第 49 卷 第 8 期：3148-3162 高电压技术 Vol.49, No.8: 3148-3162
2023 年 8 月 31 日 High Voltage Engineering August 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221565

交直流电网宽频振荡产生、辨识及抑制研究综述

王渝红，王馨瑶，廖建权，王宏宇
（四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：电力电子设备和新能源的大规模接入导致电网结构及动态特性发生显著变化，由电力电子设备与电网交互引发的宽频振荡问题愈发突出。为此，首先阐述了宽频振荡的现象、特征及分析方法，总结了不同分析方法的优点和局限性；其次从宽频振荡的产生机理、辨识及抑制 3 方面对现有研究进行梳理，归纳了影响交直流电网宽频振荡的关键影响因素；在此基础上，分析了新能源经交流或直流送出场景的宽频振荡产生机理；然后，根据振荡数据的来源(子站和主站)阐述了不同模态参数辨识方法，并从适用性角度分析了现有辨识方法的区别和特点；根据抑制装置安装地点的不同(源侧和网侧)总结了宽频振荡抑制措施的研究现状。最后，从设备动态建模与振荡形成机制、宽频振荡在线检测与辨识、自适应容错与抑制等方面进行展望。

关键词：交直流电网；宽频振荡；产生机理；辨识技术；抑制措施；新能源

Review of Generation, Identification and Suppression of Wide-band Oscillation in AC-DC Power System

WANG Yuhong, WANG Xinyao, LIAO Jianquan, WANG Hongyu
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: High proportion of power electronics and renewables facilitates significant changes in the power grid structure and dynamic characteristics. The problem of wide-band oscillation caused by the interaction between power electronics and power grid becomes more and more prominent. First, the phenomenon, characteristics and analysis methods of wide-band oscillation are described in this paper. The advantages and limitations of different analysis methods are summarized. Secondly, the existing research is sorted out from three aspects, namely, generation mechanism, identification, and suppression of broadband oscillation. The key factors affecting the wide-band oscillation of AC-DC power grid are summarized. On this basis, the generation mechanism of wide-band oscillation in the scenario where new energy is sent out through AC-DC power grid is analyzed. Thirdly, according to the source of oscillation data (sub station and master station), different modal parameter identification methods are described. Then the differences and progress of existing identification methods are analyzed from the perspective of applicability. Fourthly, according to the different installation locations of the suppression devices (source side and network side), the research status of wide-band oscillation suppression measures is summarized. Finally, the prospects in dynamic modeling and oscillation formation mechanism of equipment, on-line detection and identification of wide-band oscillation, adaptive fault tolerance and suppression are put forward.

Key words: AC-DC power system; wide-band oscillation; generation mechanism; identification technology; suppression measures; renewables

0　引言

2022 年 1 月国家发改委和国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》，意味着能源体系和发展模式进入非化石能源主导的新阶段[1-3]。一方面，风电、光伏等新能源装机容量将进一步大幅提升，预计到 2025 年可再生能源占能源消费总量的比重将达到 18%左右[1]。另一方面，为实现能源的高效配置，特高压交直流输电技术将持续发挥重要作用。截止 2021 年底，我国已有 33 条特高压输电线路投入使用[2]。可见，含高比例电力电子设备和新能源接入的交直流电网将成为未来我国电网架构的基本形态[3]。

电力电子设备和新能源的大规模接入使得电力系统的运行方式和动态特性都发生了明显变化[4]。以换流器与变流器为代表的电力电子装备将大规模应

基金资助项目：国家重点研发计划(响应驱动的大电网稳定性智能增强分析与控制技术) (2021YFB2400800)。
Project supported by National Key R&D Program of China (Response-Driven Intelligent Enhanced Analysis and Control for Bulk Power System Stability) (2021YFB2400800).

用，电力电子装备的多尺度级联与序贯切换特性造成传统电力系统物理耦合机制发生根本性变化[3,5]。传统电磁装备与电力电子装备及其控制系统存在非线性强耦合，导致电力系统动态行为更加复杂多变[6-7]。系统发生扰动后的模式演变和响应过程具有非线性时变、时空交互耦合特性，使得电力扰动呈现时频耦合、多次叠加等复杂特征，易出现宽频振荡等安全问题[8]。

20 世纪初电力系统的振荡问题是以同步机主导的机电振荡。进入 21 世纪，电力系统振荡问题向以电力电子设备主导的电磁暂态振荡过渡。这类振荡问题由多设备和电网共同参与，频率范围在数赫兹至千赫兹，其根源是新能源机组/交直流变换器及其控制通过复杂电网耦合形成的源/器−网多时间尺度动态相互作用，和传统电网的振荡问题有着本质区别[9]。亟需对其产生机理、辨识技术及抑制措施进行研究。

为实现对宽频振荡从产生、辨识、抑制全过程的分析，并总结归纳各个过程的关联关系，本文首先归纳宽频振荡现象、特征及其分析方法，其次总结不同场景下宽频振荡的产生机理；然后论述宽频振荡的辨识技术及抑制措施的研究现状，进而阐述宽频振荡在产生、辨识及抑制方面现有研究的不足。最后，针对未来研究的重点难点问题进行了展望。

1 交直流混联电网宽频振荡现象及分析方法

1.1 交直流混联电网宽频振荡现象

新能源和电力电子设备的高比例接入导致电力系统的格局正在发生变化，交直流混联电网的“源−网−荷”侧电力电子化程度正逐步提高[3]。新能源发电的弱惯量支撑和出力的波动性及不确定性，变流器和交直流互联的区域耦合，电力电子化负荷的广泛接入都深刻改变了电网的动态行为[6-7]。

在电力系统向电力电子化发展过程中，电力系统出现的新型振荡问题引发广泛关注。本文将电力系统受到扰动后由多类型电力电子设备和电网共同参与引发电气量随时间的周期性波动、振荡频率较宽且具有频率漂移特点的振荡现象认为是宽频振荡[7-8,10]。

近年来，由于电力电子设备引发的宽频振荡事故频发，世界各国均出现了由于新能源和电力电子设备导致的宽频振荡问题，表 1 列举了部分事故[10-12]。

由表 1 可知，目前电力电子设备导致的宽频振荡问题主要集中在次同步频带，伴随有次/超同步交织和高频振荡，电力电子设备引发低频振荡尚未有典型事故报道，超低频振荡事故目前均为水轮机及其调速器引发，不属于新型振荡范畴[5]。交直流电网中存在的各类振荡问题如图 1 所示。

和传统的机电振荡特性不同，以电力电子装备为主体的新型电磁振荡，是可再生能源主导的运行特征。电力电子装备的物理特性与控制性能造成扰动传播呈现控制主导、宽频带动态演变和多样化设备特性耦合新特征[7,11]，并且参与对象不再只有同步发电机，而是由电力电子设备及各个控制器、新能源机组、交直流动态、传输线路及同步发电机共同参与。由于电力电子设备在硬件结构、控制方式、响应特性、交互耦合等方面都与传统设备不同，因此其对电网的动态行为会产生深刻影响[8,12]。

新型振荡问题聚焦于由设备参数设置不合理引发的低频振荡、次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)、装置引发的次同步振荡(sub-synchronous torsional interactions, SSTI)和次同步控制相互作用(sub-synchronous control interac-

表 1 国内外宽频振荡典型事故

Table 1 Events of wide-band oscillation in power systems

序号	事故地点	事故场景	频率范围/Hz
1	美国德克萨斯州	双馈风机集群与串补交互	20
2	河北沽源	双馈风机集群与串补交互	3~10
3	新疆哈密	直驱风机集群与弱交流电网交互	20~80
4	广东南澳	柔直与风场交互	30
5	福建厦门	柔直工程输送功率变化引发振荡	20~30
6	德国北海	风场经柔直送出	250~350
7	鲁西直流	柔直接入弱交流电网	1200
8	胡杨河光伏站	光伏场站并网	50 次谐波

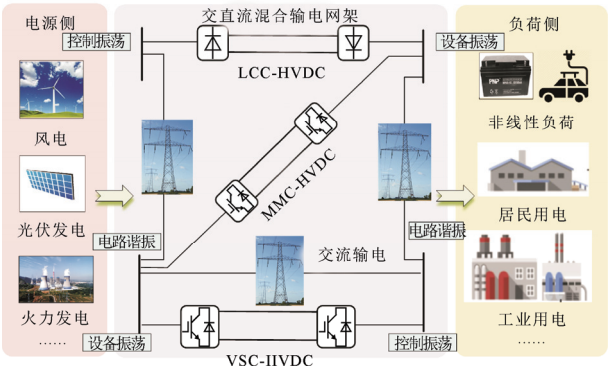


图 1 宽频振荡现象产生场景

Fig.1 Scenario of broadband oscillation phenomenon

tions, SSCI)，以及由电力电子设备引发的高频振荡。可见，新能源高占比交直流混联电网的宽频振荡问题是涉及多类型电力电子设备和多区域的复杂振荡问题，涉及频率间耦合和多模态混叠，会严重影响电网的安全稳定运行。

目前，国内外学者已经对新型宽频振荡现象做了一定研究，但对全过程的分析及不同过程的关联性缺少相应的总结。宽频振荡的产生机理可为辨识技术提供振荡源和振荡特征，同时可为抑制振荡提供理论支撑[13-14]。辨识技术提取的信息可为考虑不确定性和扰动的抑制措施提供特征参数[15-16]，形成完备的振荡抑制体系。此外，对于宽频振荡的抑制技术，现有手段的附加装置和参数调整会对系统振荡机理产生新的影响[17]，进而对振荡辨识产生不可预知的影响。图 2 归纳了宽频振荡的产生、辨识和抑制过程。

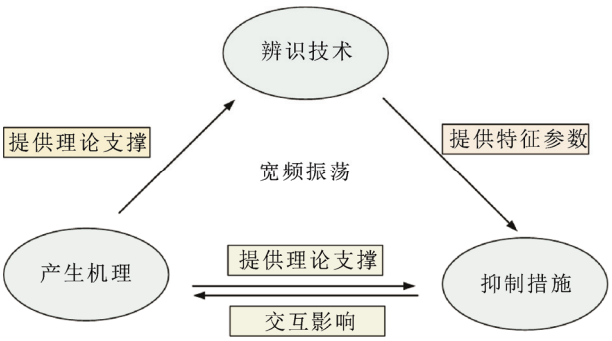


图 2 宽频振荡产生、辨识和抑制过程

Fig.2 Generation, identification, and suppression of wide-band oscillation

1.2 交直流混联电网宽频振荡分析方法

建立被控对象模型的方法一般可分为机理演绎法和试验辨识法[11-12,18-19]，如图 3 所示。机理演绎法根据被控过程的内部机理，运用数学解析方法求取被控过程的数学模型，可以揭示电力系统振荡的产生机制。解析法用数学模型阐述振荡的机理，但存在计算复杂、具有误差等缺点。当电力系统趋向复杂时，单凭机理演绎法难以求出合适的数学模型，难以完全了解内部振荡过程，此时可以借助试验辨识法获得需要的系统信息。本节综述用于揭示机理的不同分析方法，总结如表 2 所示。

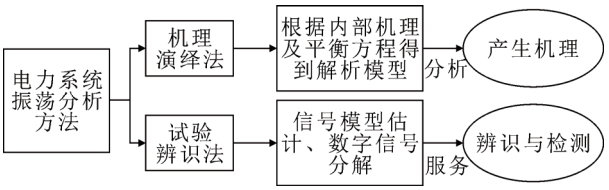


图 3 宽频振荡分析方法

Fig.3 Analysis method of wide-band oscillation

表 2 宽频振荡机理演绎法对比

Table 2 Comparison of deductive methods for wide-band oscillation mechanism

方法名称	方法原理	特点	局限性
模态分析法[20]	特征根、阻尼比判稳	精度高，可分析全局的状态信息。可以计算环节的影响程度	计算量大，较复杂，大系统易出现“维数灾”
不考虑频率耦合的阻抗/导纳分析法[21]	子系统端口阻抗之比满足 Nyquist 判据	从负电阻角度解释失稳机理	只能用于单个设备并网场景
考虑频率耦合的阻抗/导纳分析法[22]	建立导纳矩阵	可以计及频率耦合效应，研究多输入多输出系统	耦合效应难以解耦，阻抗重塑成为难题
复转矩系数法[23]	同步转矩系数和阻尼转矩系数判稳	较模态分析法简单，可揭示系统的阻尼特性	数学理论不够严密，适用于单输入单输出系统
动力学法[24-25]	内电势、幅相运动方程	从力学的运动方程角度解析系统稳定性	处于起步阶段，有待进一步研究

宽频振荡建模解析方法主要包含模态分析法[20]、阻抗法[21]、导纳分析法[22]、复转矩系数法[23]和基于运动方程的动力学法[24-25]等。模态分析法可以精确地获得系统的特征值、参与因子等信息，但建模难度较高，且容易出现“维数灾”。复转矩系数法更为简单，但该方法只适用于单输入单输出系统。阻抗法从负电阻角度揭示失稳机理，但只用于单个设备并网研究场景[21]。考虑到阻抗建模交叉耦合效应不可忽略，在近期的研究中，部分学者采用多谐波线性化方法或谐波状态空间建立导纳模型[13]。基于 abc 坐标系建立的导纳矩阵非对角线元素直接表征频率耦合作用[22]，而 *dq* 坐标系导纳矩阵的非对角元并不能直接表征频率耦合作用，其非对角元需经过转换才能表征频率耦合。

新能源高占比交直流混联电网是非线性、非连续性的复杂动态系统，上述线性化方法具有局限性。因此，部分学者寻求从动力学的角度描述装备的动态特性。幅相动力学法可以刻画系统的惯量和阻尼特性，同时准确表征复杂系统的多时间尺度特征[24]，可以分析交直流混联情况下多装备交互引发的振荡问题[25]。随着电力系统日趋复杂，理论分析难度较大，也有部分学者基于数据驱动和人工智能分析电

力系统宽频振荡问题[26]。

2 交直流混联电网宽频振荡的产生机理

随着新能源发电渗透率持续提升和电力电子装备规模化应用，电力系统安全稳定运行机制将发生质变。新型电磁振荡现象事故频发，但机理尚未理清。新能源接入引发的宽频振荡从场景上可分为：新能源接入传统交流电网引发和新能源经直流送出引发，不同的送出方式分类如图 4 所示。此类振荡问题是涉及同步发电机、高比例多类型电力电子设备、交直流系统强耦合的复杂振荡问题。因此，梳理电力系统宽频振荡的发生机理，归纳引发宽频振荡的关键影响因素，是研究宽频振荡形成机制的核心。表 3 总结了本章阐述的振荡机理及其主导因素。

2.1 新能源接入交流电网引发宽频振荡

风机与同步发电机交互会引发振荡集中在次同步频段。风电与火电交互可能会同时引发火电的轴系扭振和风电的次同步控制互作用[42-43]，前者当风机并网频率接近轴系扭振频率就会被激发[44]；后者受风机参数影响，改变风机网侧增益、连接电抗值和风机台数都会显著改变 SSCI。当风火打捆经直流送出时，风机转子侧变流器内环比例系数增大、积分系数减小、直流输送功率增大、送端交流系统减弱等因素都会导致火电机组次同步振荡恶化[28]。

双馈风机(doubly fed induction generator，DFIG)与串补网络交互引发的宽频振荡主要集中在次/超同步频带，产生的振荡为 SSR 和 SSCI。SSR 主要由风电与串补网络交互引发，产生机理为串补电容和定子侧的等效电感形成谐振回路，不涉及机械轴系[18,29]。SSCI 是由交流电网和风机某些运行方式或控制器设置不合理引发的。文献[38]认为 SSCI 是由变流器和串补相互作用激发的，但未分析 DFIG 机侧对振荡模式的影响。文献[45]研究了 DFIG 的机侧参数对次同步振荡的影响，结果表明机侧外环比例系数对次同步振荡(sub-synchronous oscillation，SSO)的影响程度与内环比例系数强相关。

DFIG 与弱交流电网引发的振荡集中在次/超同步频段。开环模式法指出当 DFIG 开环 SSO 与其余系统的开环 SSO 相近时会发生开环模式谐振[18,46]。阻抗分析表明[13]，在超同步频段内，机组呈现容性阻抗，电网等效阻抗为感性，当相位裕度不足时存在振荡风险。针对直驱风机接入弱交流电网引发振荡的机理尚未形成统一认识[47]。文献[19]建立了多台直驱风机接入交流电网的小信号模型，得出当接入系统强度越弱，风机并网台数越多时，系统失稳风险越高，但并未关注风机变流器内部参数对稳定性影响。文献[13]表明不同频段主导因素不同，调整对应频段的阻抗参数可有效降低系统失稳风险。

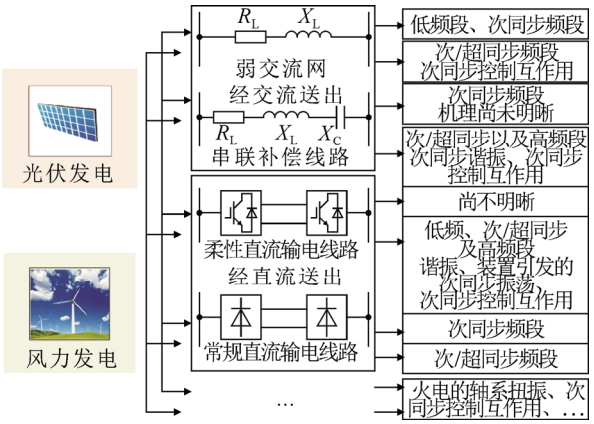


图 4 新能源经不同方式送出存在的振荡模式

Fig.4 Oscillation modes of renewables delivered by different ways

随着光伏并网规模愈发扩大，光伏并网对系统稳定性的影响也不断增大，由于光伏出力的波动性和随机性会带来复杂的振荡问题[48-49]，其涉及的频带包括低频、次/超同步、高频。现有光伏并网方式主要有：光伏汇集并网、光伏并入弱交流网、光伏并入直流电网和光伏经直流并网等。后 2 种方式将在 2.2 节具体阐述。光伏汇集并网主要涉及次同步振荡、低频振荡和高频振荡模式[39,50]。文献[27]分别讨论了影响低频振荡和次同步振荡的主导因素，指出影响光伏逆变并网低频振荡的主导因素为外环电压和 d 轴电流 PI 参数，次同步振荡的主导因素为 q 轴电流 PI 参数。文献[51]在此种并网场景下发现了高频振荡模式，并阐明影响高频振荡的主导因素为电压前馈滤波器。图 5 为光伏并网引发高频振荡典型波形。

当光伏并入弱交流系统时，引发的振荡主要为次同步振荡。影响光伏并入弱电网稳定性的主导因素为：各光伏阵列输出功率增加，减小了各逆变器 PLL 的比例系数，电网强度降低，从而会提高失稳风险[52]。同时，电网强度的降低可等效为电网电感增大，虽然在一定程度上可以抑制次同步振荡，但也会恶化系统的高频稳定性[53]。对于光伏经串补并网系统，其串补输电线路与电力电子设备动态相互作用使得系统存在次同步振荡风险，但尚未形成统

表 3 宽频振荡的产生及主导因素

Table 3 Generation and dominant factors of wide-band oscillation

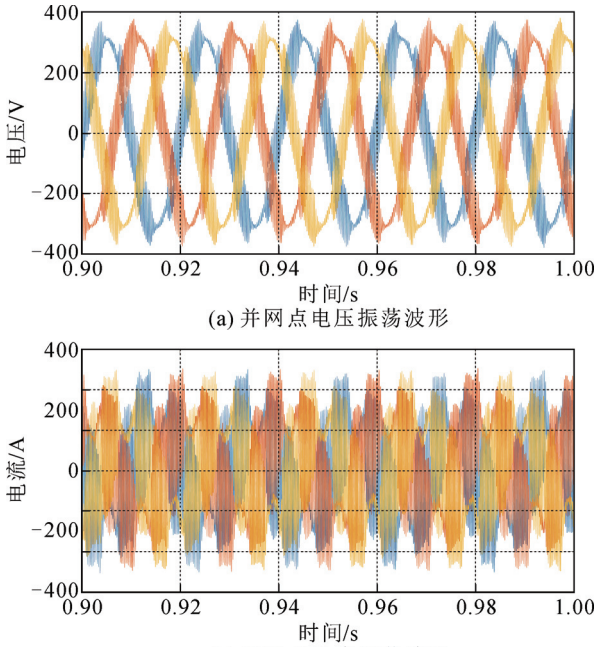
频段	场景	产生原因	主导因素
低频	光伏并网	阻尼较弱	外环电压和 d 轴电流 PI 参数[27]
	风机经直流并网		电压外环参数(控制器模态)；转子侧变换器参数、风速
次/超同步	直流与同步发电机交互	机电扭振相互作用	交流系统强度、直流输送功率、内外环比例系数
	风电与同步发电机交互	火电的轴系扭振和风电的次同步控制互作用	风机转子侧变流器内环 K_p 增大, K_i 减小，直流输送功率增大，送端交流系统减弱等因素导致 SSO 恶化[28]
	双馈风机经串补并网	SSR：串补电容和定子侧的等效电感谐振；SSCI：变流器和串补相互作用	SSR 影响强到弱：风机转速、输出功率、风机台数、串补度、RSC 电流环比例系数；SSCI：串补度和 GSC 内环 PI 参数[29]
	双馈风机与弱交流网引发次/超同步	机组呈现容性负阻抗，电网呈感性，相位裕度不足	PLL、 DFIG 的 RSC 控制器参数[33]；超同步频带的主导因素为 GSC 电流环、直流电压环、功率外环控制参数[14]
	直驱风机不经串补接入弱交流电网	负阻尼作用	接入系统强度，风机并网台数；影响最大的参数依次为：电流内环比例系数、直流电压外环比例系数、电流内环积分系数、锁相环比例系数[21]
	光伏并网	阻尼较弱	光伏逆变器的电压外环和有功电流内环，q 轴电流 PI 参数；电流环的 K_p、PLL 的 K_p 和线路对地电容[30]
	光伏并入弱交流系统		各光伏阵列输出功率增加，各逆变器 PLL 的 K_p 减小，SCR 降低，易失稳[31]
	直驱风机经 VSC-HVDC 并网		风场侧：直流侧电容、风机并网阻抗，风机并网台数，柔直：直流侧电抗[32]。场内 SSO，风机网侧换流器电压控制环；场网 SSO，风机网侧换流器电压控制换和柔直送端 VSC 电压控制环节[33-34]
	风机经 LCC-HVDC 送出	风机呈容性，与感性弱电网交互引发次/超同步振荡	次同步：直驱风机直流电容，整流站电流环，直驱风机锁相环；超同步：直驱风场电流环和直流线路参数[35]
	DFIG 与柔直交互	DFIG 呈感性负阻，变流器呈容性	柔直的电压控制环和风机的滑差控制[36]
	海上风电经直流送出	风电机组的轴系扭振(SSTI)和风电与 VSC 间互作用(SSEI)	环流控制；SSTI 的关键影响因素为风轮转速，而转子侧变频器内环控制环节的 PI 系数会同时影响 SSTI 和 SSEI[23]
	光伏经 LCC-HVDC 送出		光伏逆变器外环，LCC-HVDC 整流器的 PI 系数[37]
高频	DFIG 与串补交互	参数不合理引发 SSO 高频漂移	串补度和 GSC 内环 PI 参数[38]
	光伏并网	谐振频率处呈现负电阻	高频振荡的主导因素为电压前馈滤波器[39]
	风机经 VSC-HVDC	—	直流输电线路参数是影响高频振荡的关键因素[40]
	海上风电经直流送出	谐振	电缆长度和风机台数的增加都会容易激发互联系统的高频谐振[41]

一认识。文献[30]说明次同步振荡的产生机理为大规模光伏经串补并网与变压器的励磁支路在交流侧产生谐振点。影响振荡的主导因素为锁相环的 PI 参数。

2.2 新能源经直流并网引发宽频振荡

随着新能源广泛接入和大量直流工程投运，新能源和直流之间交互引发的失稳事件受到广泛关注，2014 年德国北海直驱风场经柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission，VSC-HVDC)送出发生的谐振事故，以及广东南澳风电场经柔直并网工程发生的次同步振荡等事故，暴露出电力电子设备间强交互带来的稳定问题。

直驱风机经 VSC-HVDC 并网会引发次/超同步振荡，并且次同步和超同步模式之间存在阻尼耦合的情况。文献[32,40]得出风场侧影响振荡的因素为直流侧电容、风机并网阻抗、风机并网台数。柔直系统影响振荡的因素为直流侧电抗参数，但对振荡



(a) 并网点电压振荡波形

(b) 并网点电流振荡波形

图 5 光伏并网高频振荡波形

Fig.5 Photovoltaic grid connected high frequency oscillation waveform

的模式分析尚未明晰。直驱风机和 VSC-HVDC 交互产生次同步振荡存在场内 SSO 和场网 SSO。场内 SSO 主要受风机网侧换流器电压控制环影响；场网 SSO 模式同时由风机网侧换流器电压控制换和 VSC-HVDC 送端换流站电压控制环节主导，存在电力电子设备间的强耦合[33]。

直驱风机经电网换相高压直流输电(line-commutated converter based high voltage direct current，LCC-HVDC)送出引发的振荡主要涉及次/超同步频带。在次同步频段内，LCC 电流环是影响振荡的主导因素，而在超同步频段内，主导因素为直驱风场电流环和直流线路参数[34]。

DFIG 与 VSC-HVDC 交互会产生次/超同步振荡。文献[35]研究了 DFIG 经柔直送出产生的次同步现象，认为风电场产生的次同步振荡增大了柔直逆变器的环流，但并未理清风电场与柔直交互对次同步振荡的影响机理。文献[54]进一步利用阻抗法分析了风电经柔直送出在各个频段影响稳定性的主导控制环节，如图 6 所示。

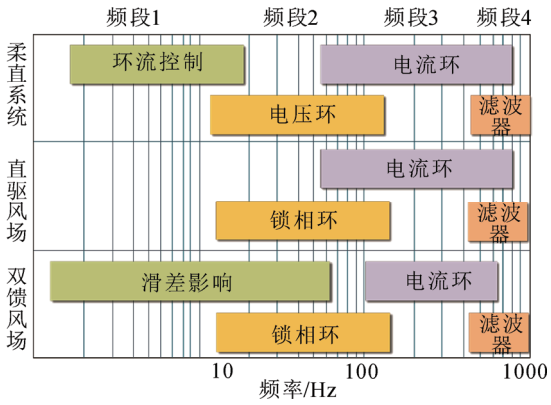


图 6 风电经柔直送出在各个频段影响稳定性的主导环节

Fig.6 The leading link of stability at each frequency period for wind power transmission through flexible and direct transmission

海上风电经直流送出并网受并网拓扑的改变和电缆对输电系统的影响，振荡机理尚不明晰[21]。文献[55]表明环流控制是影响柔直稳定性的关键环节，但并未分析其可能存在的振荡模式及失稳机理。除了控制器交互引发振荡，海上风电送出电缆长度和风机台数的增加都会激发互联系统的高频谐振[36]。

光伏经直流并网系统是否存在宽频振荡风险，以及光伏和直流如何交互影响，其耦合机理尚未形成统一认识。文献[56]研究了风光打捆并网，研究结果表明风光混合电厂会由于参数变化产生次同步控制相互作用而失稳。但并未对具体交互和失稳机理进行分析。文献[41]表明，光伏与 LCC-HVDC 耦合会导致系统次同步振荡。当 LCC-HVDC 系统定电流控制器和光伏逆变器外环的比例系数减小、积分系数增大，或光照强度增大时，系统 SSO 风险增大。随着光伏发电的大规模增长，光伏经直流送出导致的宽频振荡问题会逐步暴露，目前相关研究正处于起步阶段。

近年来，光伏大规模集成接入直流电网也在现代电力系统中得到推广应用，但光伏阵列接入的稳定性问题鲜有研究。文献[57]研究了光伏逆变器接入配电网的功率振荡问题，研究表明功率环和电压环、以及较大的网络阻抗能有效抑制振荡。文献[37]研究了光伏发电单元接入直流电网时影响直流电网稳定性的因素，发现光伏单元输出功率减小和台数减少都会降低直流电网的稳定性。目前，光伏阵列在直流主网、配网均有接入，其导致的振荡失稳问题日渐凸显，有待进一步研究。

3 交直流混联电网宽频振荡的辨识方法

宽频振荡问题是电力系统稳定性问题中不可忽视的一部分，而振荡问题的准确检测和辨识能够获得振荡的频率、阻尼、幅值等信息，提取振荡的特征，为事故溯源与振荡抑制提供数据参考。辨识方法的实现过程如图 7 所示，通过对数据的处理和解析，判断振荡是否发生，并可以准确获得振荡的类型、模式等规律，对保障系统稳定运行具有重要意义。

电力系统振荡辨识可以分为信号模型估计和数字信号分解。前者通过对信号的模型进行参数估计，实现系统辨识；后者则依靠数字信号，完全由数字信号解析系统特征信息。对于内部机理较为复杂的交直流混联电网扰动传播而言，辨识方法相较机理建模更容易，并能够为后续的振荡定位与在线抑制提供支撑。

目前，振荡辨识在低频/超低频频段已有较为成熟的应用，但高比例新能源和高比例电力电子设备广泛接入电力系统，使得以往的检测方法不能全部迁移用于宽频振荡的检测与辨识，本章综述可适用于高比例新能源接入下电力系统的振荡辨识方法，梳理现有方法的适用性和优缺点，为宽频振荡的辨识方法提供思路。电力系统振荡检测的研究根据信号来源主要可分为两种类型：基于子站本地信号的宽频振荡辨识方法和基于广域测量(wide area mea-

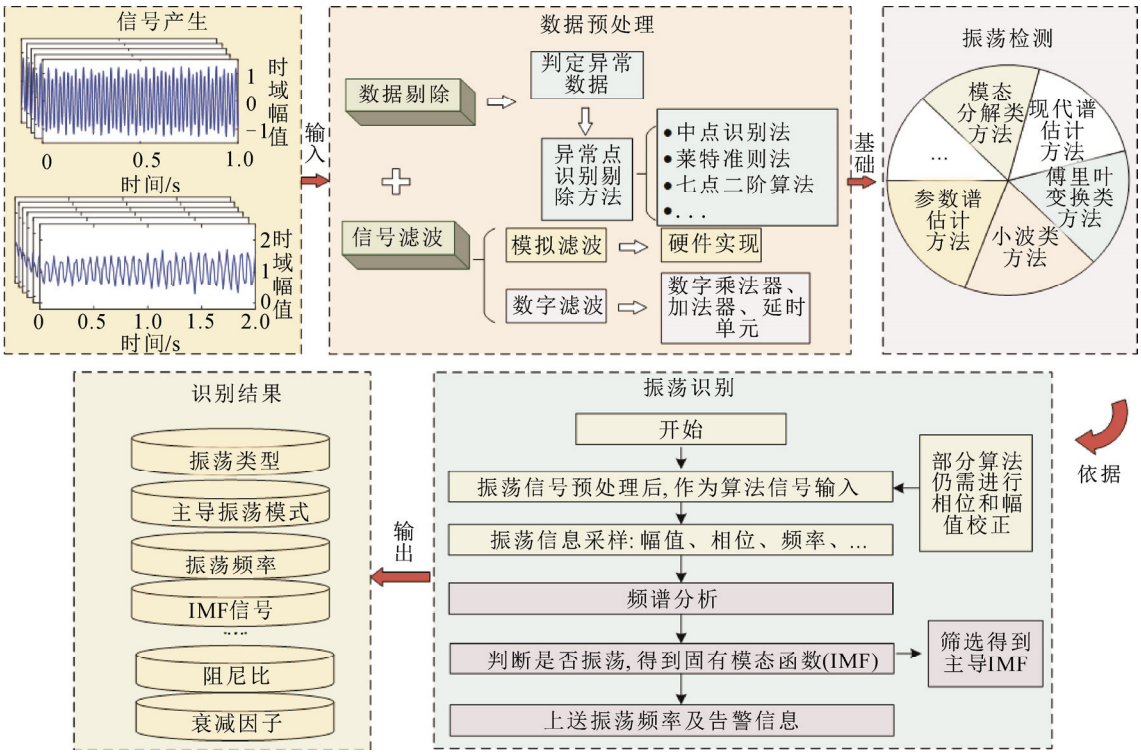


图 7 宽频振荡辨识过程

Fig.7 Identification process of wide-band oscillation

surement system, WAMS)主站广域信号的振荡辨识方法。前者利用 PMU 实测值进行辨识[58,12]，后者基于 WAMS 的同步相量数据进行辨识，只能对次/超同步频带内的振荡进行监测与辨识[59]。图 8 展示了宽频振荡的辨识方法分类。

3.1 基于子站本地信号的宽频振荡辨识方法

近年来，基于相量测试单元(phasor measurement unit, PMU)的广域量测系统实现了电力系统的数据采集和观测[12,13,58]，其理论难度小、精度较高，可检测宽频振荡的数据，已经较为成熟地运用于实际电网。基于子站本地信号的宽频振荡辨识可以得到振荡的模态参数，识别事故的振荡规律，但不能从全局角度对振荡的发展和传播进行检测[13,60]。基于子站数据的宽频检测方法主要包含快速 Fourier 变换(fast Fourier transform，FFT)类、小波变换类、现代谱估计类和经验模态分解。

Fourier 变换是传统的信号分析方法，其优点是算法简单、易于实现，但易产生栅栏效应和频谱泄漏，影响振荡辨识的结果。文献[58,60]采用加窗的方式改善频谱泄漏问题，但加窗算法会增加计算时间。针对上述缺陷，文献[61]采用快速 Fourier 小波变换和 FFT 相结合的方法，可同时实现多分量的次同步振荡模态分解，提高辨识准确度。Fourier 变换

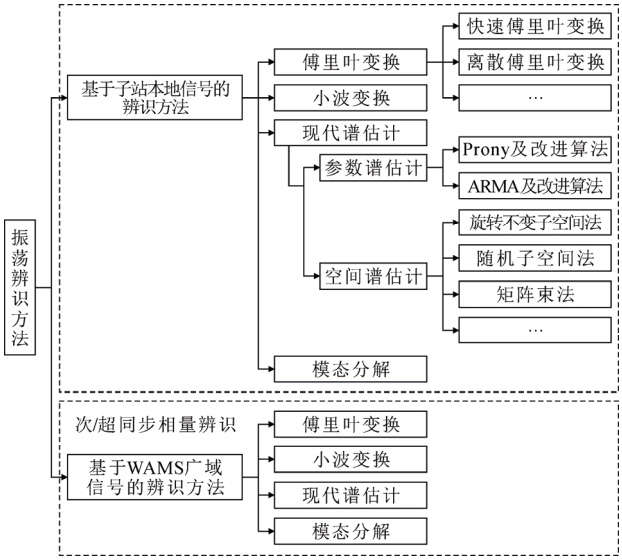


图 8 宽频振荡辨识方法分类

Fig.8 Classification of wide-band oscillation identification methods

的振荡检测方法简单快速，但只能获得信号的频率和幅值，可以通过加窗和与其他方法相结合的方式进行改进，改进后的方法被广泛用于系统次/超同步振荡监测。

小波变换可识别各振荡时段的模态参数，常用于系统低频、次/超同步振荡的辨识。小波变换在基

函数和阈值选择上没有具体的原则[62]，且对噪声干扰较敏感。文献[13]将小波变换和希尔伯特变换相结合，具有较强的抗噪性。小波变换选取不同的基函数和阈值产生的结果差异较大，这限制了小波变换的实际应用[63]。

现代谱估计方法分为参数谱估计和空间谱估计。参数谱估计主要包含了 Prony 及其改进算法和自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)及其改进算法，参数谱估计通过指数项的线性组合来表示采样数据[64-65]，可以获得高精度的信号信息，对参数有较好的估计能力，但也容易受噪声影响而产生误判，导致辨识精度不高。Prony 算法可用于明显扰动下的振荡辨识，而 ARMA 不仅可以满足明显扰动下的振荡辨识，也可以用于负荷投切等小干扰波动导致的类噪声信号，因此 ARMA 具有更好的适用性。

空间谱估计包含旋转不变子空间法(estimating signal parameter via rotational invariance techniques，ESPRIT)、随机子空间法(stochastic Sub-space Identification，SSI)、矩阵束法(matrix pencil，MP)等。子空间类算法本质是从信号中分解得到信号子空间和噪声子空间，利用正交性对信号子空间进行分析[66]。ESPRIT 基于状态矩阵进行信号频率估计，提高了信号估计的计算效率，但 ESPRIT 存在对噪声敏感的缺陷[67-68]。SSI 在利用类噪声数据估计区间振荡模式上具有一定优势，估计出的振型较为准确，但无法用于在线估计和监测[69]。矩阵束法可以获得频率、幅值、衰减因子、阻尼比等信息，但对信号的抗噪性差，易受干扰[70-71]。

经验模态分解(empirical mode decomposition，EMD)是一种自适应信号分解方法，检测精度高，但同样存在频谱泄漏问题，因此常与其他算法结合来提取电力系统中的时变振荡特性。采用经验模态分解和 HHT 结合的方法，辨识风机与串补交互引发的振荡结果和希尔伯特谱分别如图 9 和图 10 所示，可以准确辨识振荡中包含的基波分量和次同步分量。除了与 HHT 结合，EMD 也可以与 Prony、ESPRIT 等算法结合获得振荡的频率、幅值、阻尼比等信息。但 EMD 在实际运用时存在模态混叠的情况，在低频振荡辨识中的应用较广，而对次同步振荡辨识效果差，影响了其在在线监测中的应用。

上述现代谱估计方法均存在一定程度的定阶困难和计算量复杂、抗噪性差的问题，在实际应用时需要改进内核或与其他算法相结合。

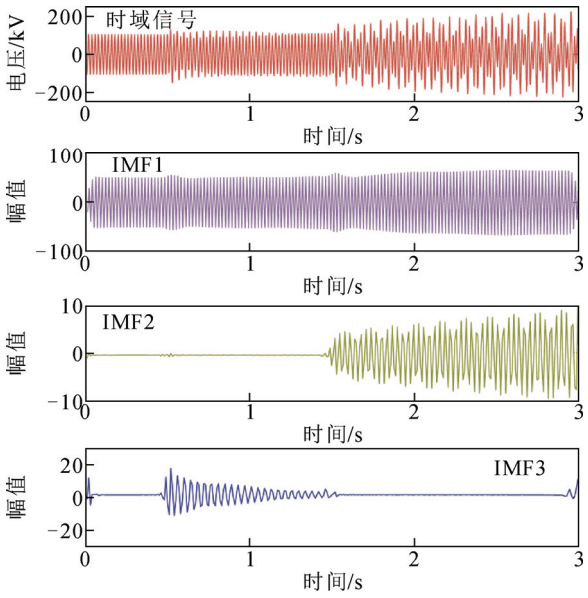


图 9 多扰动仿真信号辨识分解结果

Fig.9 Signal identification decomposition result

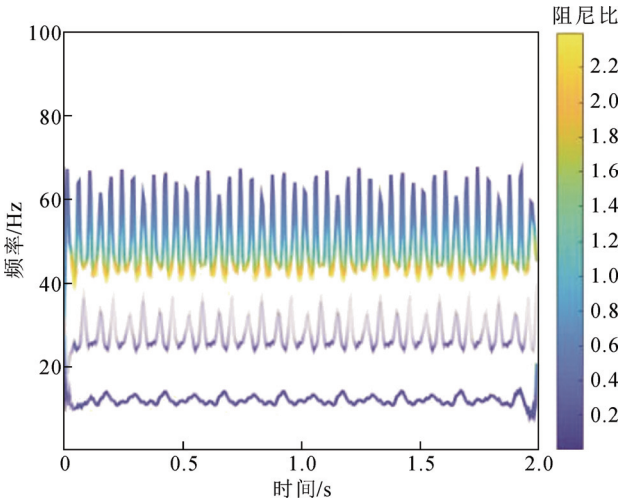


图 10 多扰动仿真信号时频谱

Fig.10 Time spectrum of multi disturbance signal

3.2 基于 WAMS 广域信号的振荡辨识方法

基于 WAMS 相量数据的辨识方法在广域振荡监测、振荡传播和溯源等方面具有优势[72]，该方法以同步相量测量装置的上传数据为基础，在主站对广域系统实时监测、分析和控制。当发生振荡事故时可以迅速反应，对振荡进行定位和溯源[59]，能够快速准确地实现振荡的监测与预警工作，并可以从调度层面进行振荡抑制和电力调度[73]，以保障电力系统的安全稳定运行。

相比于基于本地信号的辨识方法，基于 WAMS

可以实时监测大规模互联电网，收集实时信息，实现在线振荡分析和辨识。文献[74]采用了实时监测数据和聚合阻抗模型相结合实现振荡的溯源，可以确定振荡的传播路径，具有较好的实用价值。由于宽频振荡常常具有次/超同步混叠特征，文献[75]提出基于同步相量轨迹拟合的实时参数辨识，可以准确识别基波、次同步和超同步分类的频率、幅值和相位。目前基于 WAMS 数据的辨识方法局限于数据来源和频段限制，仍未在实际电网中大量应用，文献[76]提出一种宽频同步测量终端，可以实现 0~10 kHz 频段的谐波分量、间谐波分量、次/超同步分量的自适应捕获，具有一定的实用价值。

广域监测系统辨识出振荡特征后，可以为后续的系统分析及电网稳定控制提供服务[73]。得到振荡信息后，可以通过溯源能量流、行波检测等方式定位振荡源。目前，也有部分学者通过人工智能等算法手段分析振荡信息，服务于振荡溯源[24]。除此之外，基于 WAMS 也可以从全局角度进行振荡抑制。目前已有多种采用广域信号的控制器，如 FACTS、PSS 等[77]，但存在通信延迟；也可以从调度层面进行事故处理，寻求最优的电力调度结果，降低振荡事故对电网稳定性的影响。

总的来说，基于主站相量数据的宽频监测相关研究仍处于起步阶段。但广域测量系统拥有全局分析的优势，并为后续的振荡溯源和振荡抑制提供基础。因此未来基于 WAMS 的振荡检测仍有较大的研究潜力和价值。

4 交直流混联电网宽频振荡的抑制措施

现有的宽频振荡抑制策略可从控制对象上分为源侧和网侧[78]，如图 11 所示，源侧的抑制策略包括调整发电机组参数及控制结构，附加阻尼控制及支路补偿，对源侧进行振荡抑制可以直接提取相关电气量，且靠近目标机组进行控制效果更优。网侧则依托串并联柔性交流输电系统(flexible AC transmission system，FACTS)及直流线路附加控制，网侧可以直观地针对易引发振荡的线路进行谐振消除和保护。

4.1 源侧振荡抑制策略

宽频振荡从源侧抑制的策略主要可根据控制策略的设计方法分为：调整控制器参数及控制器结构、附加阻尼控制和控制支路补偿。

调整控制器参数需要首先筛选影响振荡的主导因素，基于主导因素得出参数调整的安全稳定域[79]。基于关键的控制器参数，可对参数进行优化设计以提升系统的稳定性。文献[19]提出了一种衡量参数

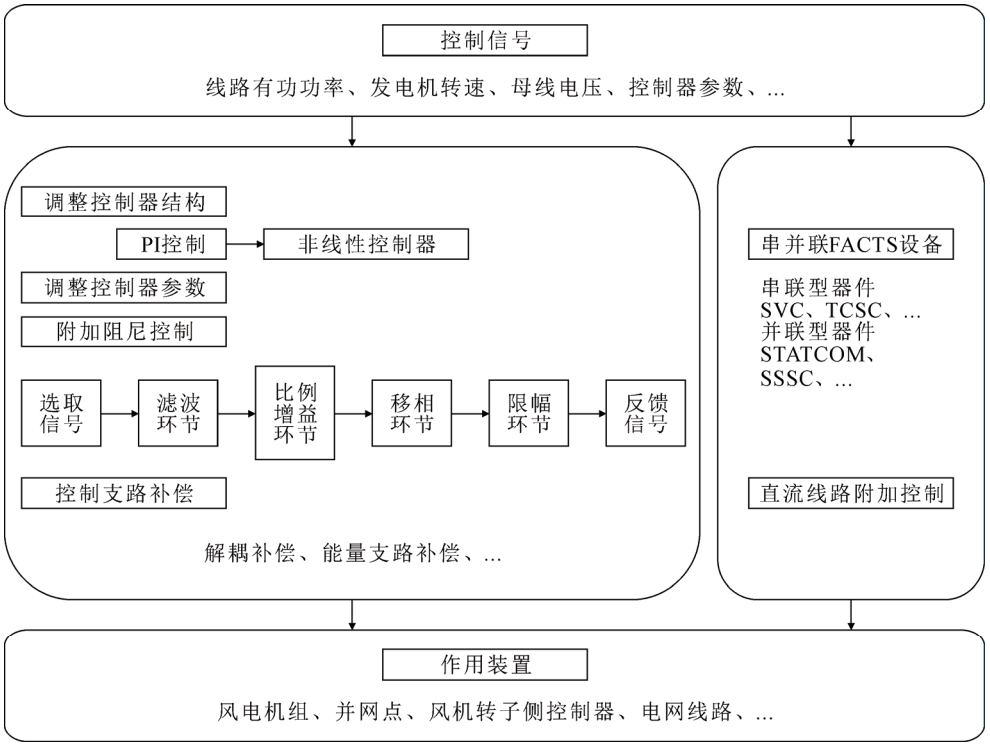


图 11 宽频振荡抑制措施

Fig.11 Wide-band oscillation suppression measures

敏感性的阻抗灵敏度指标，可以判断控制器对 SSO 特性影响的大小。文献[14]考虑风电柔直并网的稳定性进行参数优化设计，结果表明只考虑单个控制器的参数优化无法满足互联系统的稳定性。调整参数以抑制宽频振荡的局限性在于某些关键参数在实际运行中不可调整[80]，只能对前期规划设计有一定参考意义。

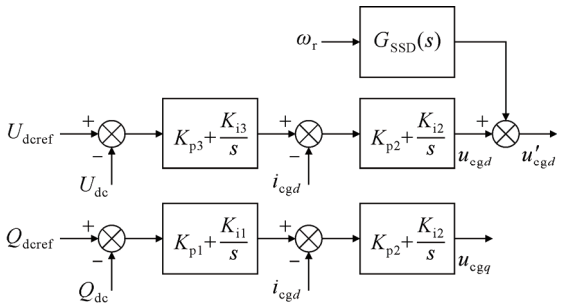
调整控制器结构以抑制宽频振荡的设计方法为利用非线性控制器代替现有的 PI 控制，例如 H∞控制、滑模控制等，但由于较复杂的控制结构和较大的计算量，在实际电网中难以实现，仍停留在理论阶段。

附加阻尼控制一般基于系统的状态空间模型或阻抗模型，选取较优的关键反馈信号和输出信号附加位置，设计系统的阻尼控制器[81]。基于状态空间模型的附加阻尼可以配置系统的特征根，以此实现振荡抑制；而基于阻抗模型的附加阻尼控制通过传递函数设计实现阻抗重塑，改变谐振点位置或增加系统相位裕度，以此抑制振荡的产生[82]。针对风机经串补并网典型场景，设计附加阻尼控制及抑制效果如图 12 所示。

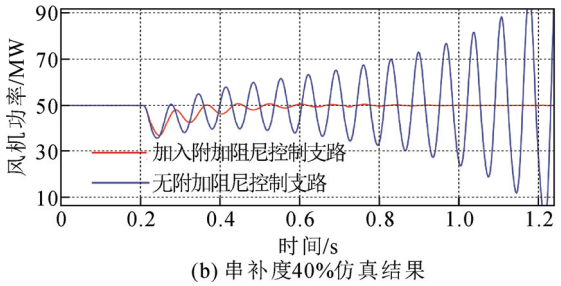
附加阻尼控制器的性能由设计的反馈函数决定，文献[83]对比了不同附加阻尼控制器的鲁棒性和抑制性能，分析表明附加控制器的性能主要由输入信号、输出信号位置以及控制结构决定。附加阻尼控制器主要由滤波环节、比例增益环节、移相环节和限幅环节中的几个组合而成。滤波环节消除其他频段的噪声，比例增益环放大控制信号，移相环节实现相位补偿，限幅环节保证输出信号在有效范围内[36]。

在实际应用中，输入信号的选取受限于信息采集的通道，且附加阻尼控制不能针对全工况进行振荡抑制，只能针对特定频率的振荡提供负阻尼，目前多用于抑制次同步范围内的振荡，能否实现宽频振荡的抑制仍有待进一步的研究。

控制支路补偿是在关键控制环节中加装振荡分量的反向补偿支路，其关键问题为选取补偿信号和补偿系数，通过前馈补偿或附加滤波器的方式改善系统的稳定性[84-86]。支路补偿包括阻尼补偿[84]、解耦补偿[85]、能量补偿[86]，阻尼补偿可以改善谐振点的阻尼水平，解耦补偿通过构建振荡的反向补偿支路实现振荡抑制，能量补偿改善能量流通路径中的动能和势能，实现宽频振荡的主动阻尼。控制支路补偿通常在小系统中的改善效果较好，当考虑大系统或广域互联系统时，此抑制策略的性能较差。



(a) 附加阻尼控制器结构



(b) 串补度40%仿真结果

图 12 风机加装附加阻尼抑制效果

Fig.12 Additional damping suppression effect of DFIG

可见，附加阻尼控制和控制支路补偿在本质上都是通过相位补偿的方式，改善系统的阻尼[83,86]。从应用场景上区分，附加阻尼控制可以用于设备或电网，而控制支路补偿通常用于元件内部[82,85]；从设计的角度区分，附加阻尼控制的关键是选取反馈信号并设计传递函数[81]，而支路补偿的关键是选取补偿信号和补偿系数[84]。2 种方法都可以修改控制器并网的谐振频率及其阻尼特性，有效提高系统的稳定性。

4.2 网侧振荡抑制策略

宽频振荡在网侧的抑制策略主要通过 2 种手段实现，FACTS 和直流输电附加控制。网侧抑制主要作用于易产生谐振的线路和可能引发 SSCI 的输电线。通过消除谐振条件或增加阻尼的方式，对线路和近区易产生振荡的设备进行保护。

FACTS 装置可以在工频下快速调节系统潮流，并在系统中注入反向振荡电流，以提高系统的输送能力和稳定性[87-88]。现有研究利用多种 FACTS 装置或 FACTS 与附加阻尼控制协同作用，可适应不同工况下系统的振荡问题。由于其种类多样，控制灵活，抑制效果明显，FACTS 装置已在实际电网中得到不同程度的应用。静止无功补充装置(static var compensator, SVC)和晶闸管控制串联补偿(thyristor

controlled series compensation, TCSC)均为串联型装置，多用于抑制串补线路产生的谐振。静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)是并联型器件，前者并联于并网点，通过无功功率调整支撑母线电压，后者通过调节母线电压实现振荡抑制功能。统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)是新一代特性较好的FACTS装置，具有较好的应用前景[89]。采用FACTS设备进行阻尼控制均需要附加控制装置，在工程上造价较高。在高比例电力电子设备接入的电网中，FACTS 还可能与其他设备交互耦合出新的稳定问题，因此其只适用于特定场景的振荡抑制。

直流输电附加阻尼控制研究处于初步阶段，可通过附加次同步阻尼控制器或与其他设备协同控制以实现振荡抑制[90-91]。文献[90]提出附加次同步阻尼控制，提供阻尼电磁转矩，但此种控制策略未计及多设备间的交互作用。文献[91]提出直流附加阻尼与发电机协调控制策略，可提高系统的稳定性和鲁棒性。部分学者通过自适应算法、神经网络等改善系统的动态性能及振荡抑制效果。

综合网侧和源侧的抑制方法分析，源侧抑制可以实现从振荡源头进行主动抑制，可以直接提取振荡相关的电气量，就近对产生机制进行阻尼，实现更强的阻尼作用，但目前主要围绕某一种确定的振荡频段进行设计。网侧控制依托于已建成的控制设备，无法从源头实现振荡抑制。针对宽频段的自适应振荡策略研究仍处于起步阶段。

5 结论与展望

随着风电、光伏等新能源跨越式增长，以新能源为主导发电单元的交直流电网将成为电力系统的典型形态。本文归纳了电力系统宽频振荡现象的产生、辨识及抑制措施，总结了不同接入场景下电力电子设备间的交互影响机理和稳定性的关键影响因素，梳理了现有文献中宽频振荡的辨识技术及抑制措施，并探讨了现有研究的局限性及未来发展的重难点。尽管电力系统宽频振荡问题已成为国内外研究热点，但其产生机理、实时广域监测、自适应振荡抑制等问题仍需深入关注，研究如何形成含高比例新能源的电力系统多时间尺度宽频振荡机理与控制理论体系，建立宽频振荡广域监测系统和多级防御体系，对电力系统的发展具有重大意义。

未来新能源高占比的交直流混联电网宽频振荡研究可考虑以下几点。

1）宽频振荡的特征和机理

宽频振荡特征与产生机理需考虑电力电子设备动态建模、设备间的耦合特性和传递特性以及源端集聚效应等因素的影响，具体包括：

(1) 考虑控制切换的电力电子装备非线性模型。含高比例新能源的交直流混联电网动态时间尺度差异大，动态规律难以精确刻画。现有的宽频振荡产生机理研究基于小信号模型，对多类型电力电子设备均有一定的简化。可再生能源并网的固有动态谐波极易引发交直流耦合振荡，亟需建立精准高效的电力电子装备控制切换非线性动态模型，并揭示其传播动力学机理。

(2) 耦合特性和传递特性。电力电子装备的扰动响应驱使各常规/暂态控制器依次动作或切换，形成多尺度序贯过程，此时扰动经电力电子装备各端口的传递规律表现为不同的非线性映射过程。现有研究尚难以考虑电力电子装备控制切换非线性特征对扰动传递特性的影响，也难以揭示外部扰动条件与电力电子装备状态切换的关联关系，未来需研究扰动在装备端口间的传递特性和在多种装备间的耦合特性。

(3) 源端集聚效应对振荡机理的影响。现有研究仅考虑单一新能源类型并网，随着新能源场站接入比例的提高，需要聚焦于多类型电力电子设备集群间的稳定特征分析，研究集群间振荡的产生机理及特征，探索电力电子集群带来的电力系统振荡新现象及特征的产生机理。

2）宽频振荡全时频信息感知与在线检测

宽频振荡的辨识技术在振荡信息感知和广域在线监测等方面仍需进一步研究，具体包括：

(1) 振荡信息完整性。现有的PMU仅支持100 Hz以下的扰动监测，而工程中的宽频振荡频带已达4 kHz，现有PMU频谱特征提取方法及同步测量装置难以获得更高频带的同步电压信息，不满足未来电力系统中谐波和振荡研究对完整同步信息的需求。因此，需解决 PMU 信息提取造成宽频电压同步信息不完整的难题，实现电力系统全时频信息感知。

(2) 振荡广域在线监测。基于子站数据无法满足实时监测和广域监测，高比例电力电子设备的不确定性和随机波动性带来的多变工况无法实时监测。而基于 WAMS 数据辨识同步相量数据上传量

少，且从同步相量数据中还原振荡信号的难度较大，广域监测和辨识只能用于次/超同步振荡的辨识，无法应对宽频振荡。寻求非线性的辨识算法，考虑引入人工智能进行信号的去噪和校正，实现宽频振荡的快速实时监测，也是今后的研究趋势之一。

3）宽频振荡自适应抑制

实现宽频振荡的自适应抑制可从适应非线性的设备动态模型、考虑频率漂移的自适应容错抑制等方面展开。

(1) 电网非线性、非连续性特征对抑制的影响。电力电子装备状态切换与外部扰动具有谐波交互作用，然而可再生能源并网导致的谐振频率往往在控制频带之外，考虑控制非线性后显著增加了扰动建模与抑制的难度与复杂性。此外，现有的附加控制均只针对单一控制对象，而未考虑电力电子设备间的强耦合特性带来的复杂影响，附加控制可能会引发新的振荡模态。且非动态控制参数也无法适应高比例电子电子化系统复杂多变的运行工况。

(2) 自适应容错抑制。现有的抑制手段只能针对特定频率进行振荡抑制，而交直流电网的振荡呈现宽频带和频率漂移特征，传统的抑制措施无法自适应地应对具有频率漂移特征的宽频振荡问题。因此，需要研究适用于复杂多变工况、宽频时变特性的自适应振荡抑制策略。

参考文献 References

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报，2020-12-22(010).
Information Office of the State Council of the People's Republic of China. Energy development in China in the new era[N]. People's Daily, 2020-12-22(010).

[2] 国家发展改革委，国家能源局. "十四五"现代能源体系规划[R]. 北京：国家发展改革委，国家能源局，2022.
NDRC, NEA. 14th Five-Year Plan for modern energy system[R]. Beijing, China: NDRC, NEA, 2022.

[3] 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.

[4] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, BURGOS R, et al. Intergrid: a future electronic energy network?[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 127-138.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[8] 辛保安，郭铭群，王绍武，等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化，2021，45(22)：1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.

[9] 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, USA: IEEE, 2012: 1-5.

[10] X X R, ZHANG X, LIU H K, 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.

[11] LIU H K, XIE X R, HE J B, 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.

[12] 周孝信，鲁宗相，刘应梅，等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.

[13] 李光辉，王伟胜，刘 纯，等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一)：宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(22)：6547-6562.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6547-6561.

[14] 李光辉，王伟胜，张 兴，等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(二)：阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(10)：3614-3626.
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and mechanism analysis of sub-and super/synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms (part II): analysis of impedance characteristic and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3614-3626.

[15] 张 超，王维庆，邱衍江，等. 大规模风电并网地区次同步谐波检测方法[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2194-2202.
ZHANG Chao, WANG Weiqing, QIU Yanjiang, et al. Detection method of subsynchronous harmonic in regions with large scale windpower paralleled in grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2194-2202.

[16] 赵 妍，李武璟，聂永辉. 次同步振荡的频率切片小波变换检测方法[J]. 电工技术学报，2017，32(6)：106-114.
ZHAO Yan, LI Wujing, NIE Yonghui. A method for subsynchronous oscillation detection using frequency slice wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 106-114.

[17] 吕 敬，蔡 旭. 提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报，2018，38(2)：431-443.
LÜ Jing, CAI Xu. Controller parameters optimization design for enhancing the stability of wind farm with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 431-443.

[18] 陈 晨，杜文娟，王灵安，等. 双馈风电场内部多模式谐振引发电力系统次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(3)：642-651.

CHEN Chen, DU Wenjuan, WANG Ling'an, et al. Mechanism investigation of sub-synchronous oscillations in power systems as caused by multi-modal resonance within DFIG-based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 642-651.

[19] 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.

[20] 董晓亮，谢小荣，杨 煜，等. 双馈风机串补输电系统次同步谐振影响因素及稳定区域分析[J]. 电网技术，2015，39(1)：189-193.
DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, YANG Yu, et al. Impacting factors and stable area analysis of subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 189-193.

[21] 张明远，肖仕武，田 恬，等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术，2018，42(9)：2768-2777.
ZHANG Mingyuan, XIAO Shiwu, TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensitivity[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2768-2777.

[22] 刘岳坤，汪娟娟，王泽昊，等. 定功率控制下柔性直流输电系统交流侧导纳矩阵建模及频率耦合抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3718-3730.
LIU Yuekun, WANG Juanjuan, WANG Zehao, et al. Research on AC admittance matrix modeling and frequency coupling effect of MMC-HVDC under power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3718-3730.

[23] 边晓燕，丁 炀，买 坤，等. 海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化，2018，42(17)：25-33.
BIAN Xiaoyan, DING Yang, MAI Kun, et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 25-33.

[24] 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.

[25] YUAN H, YUAN X M, HU J B. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.

[26] 冯 双，崔 昊，陈佳宁，等. 人工智能在电力系统宽频振荡中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报，2021，41(23)：7889-7905.
FENG Shuang, CUI Hao, CHEN Jianing, et al. Applications and challenges of artificial intelligence in power system wide-band oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7889-7905.

[27] 高本锋，姚 磊，李 忍，等. 大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J]. 电力自动化设备，2017，37(8)：123-130.
GAO Benfeng, YAO Lei, LI Ren, et al. Analysis on oscillation modes of large-scale grid-connected PV power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 123-130.

[28] 赵书强，张学伟，高本锋，等. 风火打捆经直流送出的次同步振荡分析与抑制措施[J]. 电工电能新技术，2017，36(3)：41-50.
ZHAO Shugiang, ZHANG Xuewei, GAO Benfeng, et al. Analysis and countermeasure of sub-synchronous oscillation in wind-thermal bundling system sent out via HVDC transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 36(3): 41-50.

[29] 董晓亮，田 旭，张 勇，等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. 高电压技术，2017，43(1)：321-328.
DONG Xiaoliang, TIAN Xu, ZHANG Yong, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan farms[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 321-328.

[30] 陈武晖，杨彦霁，谢永胜，等. 大规模光伏发电经串补并网系统次同步振荡机制[J]. 电网技术，2021，45(12)：4711-4721.
CHEN Wuhui, YANG Yanji, XIE Yongsheng, et al. SSO mechanism of large-scale PV generation connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4711-4721.

[31] LI Y, TANG G, AN T, et al. Power compensation control for interconnection of weak power systems by VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1964-1974.

[32] 邵冰冰，赵书强，裴继坤，等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡特性分析[J]. 电网技术，2019，43(9)：3344-3355.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, PEI Jikun, et al. Subsynchronous oscillation characteristic analysis of grid-connected DDWFs via VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3344-3352.

[33] 郭贤珊，李云丰，谢欣涛，等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. 中国电机工程学报，2020，40(4)：1149-1160.
GUO Xianshan, LI Yunfeng, XIE Xintao, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics caused by PMSG-based wind plant farm integrated via flexible HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1149-1160.

[34] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T. Offshore wind farm grid integration by VSC technology with LCC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 899-907.

[35] LÜ J, DONG P, SHI G, et al. Subsynchronous oscillation of large DFIG-based wind farms integration through MMC-based HVDC[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2401-2408.

[36] 薛 涛，吕 敬，王 凯，等. 海上全功率风电机组精细化阻抗建模及机网侧耦合分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4303-4318.
XUE Tao, LÜ Jing, WANG Kai, et al. Accurate Impedance modeling of an offshore full-power wind turbine system and analysis of the coupling characteristics between machine-and grid-side systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4303-4318.

[37] 黄旭程，何志兴，刘亚丽，等. 考虑光伏发电单元孤岛检测影响的直流电网稳定性分析与阻尼控制[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：109-122.
HUANG Xucheng, HE Zhixing, LIU Yali, et al. Stability analysis and damping control of DC grid considering PV generators with island detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 109-122.

[38] FAN L, KAVASSERI R, MIAO Z L, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.

[39] 王渝红，叶 葳，宋瑞华，等. 基于阻抗分析法的三相 LCL 型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2645-2656.
WANG Yuhong, YE Wei, SONG Ruihua, et al. Design of additional active damping for three-phase LCL grid connected inverter based on impedance analysis method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2645-2654.

[40] 陈宝平，林 涛，陈汝斯，等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网系统的多频段振荡特性分析[J]. 电工技术学报，2018，33(增刊 1)：176-184.
CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Characteristics of multi-band oscillation for direct drive wind farm interfaced with VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(Supplement 1): 176-184.

[41] 高本锋，陈淑平，刘 毅. 光伏与 LCC-HVDC 系统的次同步振荡耦合路径及阻尼特性分析[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：66-75.

GAO Benfeng, CHEN Shuping, LIU Yi. Analysis on coupling path and damping characteristics of sub-synchronous oscillation between photovoltaic and LCC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 66-75.

[42] LI Z, SHAHIDEHPOUR M. Small-signal modeling and stability analysis of hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2080-2095.

[43] MOHALE V, CHELLIAH T R. Sub synchronous oscillation in asynchronous generators serving to wind and hydro power systems – a review[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Vancouver, Canada: IEEE, 2021: 1-7.

[44] 高　陈. 基于阻抗特性的火电机组与风电场次同步振荡相互作用研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2020.
GAO Chen. Study on subsynchronous oscillation interaction between thermal power unit and wind farm based on impedance characteristics[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2020.

[45] HU J, HUANG Y, WANG D, 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.

[46] SHAIR J, XIE X, YANG J, et al. Adaptive damping control of subsynchronous oscillation in DFIG-based wind farms connected to series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1036-1049.

[47] YANG S, SHEN R, SHU J, et al. PLL Based sub-/super-synchronous resonance damping controller for D-PMSG wind farm integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022: 1.

[48] LIU S, LIU P X, WANG X. Stochastic small-signal stability analysis of grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (1982), 2016, 63(2): 1027-1038.

[49] LIU S, LIU P X, WANG X. Stability analysis of grid-interfacing inverter control in distribution systems with multiple photovoltaic-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (1982), 2016, 63(12): 7339-7348.

[50] 李　杨，帅智康，方俊彬，等. 灵敏度在变换器系统阻抗稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报，2021，41(10)：3480-3491.
LI Yang, SHUAI Zhikang, FANG Junbin, et al. Application of sensitivity in impedance-based stability analysis for converter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3480-3491.

[51] ZHANG M, MIAO Z, FAN L, et al. Reduced-order analytical models of grid-connected solar photovoltaic systems for low-frequency oscillation analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1662-1671.

[52] IA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Stability analysis of multiple parallelled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 14-20.

[53] 刘佳宁，于　淼，夏杨红，等. 受弱电网影响光伏并网系统不同频段稳定性分析[J]. 电网技术，2020，44(1)：86-95.
LIU jianing, YU Miao, XIA Yanghong, et al. Separated frequency stability analysis of grid-connected PV system affected by weakgridJ]. Power System Technology, 2020, 44(1): 86-95

[54] 李光辉，王伟胜，郭剑波，等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5281-5297.
LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for win d farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5281-5297.

[55] LIU H, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.

[56] 甄自竞，杜文娟，苏田宇，等. 风–光伏混合电场并网对电力系统次同步振荡的影响[J]. 南方电网技术，2019，13(3)：64-72.
ZHEN Zijing, DU Wenjuan, SU Tianyu, et al. Influence of wind-photovoltaic hybrid farm's intergration on the sub-synchronous oscillation of power system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 64-72.

[57] 夏杨红，孙　勇，韦　巍. 光伏接入直流配电网时的功率振荡分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(23)：6814-6824.
XIA Yanghong, SUN Yong, WEI Wei. Power oscillation analysis of PV generators connected to DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6814-682.

[58] 王晓亮，李　娜. 基于加窗插值 FFT 算法的间谐波检测方法研究[J]. 现代电力，2012，29(5)：28-31.
WANG Xiaoliang, LI Na. Research on inter-harmonic detection using windows and interpolated FFT algorithm[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(5): 29-31.

[59] 马宁宁，谢小荣，亢朋朋，等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：65-74.
MA Ningning, XIE Xiaorong, KANG Pengpeng, et al. Wide-area monitoring and analysis of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 65-74.

[60] RUEDA J L, JUAREZ C A, ERLICH I. Wavelet-based analysis of power system low-frequency electromechanical oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1733-1743.

[61] 刘　君，肖　辉，曾林俊，等. 基于 RSSD 和 ICA 算法的低频振荡模态参数辨识[J]. 电工技术学报，2018，33(21)：5051-5058.
LIU Jun, XIAO Hui, ZENG Linjun, et al. Parameter identification of low frequency oscillation based on RSSD and ICA algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 5051-5058.

[62] NETTO M, MILI L. A robust prony method for power system electromechanical modes identification[C] // Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2017: 1-5.

[63] 吴　超，陆　超，韩英铎，等. 基于类噪声信号和 ARMA-P 方法的振荡模态辨识[J]. 电力系统自动化，2010，34(6)：1-6.
WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Identification of mode shape based on ambient signals and ARMA-P method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 1-6.

[64] 刘思议，张　程，金　涛. 基于相邻系数 TQWT 与改进 TLS-ESPRIT 算法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 高电压技术，2019，45(3)：890-898.
LIU Siyi, ZHANG Cheng, JIN Tao. Research on modes identification of low-frequency oscillation of power system based on adjacent coefficient TQWT and improved TLS-ESPRIT algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 890-898.

[65] 张　程，刘佳静，匡　宇，等. 基于 FastICA 技术与 TLS-ESPRIT 方法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2214-2222.
ZHANG Cheng, LIU Jiajing, KUANG Yu, et al. Power system low frequency oscillation modal identification based on the FastICA technique and TLS-ESPRIT algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2214-2222.

[66] JAIN S K, SINGH S N. Exact model order ESPRIT technique for harmonics and interharmonics estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61 (7): 1915-1923.

[67] HOSUR S, DUAN D L. Subspace-driven output-only based change-point detection in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1068-1076.

[68] PATERNINA M R A, TRIPATHY R K, ZAMORA-MENDEZ A, et al. Identification of electromechanical oscillatory modes based on variational mode decomposition[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 167: 71-85.

[69] 赵兰明，李　宽，张友泉，等. 基于 FastICA-MP 算法的次同步振荡模态参数辨识[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(8)：37-42.
ZHAO Lanming, LI Kuan, ZHANG Youquan, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA-MP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 37-42.

[70] 马宁宁，谢小荣，唐　健，等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2021，61(5)：457-464.
MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian, et al. Wide-area measure-

ment and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 457-464.

[71] 王渝红，王宏宇，于光远，等. 基于同步相量数据的次同步振荡检测与模态参数辨识方法[J/OL]. 高电压技术，2022：1-12 [2023-01-13]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20220991.
WANG Yuhong, WANG Hongyu, YU Guangyuan, et al. Sub-synchronous oscillation detection and modal parameter identification method based on synchrophasor[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-12[2023-01-13]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20220991.

[72] WANG Y, JIANG X L, XIE X R, et al. Identifying sources of subsynchronous resonance using wide-area phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3242-3254.

[73] ZHANG F, LIU J. Parameter identification with synchrophasor tra-jectory fitting technique for sub-/super-synchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3181-3184.

[74] 靳宗帅，张恒旭，石 访，等. 宽频带同步测量技术与应用[J]. 中国电机工程学报，2022，42(7)：2497-2507.
JIN Zongshuai, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Synchronized wideband measurement technology and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2497-2507.

[75] CHEN L, MIN Y, CHEN Y P, et al. Evaluation of generator damping using oscillation energy dissipation and the connection with modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1393-1402.

[76] 董 清，梁晶，颜湘武，等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报，2012，32(1)：78-83.
DONG Qing, LIANG Jing, YAN Xiangwu, et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.

[77] 刘志雄，黎 雄，孙元章，等. 广域 PSS 闭环控制工程中可变时滞及其处理[J]. 电力系统自动化，2013，37(10)：54-59.
LIU Zhixiong, LI Xiong, SUN Yuanzhang, et al. Variable delay and its treatment in wide-area PSS closed-loop control engineering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 54-59.

[78] XIE X R, LIU W, LIU H, 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.

[79] 王渝红，闵杨晰，于光远，等. 基于 Sobol 方法阻抗灵敏度分析的双馈风机系统次同步振荡参数协调优化[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1703-1713.
WANG Yuhong, MIN Yangxi, YU Guangyuan, et al. Parameters coordinated optimization of subsynchronous oscillation of doubly fed induction generator system based on impedance sensitivity analysis with Sobol method[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1703-1713.

[80] WANG L, XIE X R, JIANG Q R, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power System, 2015, 30(5): 2772-2779.

[81] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Damping DFIG-associated SSR by adding subsynchronous suppression filters to DFIG converter controllers[C]// Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[82] GHAFOURI M, KARAAGAC U, KARIMI H, et al. An LQR controller for damping of subsynchronous interaction in DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4934-4942.

[83] 王 杨，杨汉芦，肖先勇，等. 双馈风机附加次同步阻尼控制器抑制方法分析与优化设计[J]. 电力自动化设备，2022，42(8)：184-190.
WANG Yang, YANG Hanlu, XIAO Xianyong, et al. Mitigation method analysis and optimization design of doubly-fed induction generator additional subsynchronous damping controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 184-190.

[84] LIU H K, XIE X R, LI Y, et al. Mitigation of SSR by embedding subsynchronous notch filters into DFIG converter controllers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11 (11): 2888-2896.

[85] ZHANG X G, XIA D N, FU Z C, et al. An Improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5143-5151.

[86] MA J, SHEN Y Q. DFIG active damping control strategy based on remodeling of multiple energy branches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4169-4186.

[87] EL-MOURSI M S, BAK-JENSEN B, ABDEL-RAHMAN M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 429-441.

[88] GOLSHANNAVAZ S, AMINIFAR F, NAZARPOUR D. Application of UPFC to enhancing oscillatory response of series-compensated wind farm integrations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1961-1968.

[89] XIE H L, LI B, HEYMAN C, et al. Subsynchronous resonance characteristics in presence of doubly-fed induction generator and series compensation and mitigation of subsynchronous resonance by proper control of series capacitor[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(4): 411-421.

[90] LIU Y C, RAZA A, ROUZBEHI K, et al. Dynamic resonance analysis and oscillation damping of multiterminal DC grids[J]. IEEE Access, 2017, 5: 16974-16984.

[91] 从兰美，李啸骢，徐俊华，等. 提高电力系统稳定性的直流附加阻尼与发电机励磁非线性协调控制[J]. 电网技术，2019，43(01)：193-199.
CONG Lanmei, LI Xiaocong, XU Junhua, et al. Coordinated nonlinear control of HVDC supplementary damping with generator excitation for enhancing stability of power system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 193-199.



王渝红
1971—，女，博士，教授，博导
研究方向为电力系统稳定与控制高压直流输电、电力系统和稳定与控制、新能源并网
E-mail: yuhongwang@scu.edu.cn

WANG Yuhong
Ph.D., Professor



王馨瑶
1999—，女，博士生
研究方向为新能源并网、电力系统稳定、高压直流输电等
E-mail: wangxyoa@163.com

WANG Xinyao
Ph.D. candidate



廖建权(通信作者)
1994—，男，博士，副研究员
研究方向为柔性直流输配电网的保护与控制、电力系统稳定等
E-mail: jquanliao@scu.edu.cn

LIAO Jianquan
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2022-09-19 修回日期 2023-06-11 编辑 何秋萍