; 电力电子设备; 宽频振荡; 时变特性; 广域传播; 稳定性

0 引言

目前我国处于新能源革命的初期阶段, 可再生能源正逐步代替传统化石能源, 未来新能源发电将成为最终能源需求的主要来源^[1]; 同时, 为了实现新能源发电基地向负荷中心灵活高效地输送电能, 长距离高压柔性直流输电网络正逐渐形成, 如张北至北京的柔性直流输电工程^[2-3]; 再者, 随着科学技术的发展和社会产业的升级, 大量具有优良控制能力的直流终端不断接入交流电网^[4-5]。由此可见, 随

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900100); 国家自然科学基金(51537007); 国家电网公司科技项目(SGXJ0000KXJS17 00841)。

National Key R&D Program of China (2016YFB0900100); National Natural Science Foundation of China (51737007); Science and Technology Project of State Grid (SGXJ0000KXJS1700841)。

着大规模新能源发电、高压直流输电、大功率直流负荷的快速发展,电力系统“源-网-荷”各部分电力电子化程度逐年提高,使电力系统逐步向高比例新能源发电和高比例电力电子设备(“双高”)趋势发展。“双高”电力系统是指含高比例新能源发电和高比例电力电子设备,且以交直流混合输电方式向用户供电的有机整体,其框架结构如图 1 所示。

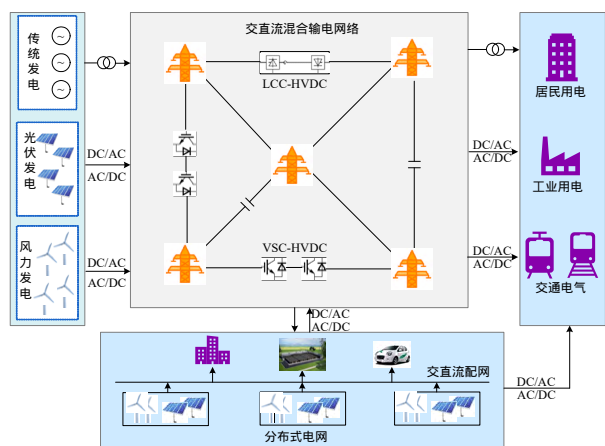


图 1 “双高”电力系统的结构示意图

Fig. 1 Structure of a new generation of power systems

在全球新能源革命驱动下,为了满足能源与经济都实现可持续发展的需求,世界许多国家和地区根据自身情况,针对新能源发电提出了明确的发展目标^[6-9]。如,欧盟能源部提出到 2050 年欧盟计划新能源发电量占总发电量的 80%;美国正大力发展储能型电站,为大规模新能源发电接入提供支撑,预计 2050 年将有 43% 的电来自新能源发电;近年来中国加快促进高比例新能源电网的发展,预计 2050 年新能源发电量占比将达 60% 左右。文献[10]从高比例新能源电力系统的基本特征出发,围绕新能源多时空强不确定性和电力系统电力电子化两大科学问题,阐述了我国高比例新能源电力系统的研究框架结构,指出风力发电和太阳能发电将成为未来电网的支柱性电源。电力电子设备在新能源发电中广泛应用,虽提高了新能源发电效率及其并网能力,但同时也影响了电网振荡的动态行为^[11]。文献[12]介绍了风电机组并网引发的振荡事件,总结了由大规模电力电子设备接入引起的振荡稳定性问题。相关文献研究表明:新能源经电力电子换流器并网不仅会引起电力系统的低频振荡问题^[13],而且会诱发电力系统次/超同步振荡^[14]。

高压直流输电工程实现了长距离、大容量、跨区域输电。文献[15]对我国电网的输电方式进行分析总结,指出电力电子化是未来输电线路的基本形

态,交直流混合互联是未来电网的基本框架结构。近年来,随着大功率电力电子技术的发展,基于电压源型换流器的柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)广泛应用于新能源并网及远距离输电,如厦门、舟山、南澳等多端直流输电工程^[16-18]。VSC-HVDC 技术采用大量可控性电力电子元件使其能够在四象限内灵活运行,为输电线路传输功率的控制提供了方便^[19-20]。但输电网络的电力电子化给电力系统的输电方式和电网结构都将带来重大变化,发电侧、负荷侧及输电网络之间的耦合形式也更加多样化。不仅发电侧、负荷侧的电力设备之间会相互耦合产生振荡,而且输电网络中的电力电子设备也会参与振荡,从而使电力系统振荡更加复杂。文献[21]指出 VSC-HVDC 系统中的电力电子设备会激发 2~15Hz 范围内的控制模式振荡,而且相关控制设备及通信系统则会诱发更高频率的振荡模式。

在配网侧,大量以直流驱动的轨道交通、电动汽车、超级计算机及电力电子变压器等电力电子设备接入电网;同时,随着新能源发电技术的发展及国家政策的引导,分布式电源(如风电、光伏等)及储能装置,经电力电子变换器接入交流或直流配电网^[22-23],使电力系统配网侧也表现出电力电子化特征。配网中负荷的电力电子化使电力系统振荡问题突出且振荡频率范围变化大,如电力电子滤波器引起的高频谐振。配网侧的振荡与输电网络之间相互作用,会使振荡能量进一步传播至主网,诱发输电网络或发电设备的产生振荡,导致电力系统动态行为复杂多变。例如,近年来我国高速铁路快速发展,含大量电力电子设备的高速列车作为可移动时变负荷与输电网络交互作用,引起电力系统低频及高次谐波振荡等^[24]。

“双高”电力系统中,发电设备、输电网络、电力负荷等之间相互作用,会引起几 Hz 到数千 Hz 频率范围内的失稳性振荡。本文将“双高”电力系统因受自身或外部因素的影响,电力电子设备之间及其与电网之间相互作用引起的电气量(如,电压、电流、功率等)随时间作周期性波动,且振荡频率在较宽范围内变化的动态过程称为电力系统宽频振荡。电力系统宽频振荡问题严重影响设备安全和用电质量、制约新能源的高效消纳、威胁电网的安全稳定,已引起了学术界和工业界的广泛关注。但目前人们对宽频振荡问题尚未形成统一认识,还不能

准确地揭示其物理机制，无法采取有效的抑制措施。为了保障“双高”电力系统的稳定运行，本文以“双高”电力系统中的宽频振荡问题为出发点，结合近年来电力系统中发生的典型动态振荡事件，分析宽频振荡的形态特征和形成机制；论述宽频振荡建模分析、机理探索及抑制措施的研究现状；探讨宽频振荡研究面临的主要问题和挑战，并给出相应的研究思路和方法。

1 宽频振荡的形态特征及形成机制

1.1 宽频振荡事件

为了向用户提供高质量的电能，电力系统在运行过程中应时刻保持动态平衡。但当系统发生扰动时，“源-网-荷”间的动态平衡被破坏，能量按电力设备的动态特性重新分配，在分配过程中会诱发电网的动态振荡，直到系统恢复平衡或者失去稳定^[25]。电力系统是一个机械能、电能、磁能相互转换的复杂系统，其振荡过程主要分为机电振荡和电磁振荡。目前并网变流器的应用及交直流混合输电的运行在一定程度上弱化了电网之间的交流耦合，使同步发电机组之间的机电振荡减弱，而电力电子设备引起的电磁振荡问题逐渐凸显。近年来，世界各国出现了与新能源发电和电力电子设备相关的宽频振荡事件^[26-29]。本文给出几起典型振荡事件，如表 1 所示。

表 1 电力系统宽频振荡事件

Tab. 1 Events of wide-band oscillation in power systems

序号	事件描述	振荡频率/Hz
1	沽源地区风电机组与串补装置相互作用	3~10
2	Buffalo Ridge 地区风电场与串补装置相互作用	9~13
3	溪洛渡送广东直流输电工程	13.48
4	美国德州电网双馈风电机组与串补装置相互作用	20
5	新疆哈密地区直驱风电机组	20~40
6	广东南澳风电场经柔直并网工程	30
7	德国北海海上风电经柔直并网工程	250~350
8	云南鲁西柔直输电工程	1.27k
9	渝鄂联网工程	700/1.8k
10	法国-西班牙柔直联网工程	1.4k

“双高”电力系统与传统电力系统的主要区别在于发电侧、输电网及配网侧的电力电子化，宽频振荡问题的本质在于三者之间动态行为的相互作用。与传统电力系统的振荡问题相比，“双高”电力系统的宽频振荡问题在参与对象、振荡形式及影响范围等 3 个方面都有明显变化，主要表现在：

1) 参与对象：对于传统电力系统而言，振荡的主要参与对象是同步发电机组，如励磁控制系统

振荡、原动机调速系统振荡、火电机组轴系扭振等。而“双高”电力系统的宽频振荡是由电力电子设备及其控制系统、传统电气设备及输电网共同决定。如，风电机组的电力电子变流器与输电线路的串联补偿装置之间相互作用会引起新型次同步振荡，即次同步控制相互作用(subsynchronous control interaction, SSCI)。

2) 振荡形式：传统电力系统的振荡形式主要有励磁装置及控制系统引起的低频振荡(0.1~2.5Hz)、水轮机组调速器参数设置不合理引起的超低频振荡(低于 0.01Hz)及汽轮机组转子轴系与线路串联补偿装置耦合引起的次同步振荡等。而“双高”电力系统的振荡通常是由电力电子设备及其控制系统引起，其振荡形式往往始于小信号负阻尼失稳，然后在较宽频率范围(几 Hz 到数 kHz)内发散性持续振荡。

3) 影响范围：电力系统中谐振电路引起的传统电磁振荡往往是单一振荡模态的局部振荡；而“双高”电力系统的宽频振荡涉及多区域的多机组和多电气设备，而且振荡频率会随电力电子设备拓扑结构的变化而变化，表现出多模态特征。对于振荡频率较低的模态，其振荡能量大，影响范围较广^[30]。主要是由于单一模式的振荡与电力电子设备相互作用可能会激发出新振荡模式，导致振荡能量能在电网中大范围传播，使振荡由局部向全局方向发展，从而宽频振荡表现出时空分布特性。

由此可见，宽频振荡涉及多区域、多电气设备，主要是由于负阻尼引起的发散性振荡，而且不再是单一模式的局部振荡而是多模态全局复杂问题，已成为影响电气设备及电力系统安全稳定运行的重要问题。

1.2 基本形态特性

1.2.1 宽频时变特性

电力电子设备在拓扑结构、控制方式、动态响应等多方面与传统电气设备相比具有显著的差异。电力电子设备的拓扑结构在不同控制方式下会相互切换，而且电力电子元件的开断受占空比控制。因此，电力电子设备之间及其与电网之间相互作用时，由于受电力电子装置拓扑结构及参数的影响，振荡频率会在较大范围内漂移，使宽频振荡表现出显著的时变特性。

电力系统振荡是电气设备之间相互作用的结果。电力电子设备之间相互作用、电力电子设备与电网之间相互作用引起的电力系统振荡主要表现

为次/超同步振荡及高频谐波、间谐波振荡的形式。如, SSCI 导致的次/超同步振荡, 直驱风电机组与无串补输电网络作用引起的次/超同步振荡以及并网变换器、锁相环参数设置不合理造成的高频谐振等; 直驱风机与 VSC-HVDC 作用引起的次/超同步振荡, 风机控制参数与无功补偿装置作用引起的次/超同步振荡, 并网变流器之间相互作用引起的高频振荡等。从上述分析及表 1 中的有关振荡事件可以看出, 新能源接入系统中电力电子设备引起的电力系统振荡具有显著的宽频特征。

1.2.2 时空分布特性

2015 年 7 月 1 日, 我国新疆哈密地区风电场发生次同步振荡, 导致 300 多公里外火电机组的转轴扭振保护动作, 引起火电机组停运。这是国内外首次报道的由于次同振荡分量在多级电网中传播而引起的电网功率振荡事件^[31]。哈密地区电网结构示意图如图 2 所示。

通过分析次同步振荡发生时相量测量装置 (phasor measurement unit, PMU) 的录波数据, 可以发现振荡频率分量中 20Hz/80Hz、30Hz/70Hz 所对应的幅值较大, 甚至大于基波分量幅值。当振荡频率分量到达花园、南湖电厂机组时, 引起火电机组扭振保护装置 (torsional stress relay, TSR) 动作, 造成花园电厂 3 台 660MW 机组跳闸, 最终使西北电网频率由 50.05Hz 降低至 49.91Hz^[32]。结合哈密地区电网拓扑结构分析, 可以得出此次振荡传播的路径大致为: 麻黄沟西风电场、麻黄沟东风电场→山北站(220kV)→哈山线(220kV)→哈天线(750kV)→

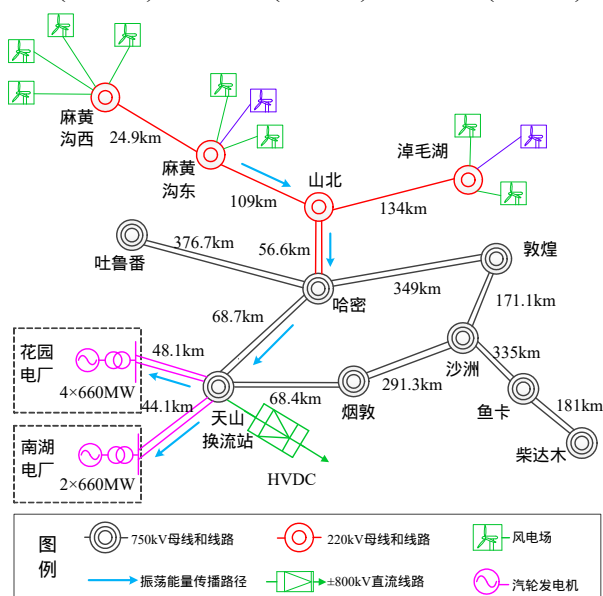


图 2 哈密地区电网结构示意图

Fig. 2 A power grid structure of Hami region

花园电厂及南湖电厂。分析结果进一步佐证了宽频振荡能量在电网中具有广域传播特性。

1.3 宽频振荡的形成机制

“双高”电力系统中大量异构化电力电子设备引起的宽频振荡问题, 是涉及多类型设备、多时间尺度相互作用的复杂系统问题。为解决大规模新能源风电外送问题, 一般需经高压交流线路或柔性直流线路输送至负荷中心。而高压交流或直流输电线路加强了各区域电网之间的相互联系, 实现了区域间的能源互补, 但电力系统振荡能量也会经联络线在各区域电网之间传播, 使振荡影响范围也随之扩大^[33-34]。电力系统电力电子化是引起宽频振荡的主要因素, 而电力系统互联为振荡能量在电网中广域传播提供了必要条件。

电力电子化电力系统的多尺度动态过程主要是由电力电子设备与同步发电机之间、电力电子设备之间、电力电子设备与电网之间相互作用的结果。其中, 电力电子设备与同步发电机组之间相互作用引起的低频振荡问题, 不属于宽频振荡的讨论范畴。宽频振荡主要有: 1) 电力电子设备与同步发电机之间相互作用引起的振荡, 主要表现为同步发电机的旋转轴系扭振, 如 VSC-HVDC 与同步发电机作用引起的次同步振荡; 2) 电力电子设备与输电网络的相互作用引起的振荡, 主要表现为电气振荡和机网耦合振荡, 如电力电子变流器控制与串补电网作用引起的 SSCI、电力电子并网换流器的锁相环与输电网络作用引起的高频谐振等; 3) 电力电子设备之间相互作用引起的振荡, 主要也表现为电气振荡和机网耦合振荡, 如直驱风机与 VSC-HVDC 相互作用引起的次同步振荡、VSC-HVDC 输出系统引起的高频谐振等。

新能源发电、柔性交直流输电及电力负荷都依靠控制灵活的电力电子设备, 而电力电子设备及其控制系统、锁相环等与交直流电网中的电抗(L)和电容(C)相互作用, 会使电力电子设备与系统之间进行多个非基频下的能量交换, 从而引起振荡频率高于低频振荡的宽频振荡^[35-37]。同时, 高比例新能源发电系统接入后, 电网中存在大量电力电子开关控制的功率转换系统, 为了提高能量转换效率开关频率逐步提高, 会引起振荡频率大约在 2~9kHz 之间的高次谐波^[38]。电力系统中各设备之间时间尺度相差较大, 振荡发生后会引发各电力设备在不同的时间尺度内振荡, 而且不同振荡频率分量之间相互作用可能会激发新的振荡形态, 导致多种形态的振荡在

电网中共存。

电力系统动态振荡是扰动能量在电气设备之间相互交换的具体表现形式。电力系统发生振荡时,各电气设备的平衡状态发生变化,电网中的有功功率和无功功率随着节点电压相位、幅值的变化在设备之间相互交换。对于大规模互联系统,振荡能量在不同设备之间的交换不能瞬间完成,而是按照一定的时间差在不同设备之间相互传递(空间特性);异构化电力电子设备与交直流输电网络之间的相互作用,电力电子设备的不同拓扑结构和控制方式可能会随着运行条件的变化而相互切换,使振荡频率在较宽范围内漂移(时间特性)。上述因素导致宽频振荡表现出时空分布特性。电力系统本身是具有强非线性的复杂系统,而电力电子设备的应用进一步增强了系统的非线性。含多电力电子设备的大规模互联电网的宽频振荡不再是各子系统简单相互叠加,而是不同时间尺度问题相互作用、相互耦合的结果。

2 宽频振荡的研究现状

目前国内外学者从不同的角度对“双高”电力系统的振荡问题开展了大量研究工作。此前研究主要是涉及汽轮机组和风电机组的次同步振荡,关注的振荡频率在数 Hz 到 2 倍工频之间,频率相对较低且范围较窄。在高比例新能源和多样化电力电子设备(特别是网侧大型变流设备,如柔性交/直流输电装备)广泛接入背景下,频率范围更宽(数 Hz 至数 kHz)的振荡问题应该是未来研究关注的重点。本文主要从宽频振荡的建模分析方法、广域传播特性和抑制措施等 3 个方面对目前的研究现状进行阐述。

2.1 建模分析方法

目前宽频振荡的研究策略主要是针对特定问题的分析,分析方法主要是采用解析计算法和数值仿真法。其中,解析计算法可以准确反映振荡特性与影响因素之间的数学关系,从而可以较好的认识电力振荡的内在机理,但电力系统的强非线性和高维度性,使解析方法不能分析振荡的宏观动态行为;数值仿真方法虽然可以通过求解电力元件的数学模型来反映系统的整体动态变化过程,但求解得到的数值解会掩盖振荡的内在机理,无法揭示振荡的物理机制。

1) 解析法。

解析法主要有复转矩系数法、状态空间法和阻抗分析法等^[39-40]。复转矩系数法具有清晰的物理意

义,但该方法在高比例电力电子系统中的应用尚待于进一步研究;状态空间法通过计算电力系统的特征值和阻尼比来分析振荡的动态行为,该方法对系统结构和参数的依赖性大;阻抗分析法对变流器和电网两者之间进行解耦,可分别建立各元器件的阻抗模型,当系统结构发生变换时只需对变化部分进行重新建模,大大减少了计算时间^[41-42]。解析法主要用于单机系统或小系统的振荡机理分析,难于分析大规模新能源并网系统的振荡问题。

现有解析方法多用于单一情景的分析,缺乏针对多电力电子设备、多时间尺度的统一分析与建模方法的研究,无法从宏观上掌握和揭示系统振荡的物理本质。文献[43]分析了双高电力系统中的新型振荡与传统振荡在物理特性和数学表达上的异同,并借助经典文氏桥正弦波发生器电路解释新型振荡问题的发生机理和分析方法,是对电力系统振荡问题统一性的初步探索。为了解决单一情景分析方法的局限性,文献[44]提出了一种改进的阻抗网络模型,即根据电网拓扑结构将各电力设备(如风机、输电网络等)的阻抗模型相互连接构建整个电网的阻抗网络模型,该模型可以方便地分析网络结构、风机空间分布、风机渗透率以及风速对次同步谐振的影响;文献[45]提出了一种用于分析含高比例新能源电力系统电磁振荡的频域分析方法,该模型能够反映出电网的拓扑结构,且根据模型的特征向量可以计算出电力模型系统所有振荡模式的相关信息,为认识宽频振荡的振荡源、振荡路径等提供了思路。文献[46-47]针对新能源发电并网引起的 SSCI 问题,建立了基于同步坐标系的系统阻抗模型,并提出了稳定性量化分析方法。文献[48]将开环模式谐振理论从分析风电接入引起的电力系统低频振荡拓展应用于分析宽频振荡问题,构建了风电接入引起宽频振荡失稳的判据,并验证了开环模式谐振理论在分析电力系统宽频振荡的适用性。上述分析方法在一定程度上避免了“维数灾”的问题,但如何应对振荡频率之间的相互耦合需要进一步的深入研究。

2) 数值分析法。

数值分析方法主要是采用机电暂态和电磁暂态计算程序对电力系统的数学模型进行求解,但两者关注的物理过程和时间尺度不同^[49]。电力电子元件具有动作速度快、频率高的特点,需要更精细化的仿真才能反映出其动态响应过程,为了实现对大网的仿真,可采用电磁-机电混合仿真来提高仿真

速度。随着计算技术及通信技术的发展,目前国内外开发了适用于研究大规模交直流混合运行的实时仿真平台,可以将实际物理装置接入仿真系统,实现电力系统数模混合仿真^[50-51]。但电力电子设备的时间尺度多、模型维数高且拓扑结构具有时变性,需要兼顾数值稳定性、模型精度及仿真效率的仿真方法。而数模混合仿真仅能反映电力系统的次暂态过程,因此需要进一步研究更加高效的仿真方法,以对“双高”电力系统中电力设备的动态过程进行全面物理测试和特性分析^[52]。

国内外学者针对“双高”电力系统动态振荡问题的数值仿真做了大量富有成效的工作。由于电力电子设备的动态过程时间尺度跨度大,需要基于详细元件模型的电磁暂态仿真来研究宽频振荡问题,但为兼顾仿真速度和仿真精度的问题,通常可采用结合机电-电磁暂态的计算程序,对含大量电力电子设备的电力系统进行仿真分析^[53]。文献[54]借助超级并行计算机和电磁暂态实时仿真软件 HYPERSIM,建立一套适用于研究大规模交直流混合运行电网的数模混合仿真平台。但目前的仿真方法在高稳定性、高精度及高效率方面具有一定的欠缺。“双高”电力系统空间跨度大、时间尺度多,可利用空间可分性,将电力系统按照时间尺度和耦合程度在空间上分解为多个子系统,优化子系统的建模与仿真步长,建立并行协调的数值求解方法^[55-56]。

2.2 传播特性分析

电力系统振荡是扰动能量在电网中传播的具体体现。关于能量传播引起电网振荡的研究,目前主要集中于电力系统机电暂态范畴。扰动能量在大规模互联电网中传递引起发电机转子变化具有时空特性,文献[57]借助连续体建模的思想建立了机电扰动传播的数学模型,并定义了机电波的概念用于描述扰动能量的变化过程。为了揭示机电波在电网中传播的物理机制,文献[58-59]对机电波传播过程中的反射/透射现象进行分析,从能量传播角度揭示了电力系统振荡问题的本质是不同频率的波在传播过程中相互叠加的结果。文献[60]指出在不同边界条件下能量传播表现出来的特征具有显著差异,扰动能量在传递过程中的物理现象在很大程度上受振荡频率的影响。机电扰动传播理论和分析方法是否适用于宽频振荡尚待进一步的探索。

目前有文献对次同步振荡能量在电网中传播进行研究,但仅限于汽轮发电机组与串联补偿装置之间相互作用引起的次同步振荡能量的局部传播。

造成振荡能量局部振荡的原因主要是:汽轮发电机与串补线路构成谐振电路使振荡能量被约束于串联补偿线路附近,无法在电网中大范围地传播^[61]。电力电子变流器快速响应引发的次同步振荡机理与火电机组机械轴系的传统次同步振荡问题存在一定差异。由电力电子设备引起的部分振荡不属于谐振型振荡,振荡能量不受限于谐振电路而具有在电网中大范围的传播地条件。

目前关于振荡频率分量在高比例电力电子电力系统中传播的形态特性、影响因素、内在机理都尚未开展相关的研究。文献[62]基于广域量测信息,借助自适应辨识的方法对次同步振荡传播路径进行定位分析,为宽频振荡广域传播问题提供了一定的思路。但针对次/超同步振荡监测大多是基于传统 PMU,而传统 PMU 采集的是电气量的基波相量,其中次/超同步振荡、谐波及间谐波分量均被过滤,因此传统的以工频相量为目标的 PMU 量测方法并不适用于宽频振荡的测量^[63-64]。宽频振荡能量在电网中传播,不仅会诱发次/超同步振荡及高次谐波振荡等,而且可能会引起系统功率波动,造成电网连锁事故的发生。但目前宽频振荡能量的传播机理尚不明确,因此“双高”电力系统振荡的广域传播特性和宏观动态行为需要进一步的探索。

2.3 振荡抑制措施

对宽频振荡抑制方面,目前主要是从电源侧和电网侧两个角度来设计控制器方案^[65]。其中,电源侧的抑制措施包括新能源发电机组控制器参数优化和变流器控制回路附加阻尼控制器。但通过优化发电机组控制器参数的措施,并不适用于所有的运行工况,且只针对特定运行条件才有明显的抑制效果。电网侧抑制措施主要是通过串并联柔性输电装置(flexible AC transmission systems, FACTS)向振荡机组注入反向电流,如在风电场出口并联静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、在线路中接入可控串联补偿装置(thyristor controlled series compensation, TCSC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)等,从而达到阻尼振荡的目的。对于宽频振荡问题,其振荡频率的频带范围较宽而且有时变特性,因此,新型振荡控制器的设计需要适应运行工况的变化。文献[66]提出了一种基于线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)的 SSCI 阻尼控制器,仿真实验表明该控制器能够适应不同的运行工况,具有一定的鲁棒性。文献[67]针对双馈风电机组经串补送出引起

的 SSR 问题,提出了一种鲁棒阻尼控制器(robust subsynchronous damping controller, RSDC),该控制器通过次同步阻尼计算单元(supplementary subsynchronous damping controller, SSDC)调节谐波电压源变换器(subharmonic voltage source converter, SVSC)实现,通过对 RSDC 时间常数和增益进行鲁棒优化,使其能够适应不同的运行工况,在一定程度上提高了电力系统的稳定性。文献[68]针对双馈风电机组引起的宽频带次同步振荡,设计了一款基于 VSC(Voltage Source Converter)的宽频带次同步振荡抑制装置,该装置能够在不同运行工况下准确地获取次同步振荡模态,改变控制参数提高系统阻尼,实现宽频带次同步振荡的有效抑制。

3 面临的挑战

电力系统的传统振荡问题,在机理研究、特征分析、振荡抑制等方面都有比较成熟的理论和方法。但在“双高”电力系统中,电力电子设备引起的宽频振荡表现出新现象、新特征,如形态多样化、宽频特征、时变特性及广域传播特征等。因此,如何研究和分析宽频振荡将面临诸多新的挑战。

3.1 宽频振荡的量化分析

研究宽频振荡问题的前提是建立电力元件(如风电机组、电力电子变换器及控制系统等)的精确化模型,然而多样化电力电子设备具有较强的非线性,其动态特性随频率变化表现出很大差异,实际情况下也难以准确获取电力电子设备的结构和参数;对于含大规模风力、光伏发电并网的电力系统,由于含有大量多时间尺度电力电子设备,因此在电磁暂态时间尺度下建立系统的等值建模较为困难。在分析方法方面,传统数值分析法、特征值分析法及阻抗分析法的结果不能有效地反映强非线性电力系统振荡的动态特性,基于不同的分析方法研究宽频振荡问题可能会得出不同的结论,导致电力电子设备参与宽频振荡的机理不明确。如何建立满足宽频振荡分析的电力系统模型,提出宽频振荡分析的统一量化指标体系,揭示宽频振荡的形成机制,是宽频振荡研究面临的挑战之一。

3.2 宽频振荡的广域传播机制

电力系统的电力电子化程度不断加深,导致宽频振荡不再是局部单一振荡问题,而是全局复杂振荡问题。但目前针对宽频振荡全局性问题的研究尚缺少相关理论支撑,尤其是在振荡能量的传播机制方面,由于电力电子设备的强非线性,使宽频振荡

具有频率时变及多源特征,使能量传播过程十分复杂;通过传统的数值仿真方法可以得到宽频振荡在大规模电网中表现出的时空分布特征,但无法揭示宽频振荡的时空演变规律及内在机理;电力系统的运行状态及电力电子设备拓扑结构的时变特性,导致振荡能量的传播路径错综复杂,且影响振荡能量传播的因素众多,最终导致宽频振荡源及能量传播路径难以确定。因此,建立“双高”电力系统宽频振荡的分析方法,揭示宽频振荡能量的大范围传播与时空分布特征的内在关系,实现振荡源定位及传播路径跟踪也是宽频振荡研究面临的挑战之一。

3.3 宽频振荡的应对措施

目前宽频振荡的抑制措施主要是针对单台机组、单一振荡模式提出的,而由上述分析可知宽频振荡是涉及多机组的多模态振荡问题;而且在控制器设计上通常采用传统电力系统的线性化理论,然而电力电子设备运行状态具有不确定性,电力电子设备可能处于线性或非线性占主导的不同阶段;电力系统运行状态随“源-网-荷”运行方式的变化而变化,且受扰动强弱影响较大。因此,传统的振荡抑制方法缺乏鲁棒性,无法适应宽频振荡的时变、多模态特征。宽频振荡抑制装置需要实时采集振荡相量作为输入信号,但现有针对基频(50Hz/60Hz)设计的监测方法难以甄别宽频振荡相量,需要提出适用于宽频相量监测的数学方法。宽频振荡具有广域传播特征,如何针对该特征设计广域协同控制器目前也缺少相关的理论研究和方法。因此,针对宽频振荡提出合理的控制方法和抑制措施,也是宽频振荡研究面临的重大挑战。

4 研究思路

针对“双高”电力系统宽频振荡研究面临的挑战,全面认识电力电子设备的多尺度非线性特征、设备之间相互耦合的形态及其演变规律是研究宽频振荡问题的前提和基础。首先建立能够描述从数 Hz 至数 kHz 广谱范围内多样化异构设备、复杂电网及其耦合整体的动态特性的统一模型;其次分析多时间尺度相互作用下宽频带振荡的发生条件和非线性演化特征;然后研究各种运行方式和扰动场景下高效协调“源-网-荷”动态行为以抑制宽频带振荡的方法,是研究“双高”电力系统宽频振荡的基本思路。从物理学角度,直接建立“双高”电力系统的解析模型,可以“完全透彻”地分析宽频振荡的内在规律,但是考虑到电力系统运行机理与

结构的复杂性,构建宽频振荡的广域监测系统是解决如何在系统模型不明确的情况下认识“双高”电力系统宽频振荡的本质特性的必要手段。

研究宽频振荡问题,需要以系统方法论为指导,综合物理机理、数学方法和仿真计算,从以下几个方面做进一步的研究:

1) 在宽频振荡特征认知方面,分析电力电子设备在电力系统中的动态行为特性,对比并揭示电力系统基本元件、构造方式、内外部条件的重大变化,提炼对电力系统振荡产生重大影响的关键性因素,概括并预判电力系统宽频振荡正在发生或即将发生的根本性变化,探究“双高”电力系统振荡出现的新现象、新特征的基本机理,提出“双高”电力系统宽频振荡分析的新理论和新方法,构建规范性的研究框架揭示宽频振荡的形成机制。

2) 在宽频振荡建模和机理分析方面,通过数值分析方法分析“双高”电力系统的机电-电磁暂态过程;根据数值分析结果,分析宽频振荡的影响因素,总结“双高”电力系统宽频振荡在多时空维度下的演变规律;提出适用于宽频振荡分析的解析方法,求解简单系统宽频振荡的解析表达式,量化分析“双高”电力系统宽频振荡;探究宽频振荡的物理机制,建立宽频振荡稳定性的标准判据;提出能够实时监测宽频振荡相量的方法,基于实测数据探索宽频振荡的内在物理机制。

3) 在宽频振荡的能量传播规律分析方面,从电气学科的基本理论出发,恰当引入电气学科以外的概念和方法,深入研究扰动能量在电力电子化电力化电力系统中的消纳和转换过程,从新的角度来诠释宽频振荡的物理机理;通过电力系统振荡过程中的物理现象分析振荡传播过程中的影响因素并揭示其物理内涵和数学本质;提出宽频振荡源的定位及传播路径的跟踪方法。

4) 在宽频振荡抑制方面,根据宽频振荡机制分析引起振荡的内在因素,从源、网两侧出发,提出适用于多运行工况、频率和幅值时变特性及多模态特征的抑制策略;提高宽频振荡相量的监测精度,基于宽频振荡广域监测系统构建全网协同控制策略,形成多级防御体系,实现抑制宽频振荡的目标。

5 结论

高比例新能源和高比例电力电子设备(“双高”)是电网发展的必然趋势,而电力电子设备、输电网络及传统电气设备之间耦合形式的多样性使电力系

统振荡问题表现为宽频时变特征。为了对宽频带振荡这一新问题具有更好的认识,本文对宽频振荡的形成机制进行分析,基于国内外研究现状,从宽频振荡的量化分析、广域传播机制及抑制措施等方面阐述了宽频振荡研究面临的主要问题和挑战,并在宽频振荡的建模方法、机理研究、传播特征分析及抑制措施方面提出了相应解决思路和方法。本文结合宽频振荡在“双高”电力系统中的特征,对宽频振荡进行了初步定义,但本文是从广义的角度对电力系统中电力电子设备引起的新型振荡现象的描述,其内涵和外延需要广大学者深入探索和挖掘。

宽频振荡的形成机制及演变规律的研究对保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。但目前“双高”电力系统宽频振荡问题的研究尚缺乏有效的数学模型和分析方法,而且从单一学科的角度无法全面地诠释振荡的物理本质。但从其它物理学问题的角度出发,引入新的分析方法和研究手段,并借助其它学科的概念和方法探索宽频振荡的形成机制及演变规律,也许对解决宽频振荡问题能够带来新的思路和方法。

参考文献

- [1] 白建华,辛颂旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14): 3699-3705.
Bai Jianhua, Xin Songxu, Liu Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705(in Chinese).
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [3] 李鹏,谷琛,陈东,等. $\pm 1500\text{kV}$ 特高压直流输电技术前期研究[J].高电压技术,2017,43(10): 3137-3148.
Li Peng, Gu Chen, Chen Dong, et al. Development of technologies in $\pm 1500\text{kV}$ UHV DC transmission research[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3137-3148(in Chinese).
- [4] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Wu Weimin. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [5] Teodorescu R, Liserre M, Rodriguez P. Grid converters

- for photovoltaic and wind power systems[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2016.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The strategy of energy production and consumption revolution(2016—2030)[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2016(in Chinese).
- [7] Hammons T J. Integrating renewable energy sources into European grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(8): 462-475.
- [8] Yildirim E, Saraç Ş, Aslan A. Energy consumption and economic growth in the USA: Evidence from renewable energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6770-6774.
- [9] U.S. Energy Information Administration. Annual energy review 2011[R]. Washington, DC: Energy Information Administration, 2011.
- [10] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-11.
- Kang Chongqing, Yao Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11(in Chinese).
- [11] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
- Cheng Haozhong, Li Jun, Wu Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27(in Chinese).
- [12] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
- Li Mingjie, Yu Zhao, Xu Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042(in Chinese).
- [13] Hu Jiabing, Wang Bo, Wang Weisheng, et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 720-730.
- [14] Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [15] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
- Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771(in Chinese).
- [16] 凌卫家, 孙维真, 张静, 等. 舟山多端柔性直流输电示范工程典型运行方式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1753-1760.
- Ling Weijia, Sun Weizhen, Zhang Jing, et al. Analysis of typical operating modes of zhoushan multi-terminal VSC-HVDC pilot project[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1753-1760(in Chinese).
- [17] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
- Li Fuzhong, Zhou Min, He Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan ' ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 58-62(in Chinese).
- [18] 郑超, 张鑫, 吕盼, 等. VSC-HVDC 与弱交流电网混联系统大扰动行为机理及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 629-641.
- Zheng Chao, Zhang Xin, Lü Pan, et al. Study on the large disturbance behavior mechanism and stability control strategy for VSC-HVDC and weak AC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 629-641(in Chinese).
- [19] Pinares G, Bongiorno M. Modeling and analysis of VSC-based HVDC systems for DC network stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 848-856.
- [20] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [21] 刘子全. 发输电设备控制系统对电网振荡特性的影响分析及监测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- Liu Ziquan. Analysis and monitoring of the influence of generation and transmission equipment's control systems on power system oscillations[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017(in Chinese).
- [22] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3947-3962.
- Zhu Shu, Liu Kaipei, Qin Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3947-3962.

- 37(14): 3947-3962(in Chinese) .
- [23] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767 .
- Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Cai Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767(in Chinese) .
- [24] 母秀清, 王英, 陈思彤, 等. 基于改进 sum-范数判据的高速铁路车网电气耦合系统稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3253-3264 .
- Mu Xiuqing, Wang Ying, Chen Sitong, et al. Stability research on high-speed railway vehicle network electric coupling system based on improved sum-norm criterion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3253-3264(in Chinese) .
- [25] Kundur P, Balu N J, Lauby M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994 .
- [26] Adams J, Carter C, Huang S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation[C]//Proceedings of 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Orlando, FL: IEEE, 2012: 1-5 .
- [27] Xie Xiaorong, Zhang Xu, Liu Huakun, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126 .
- [28] Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720 .
- [29] Buchhagen C, Rauscher C, Menze A, et al. BorWin1-first experiences with harmonic interactions in converter dominated grids[C]//Proceedings of International ETG Congress 2015, Die Energiewende-Blueprints for the New Energy Age. Bonn, Germany: VDE, 2015: 1-7 .
- [30] 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 .
- Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. 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(in Chinese) .
- [31] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97 .
- Xiao Xiangning, Luo Chao, Liao Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97(in Chinese) .
- [32] Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive pmsg based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720 .
- [33] 张彦涛, 张志强, 张玉红, 等. 应用特高压直流输电技术实现亚欧洲际输电方案的设想[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2069-2075 .
- Zhang Yantao, Zhang Zhiqiang, Zhang Yuhong, et al. Application research on UHVDC technology in asia-europe power transmission planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2069-2075(in Chinese) .
- [34] 田丰. 亚欧洲际输电送端地区能源电力外送意愿研究[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2076-2081 .
- Tian Feng. Study on the energy and electricity export intention of the Asian sending-ends during the Asia-Europe intercontinental transmission[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2076-2081(in Chinese) .
- [35] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372 .
- Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese) .
- [36] Zhao Mingquan, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937 .
- [37] Hu Jiabing, Huang Yunhui, Wang Dong, et al. Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1325-1336 .
- [38] Luszcz J. High frequency harmonics emission of modern power electronic AC-DC converters[C]//2013 International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics. Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2013: 269-274 .
- [39] Zhang Dongliang, Wang Yajing, Hu Jiabing, et al. Impacts of PLL on the DFIG-based WTG's electromechanical response under transient conditions: analysis and modeling[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(2): 30-39 .
- [40] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123 .
- Yin Congqi, Xie Xiaorong, Liu Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC

- transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123(in Chinese).
- [41] 陈新, 王赟程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
- Chen Xin, Wang Yuncheng, Gong Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094(in Chinese).
- [42] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
- Wang Weisheng, Zhang Chong, He Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060(in Chinese).
- [43] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.
- Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828(in Chinese).
- [45] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Gao Xiaodan, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3118-3128.
- [46] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 26-32.
- Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32(in Chinese).
- [47] Zhan Ying, Xie Xiaorong, Liu Huakun, et al. Frequency-domain modal analysis of the oscillatory stability of power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1534-1543.
- [48] 陈骁, 杜文娟, 王海风. 开环模式谐振条件下直驱风机接入引发电力系统宽频振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2625-2635.
- Chen Xiao, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Analysis on wide-range-frequency oscillations of power systems integrated with PMSGs under the condition of open-loop modal resonance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2625-2635(in Chinese).
- [49] 汤涌, 印永华. 电力系统多尺度仿真与试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 184-188.
- Tang Yong, Shu Yinhua. Multi-scale simulation and test technology of power systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 184-188(in Chinese).
- [50] 周俊. 交直流电网数字物理混合仿真技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- Zhou Jun. Study on AC/DC power system digital and physical hybrid simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012(in Chinese).
- [51] 刘云, 蒋卫平, 印永华, 等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 52-56.
- Liu Yun, Jiang Weiping, Yin Yonghua, et al. Modeling of analogue-digital hybrid real-time simulation system applied in the UHV AC/DC great power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 52-56(in Chinese).
- [52] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.
- Xiao Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14(in Chinese).
- [53] 徐得超, 张星, 何飞, 等. 电力系统机电-电磁混合仿真边界解耦算法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1130-1137.
- Xu Dechao, Zhang Xing, He Fei, et al. Research on power system electromechanical-electromagnetic hybrid simulation algorithm based on boundary decoupling[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1130-1137(in Chinese).
- [54] 朱艺颖, 于钊, 李柏青, 等. 大规模交直流电网电磁暂态数模混合仿真平台构建及验证(一)整体构架及大规模交直流电网仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 164-170.
- Zhu Yiyang, Yu Zhao, Li Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AC/DC power grids part one general configuration and simulation validation of large scale AC/DC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 164-170(in Chinese).
- [55] 高毅. 交直流电力系统稳定性仿真的多速率方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- Gao Yi. Research on multi-rate simulation method for AC-DC power system stability analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011(in Chinese).
- [56] 田芳, 周孝信. 交直流电力系统分割并行电磁暂态数字仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 1-7.
- Tian Fang, Zhou Xiaoxin. Partition and parallel method for digital electromagnetic transient simulation of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 1-7.

- 1-7(in Chinese) .
- [57] Thorp J S , Seyler C E , Phadke A G . Electromechanical wave propagation in large electric power systems[J] .IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications , 1998 , 45(6) : 614-622 .
- [58] 王德林, 王晓茹 . 电力系统连续体模型中机电波传播特性研究[J] . 中国电机工程学报, 2007 , 27(16) : 43-48 .
Wang Delin , Wang Xiaoru . Study on characteristics of electromechanical wave propagation in the continuum model for power systems[J] . Proceedings of the CSEE , 2007 , 27(16) : 43-48(in Chinese) .
- [59] Ma Ningning , Wang Delin . Study on dispersion phenomena of electromechanical disturbance propagation in power systems[J] . International Transactions on Electrical Energy Systems , 2016 , 26(12) : 2657-2671 .
- [60] Wang Delin , Ma Ningning , Guo Cheng . Characteristics of electromechanical disturbance propagation in non-uniform power systems[J] . IET Generation , Transmission & Distribution , 2017 , 11(8) : 1919-1925 .
- [61] 陈武晖, 王丹辉, 郭小龙, 等 . 基于次同步振荡局部传播机制的建模边界识别[J] . 中国电机工程学报, 2017 , 37(17) : 4999-5009 .
Chen Wuhui , Wang Danhui , Guo Xiaolong , et al . Identifying modeling boundary using local propagation mechanism of subsynchronous oscillations[J] . Proceedings of the CSEE , 2017 , 37(17) : 4999-5009(in Chinese) .
- [62] 祁鑫, 常富杰, 蒙金有, 等 . 基于广域信息的次同步振荡传播分析研究[J] . 控制工程, 2017 , 24(12) : 2456-2461 .
Qi Xin , Chang Fujie , Meng Jinyou , et al . Research on sub-synchronous oscillation spread analysis based on wide area information[J] . Control Engineering of China , 2017 , 24(12) : 2456-2461(in Chinese) .
- [63] Xie Xiaorong , Zhan Ying , Liu Huakun , et al . Improved synchrophasor measurement to capture sub/super-synchronous dynamics in power systems with renewable generation[J] . IET Renewable Power Generation , 2019 , 13(1) : 49-56 .
- [64] Xie Xiaorong , Zhan Ying , Liu Huakun , et al . Wide-area monitoring and early-warning of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of renewables[J] . International Journal of Electrical Power & Energy Systems , 2019 , 108 : 31-39 .
- [65] Xie Xiaorong , Liu Wei , Liu Hui , et al . A system-wide protection against unstable SSCI in series-compensated wind power systems[J] . IEEE Transactions on Power Delivery , 2018 , 33(6) : 3095-3104 .
- [66] Zhang Xu , Xie Xiaorong , Liu Hui , et al . Robust subsynchronous damping control to stabilize SSR in series-compensated wind power systems[J] . IET Generation , Transmission & Distribution , 2019 , 13(3) : 337-344 .
- [67] Ghafouri M , Karaagac U , Mahseredjian J , et al . SSCI damping controller design for series-compensated DFIG-based wind parks considering implementation challenges [J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(4) : 2644-2653 .
- [68] 廖坤玉, 肖湘宁, 罗超, 等 . 基于 VSC 的双馈风电场群宽频带次同步谐振抑制作用分析与实验[J] . 电力自动化设备, 2019 , 39(10) : 71-79 .
Liao Kunyu , Xiao Xiangning , Luo Chao , et al . Effect analysis and experiment of broadband sub-synchronous resonance suppression of DFIG-based wind farm groups based on VSC[J] . Electric Power Automation Equipment , 2019 , 39(10) : 71-79(in Chinese) .



马宁宁

在线出版日期：2020-04-24。

收稿日期：2019-12-13。

作者简介：

马宁宁(1987), 男, 博士, 研究方向为电力系统宽频振荡分析, 机电扰动传播, 频率稳定性分析, mnsdxt@163.com ;

*通信作者：谢小荣(1975), 男, 教授, 近期研究方向为电力系统振荡的分析与控制, xiexr@tsinghua.edu.cn ;

贺静波(1983), 男, 博士, 研究方向为电力系统调度运行、电力系统稳定性分析 ;

王衡(1984), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定性分析。

(责任编辑 乔宝榆)

Review and Discussion of Wide-band Oscillation in Renewable and Power Electronics Highly Integrated Power Systems

MA Ningning¹, Xie Xiaorong¹, HE Jingbo², WANG Heng³

(1.Tsinghua University; 2. National Power Dispatching and Control Center; 3. State Grid Xinjiang Electric Power Company)

KEY WORDS: renewable energy; power electronics device; wide-band oscillation; time-varying characteristic; wide-area propagation; stability

With the rapid development of renewables, HVDC, and DC loads, power electronic devices are penetrating largely into the power grid. Therefore, the power system appears to be "double high": a high proportion of renewables and a high proportion of power electronic devices. The interaction between generators, transmission networks, and loads may lead to instability oscillation in the frequency range from several Hz to several thousand Hz. In this paper, the dynamic of the "double-high" power system, in which electric signals (such as voltage, current, active/reactive power, etc.) fluctuate within a quite wide frequency band due to the interaction between the electrical equipment as well as between the electrical equipment and the power grid, is called the wide-band oscillation. At present, a unified understanding of the problem is not formed, and the physical mechanism cannot be accurately revealed, then effective suppression measures cannot be taken.

The key to the wide-band oscillation problem lies in the interaction between the dynamic behavior of generation equipment, transmission networks, and the load. It mainly manifested in 1) The oscillation caused by the interaction between power electronic devices and the synchronous generator; 2) The oscillation resulting from the interaction between power electronic devices and transmission network; 3) The oscillation as a result of the interaction between power electronic devices. Several typical wide-band oscillation events in the practical power systems are shown in Table 1.

Compared with traditional power system oscillation, wide-band oscillation has different appearances and features as it is mainly caused by the power electronic device that has nonlinear features. The apparent features including 1) Time-varying feature. Due to the influence of topological structure and parameters of power electronic devices, the oscillation frequency will drift in a broad range; 2) Spatial-temporal

distribution feature; When the power system oscillates, the wide-band oscillation energy can spread in the grid. There will be many new challenges on how to study and analyze the wide-band oscillation caused by power electronic devices, such as challenges on the quantitative analysis, on the analysis of its formation mechanism and evolution law, and the analysis of its countermeasures.

Tab. 1 Events of wide-band oscillation in power systems

NO.	Descriptions	Frequency/Hz
1	interaction between the wind farm and the series compensation device in Guyuan, China	3~10
2	interaction between the wind farm and the series compensation device in Buffalo Ridge	9~13
3	VSC-HVDC project from Xiluodu substation to Guangdong	13.48
4	interaction between the wind farm and the series compensation device in Texas, USA	20
5	interaction between the wind farm and weak AC system in Hami, Xinjiang	20~40
6	wind power connecting to the main grid via VSC-HVDC in Nan'ao of Guangdong	30
7	offshore wind farm in the North Sea of German connecting to the main grid via VSC-HVDC	250~350
8	VSC-HVDC project in Luxi of Yunnan	1.27k
9	interconnection project of power grids between Chongqing and Hubei	700/1.8k
10	VSC-HVDC project from France to Spain	1.4k

At present, there is still a lack of mathematical models and analytical methods aimed at the study of wide-band oscillation in the "double-high" power system. In this paper, some solutions are proposed in terms of the modeling method, feature analysis, mechanism research, and suppression measures of wide-band oscillation. It is not available to comprehensively interpret the physical nature of oscillation only from the perspective of a single subject. But from the perspective of several other physics problems, the introduction of new methods of analysis and research methods, and in accordance with the concepts and methods of other disciplines to explore the formation mechanism and evolution law of wide-band oscillation, new ideas and methods can be brought to understand the wide-band oscillation from a new point of view.