电力系统振荡研究进展

谢小荣*, 李浩志

清华大学电机系, 电力系统及大型发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

2019-12-16 收稿, 2020-01-05 修回, 2020-01-06 接受, 2020-01-07 网络版发表

国家自然科学基金(51925701, 51737007)资助

摘要 电力系统是现代社会的的重要基础设施, 也是迄今世界上最大最复杂的人造系统之一, 其主体是建立在50/60 Hz工频上的自持振荡系统; 但电力系统内部机械、电磁或其耦合的多时间尺度动态在特定条件下可能引发工频之外的往复能量交换, 即所谓“电力系统振荡”, 会影响电网正常运行, 造成稳定性或电能质量问题, 危及设备个体和系统整体的安全性. 本文探讨了电力系统振荡的概念和分类, 回顾了电力系统振荡(包括低频振荡、汽轮机机组次同步谐振和风电次/超同步振荡)的研究历史, 并对新一代电力系统在高比例可再生能源和电力电子设备接入背景下面临的宽频带振荡问题进行了评述, 展望了其建模、分析与控制研究的新挑战.

关键词 电力系统, 低频振荡, 次同步谐振/振荡, 宽频带振荡, 阻尼控制

电力系统历经140多年的发展, 已经成为现代社会生产生活的基础性支柱. 安全稳定性是电力系统运行的基本要求, 也是电力科技进步的持续动力. 而“振荡”作为安全稳定性的重要侧面, 是电力系统发展过程中挥之不去的“困扰”. 本文尝试探讨电力系统振荡的基本概念, 回顾其研究历程, 展望新一代能源电力系统背景下振荡研究的新挑战.

1 振荡的概念及作用

1.1 振荡释义

“振荡”一词见诸我国古典文学著作中. 如西汉贾谊被贬长沙, 作《鵬鸟赋》^[1], 其中一句为“万物回薄兮, 振荡相转”, 说的是天地宇宙的循环运动, 人与万物的生灭轮回; 三国曹植在其名作《洛神赋》^[2]中“余情悦其淑美兮, 心振荡而不怡”, 采用振荡一词来描写人、神相恋而无法在一起那种闷闷不乐的心情, 属于个人“小宇宙”的动态过程.

根据在线词源词典(online etymology dictionary, www.etymonline.com/word/oscillation), 英语中oscillation一词大概出现于17世纪50年代, 源于法语词“oscillation”或更早拉丁语中的“oscillationem”、“oscillare”和“oscillatio”等, 用于表示“一种物体来回摇摆的振动”, 典型如钟摆. 到19世纪中叶, oscillation一词开始用于描述电学科中电流、电压、电磁波等电变量或电路、电网络和电系统等电对象的交变(动态)特性(www.oed.com/view/Entry/132942?redirectedFrom=oscillation&). 如今, 振荡(oscillation)一词已用于描述几乎所有具体或抽象的(近似)周期性运行或变化, 广泛应用于数学、物理学、电气、生物乃至社会学、经济学等各门学科中.

电力系统是以电气为主并包含电子、信息、机械等的综合复杂系统, 也采用“振荡”一词来描述其内在各种变量(如电压、电流、功率)、部件(如发电机、变压器)、子系统及整体的周期性变化特性和/或动态过程. 现代电力工业的主体是构建在50和/或60 Hz工作频率(简称“工频”或“基波”)上的交流电(alternative current,

引用格式: 谢小荣, 李浩志. 电力系统振荡研究进展. 科学通报, 2020, 65: 1119–1129

Xie X R, Li H Z. Advances on power system oscillation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1119–1129, doi: [10.1360/TB-2019-0834](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0834)

AC)系统,或可称为工频振荡系统,包括少量的0 Hz直流(direct current, DC)部件.理想条件下,电力系统将产生、传输和供应标准50或60 Hz(少量0 Hz直流)的电压和电流.在这一语境下,通常所说的“电力系统振荡”则是指其变量、部件乃至整体在特定条件下出现了工频之外“寄生”的或机械、或电磁或其耦合的动态变化或往复能量交换过程,当这种动态变化或能量交换危及系统正常运行时,将造成稳定性或电能质量问题,影响甚至危及设备个体和系统整体的安全性.因此,电力系统振荡是电力系统规划、运行和控制中需要预防、避免和抑制的不利性问题,是现代电力工程研究中的重大技术挑战.

1.2 工频振荡在电力系统发展中的作用

电力系统的发展始于19世纪70年代.1875年,法国巴黎火车站建成世界上第一座火电厂;1879年,美国旧金山实验电厂对外售电^[3];1882年,美国发明家爱迪生在纽约曼哈顿建立了包括6台发电机,总容量约670 kW、110 V直流供电的珍珠街集中发电站^[4].这些早期的供电系统都采用直流电,但很快其局限性就体现出来了:难以实现变压,而低电压运行则损耗大,不适应大容量、远距离输电,也不便于联网运行,限制了系统的规模效应^[5].

差不多同时,美国西屋公司在尼古拉·特斯拉多个专利技术基础上开始构建多相交流电力系统^[5,6].之后,交流和直流之间的“战争”持续了10多年,直到1895~1896年西屋公司建成了尼亚加拉瀑布电力系统,包括3台3675 kW的水轮发电机,25 Hz水电通过变压器升压到11 kV后向17.7 km外的水牛城供电,“令人信服地展示了多相特斯拉系统作为通用供电系统的优势”^[7],从而结束了长时间的交直流之争,使得交流电逐渐成为电力系统发展的主流方向^[6,7].

20世纪,交流输电系统得到了迅猛发展,在三相、50或60 Hz工频基础上,旋转发电机产生工频电压/电流,借助变压器电磁感应实现高效变压,电网在不同的电压等级上互联扩展,最终在用户端转化为所需的诸如机械能、光能、热能等其他能源形式,而作为负荷的主体之一——电动机则是以交流电产生的旋转磁场而推动机械运动.可以说,工频振荡是现代电力系统得以存在和发展的基础.虽然以1957年晶闸管诞生为标志的电力电子技术发展,提供了新的交/直流变换技术,进而推动了高压直流(high voltage direct current,

HVDC)输电的发展,但长期以来HVDC仍只是应用于少数交流输电不太合适的地方,如50/60 Hz背靠背联网、海底输电、平衡距离以上的海缆或架空线输电.现在,电力系统已成为世界上最大最复杂的人造系统之一,而其主体仍是建立在50/60 Hz工频上的自持或强迫振荡系统.以我国电力系统为例,目前通过交直流互联已形成了一个基本覆盖全域、电压等级涵盖从380/220 V AC到1000 kV AC/±1100 kV DC特高压的巨型复杂系统.截至2018年底,总装机容量达19 GW,仅220 kV及以上的输电线路总长度就超过 73.3×10^4 km(其中交流线路占比约95%)^[8],可以绕地球18圈多.

1.3 电力系统振荡相关概念及其关系

电力系统振荡相关的主要概念和术语如下.

(1) 振荡(oscillation).根据1.1的定义,可分为工频振荡和非工频振荡.前者是交流电力系统运转的基础,而后者是维持电力系统安全稳定运行所需避免的,也是通常作为“问题”所指的电力系统振荡.

(2) 模式(mode).是系统的固有振荡/振动特性.线性系统的自由振荡/振动可被解耦为多个正交的单自由度振荡/振动系统,每个对应原系统的一个模式,具有特定的频率、阻尼比和振型.电力系统中存在各种形式的振荡模式,譬如,大型汽轮发电机组组系的机械扭转模式、多机之间的机电振荡模式、电网的电磁振荡模式、复杂控制系统的控制模式,等.

(3) 谐振/共振(resonance).在物理学和电气工程领域里,谐振/共振是指当激励(策动力)的频率与系统的固有频率相等或接近时,系统振荡/振动的振幅将达到最大值或足以破坏系统的正常运行.因此,讨论谐振/共振时,往往涉及两个频率或模式,即激励(策动力)的频率(模式)和受激励系统的固有频率(模式).

(4) 振荡/谐波稳定性(oscillatory/harmonic stability).指特定模式或频率的振荡/谐波动态在小扰动或大扰动情况下能否收敛的特性.如果振荡/谐波幅值不断增长或持续存在并威胁系统和设备安全运行,则为不稳定;反之,其幅值在容许范围内且呈逐渐收敛的情况,则为稳定的;通常可根据模式的阻尼来判定其稳定性.

(5) 谐波(harmonic)、间谐波(inter-harmonic)、次谐波(sub-harmonic).电力系统中的电压/电流或功率信号在理想情况下为工频正弦或直流,但在特定情况下会呈现非正弦周期信号的特点,也就是说会出现非工频的谐波分量.根据谐波频率跟工频的关系,可分为整

数次谐波(谐波频率为工频的整数倍)、间谐波(谐波频率为工频的非整数倍)和次谐波(谐波频率低于工频)等多种情况,当上述各种谐波分别或综合超过某种设定的容限时,就会导致电能质量问题。

理解上述概念和术语之间的相互关系非常重要。

(1) 振荡与谐振的关系. 这两个词在电力系统动态分析中存在一定的“混用”现象,譬如次同步谐振和次同步振荡,电气振荡和电气谐振;但严格意义上,谐振是指频率相同或接近的两个模式(可能一个是激励另一个是固有模式,也可能两个都是固有模式)之间相互作用,进而引发大幅度振荡的现象。因此,也可以说振荡比谐振的含义要更广一些。

(2) 模式与谐波的关系. 模式用于反映系统固有的动态特性,跟微分方程和稳定性密切相关;而谐波是对非正弦周期性信号所包含成分的描述,多为(准)稳态特性,多作为电能质量的指标之一。系统的振荡模式被激发时,可能在电压、电流中引起谐波分量;但反之,电压、电流中出现谐波分量时则并不一定表示系统中有被激发的固有振荡模式,也可能是由非线性引起的,譬如某些电源或负载的非线性特性会导致电压或电流畸变,引发谐波,降低电能质量。

(3) 振荡/谐波稳定性与作为电能质量问题的(间/次)谐波之间的关系. 跟模式与谐波的关系类似,振荡/谐波稳定性是系统的动态特性,而(间/次)谐波是电压、电流等信号的波形特征,并被用作电能质量的指标之一。当振荡模式稳定时,电压或电流中对应模式频率的分量会逐渐衰减直到消失;而当振荡模式不稳定时,可能使得电压或电流中持续存在对应频率的间/次谐波分量,恶化电能质量,因此不稳定的振荡必然会引起谐波(而且多为跟工频无关的间/次谐波)。但反之不成立,谐波特别是整数次谐波还可能来源于非线性(如饱和)带来的波形畸变。简言之,振荡/谐波稳定性是系统的内在特性,而作为电能质量问题的谐波是系统中电压、电流等信号的外在表征,前者可引起后者,但后者并不一定源于前者。

2 电力系统振荡的分类

电力系统振荡可从不同角度进行分类。

(1) 从主导的物理过程来看,可分为机械振荡(如汽轮机组的轴系扭振)、机电振荡(如多机系统中的低频、超低频振荡)、电磁振荡(如输电线路中电感-电容构成的纯电气振荡)、控制振荡(如具有共轭复数特征

值的二阶控制器振荡),等。电力系统是一个由机械、电磁、控制以及可能包含更多种物理过程的负荷等构成的复杂系统,不同物理过程的振荡处于共存且相互作用的状态,特别是当它们的模式频率接近时,甚至会引起共振或谐振现象。典型的如次同步谐振中的扭振相互作用(torsional interaction, TI),即为机组轴系机械系统的扭振与串联电容补偿电网的电磁振荡相互作用形成的(近)谐振/共振现象。

(2) 从振荡的策动力或激励源来看,可分为自由振荡(natural oscillation)和强迫振荡(forced oscillation)。前者是指在没有外在激励源持续作用下或短期扰动消失后系统按照固有模式的自行振荡过程。如果固有模式是稳定的,则往往会在短期扰动(如电力负荷变化、系统拓扑变化乃至短路故障)作用下系统偏离平衡点后被触发并显示出来,然后逐渐衰减,直到稳定到(新的)平衡点。而如果系统存在不稳定的振荡模式,则即使没有任何扰动,自由振动也会自激发而显现,振幅逐渐增大,直到超过容许值而导致保护动作乃至设备损坏,或者由于非线性作用而进入持续等幅振荡,即所谓极限环状态。强迫振荡,也称为受迫振荡,是指系统在周期性外力(称为策动力、驱动力或强迫力)作用下产生的持续振荡现象。此时系统显现的振荡频率与策动力频率相同,一般与内在自由振荡模式的频率无关;而一旦与系统固有振荡模式频率一致或接近时,则会引发共振/谐振,导致振幅急剧增大,乃至危及设备安全。在实践中,由于作为研究对象的“目标系统”的范围是可以根据需要改变的,因此自由振荡和强迫振荡也会视“系统”范围不同而相互转化。譬如,一个包含风电、火电的电力网络系统,风电机组与电网之间相互作用会引发次同步频率的振荡模式(模式1),而火电机组轴系存在固有的次同步频率机械扭振模式(模式2),模式1和模式2分别为风电并网系统和火电机组的自由振荡模式。当以火电机组为研究对象时,模式1振荡相当于外在的驱动力,会在火电机组上产生强迫振荡。但是也可以将风电-火电和互联网络构成的整体作为一个大的研究对象,此时模式1和模式2均变成了“大”系统的自由振荡模式^[9-12]。

(3) 从频率高低来看,可分为(超)低频振荡(振荡频率 $f \leq 2.5$ Hz)、次同步振荡($2.5 \text{ Hz} < f \leq 45/55$ Hz)、超同步振荡($50/60 \text{ Hz} < f < 100/120$ Hz)、中高频(谐波)振荡($f > 100/120$ Hz)。需要注意的是,这里的频率有可能是不同物理量的频率。早期研究同步发电机参与的(超)低频

振荡、次同步谐振/振荡时,其频率多指该振荡引起的基波功率或电压、电流有效值的波动频率,而电压、电流瞬时值中振荡分量的频率则跟该频率呈互补关系(即两者之和或之差的绝对值等于工频);而近期提到的与电力电子控制相关的低频振荡、次/超同步振荡和中高频(谐波)振荡,其频率则多指该振荡引起的电压、电流瞬时值中基波分量以外的主导振荡分量的频率。

3 电力系统振荡研究的历史回顾

电力系统的发展史也是一部与振荡问题持续“斗争”的历史。早期交、直流之间的“战争”交流电胜出,奠定了工频振荡作为发-输-用电的基础,此后交流电力系统得到持续快速发展,逐渐进入高电压、大机组、广地域的大规模互联电力系统时代,发展过程中先后出现了各种振荡问题。早在1919年,Carson^[13]就研究了输电网络的振荡问题;1926年左右,Evans和Wagner^[14]提出了机电振荡(electromechanical oscillation)的概念;20世纪30年代前后,Park^[15]、Nickle和Pierce^[16]、Concordia^[17]研究了同步发电机的低频振荡问题。差不多同时,Butler和Concordia^[18]也认识到旋转电机对于电网中电抗与串补电容引起的次同步频率电流呈感应发电机效应,进而导致电气振荡或自励磁;1970~1971年美国Mohave电厂先后发生两次因扭振相互作用而引发的大轴损坏事件;它们与其后出现的暂态扭矩放大被统称为次同步谐振^[19]。此后,又相继发现电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)、直流换流站、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、变速驱动以及其他宽频电力控制设备也会恶化旋转电机某些扭振模式的阻尼,导致扭振,它们均被冠以“次同步振荡”^[20,21]。进入21世纪后,随着风电、光伏为代表的新能源的迅猛发展,其与交直流电网的相互作用引发新型次/超同步振荡问题,如美国德州、我国冀北沽源和新疆哈密等大规模风电并网系统先后于2009、2011和2015年发生了严重的次/超同步振荡事件,造成了风电机组损坏、大规模脱网乃至引发临近火电机组跳闸的恶劣后果^[22~24]。近年来,基于可关断电力电子器件的大容量变流装置在输电系统中加速应用,如柔性直流输电,导致数百上千赫兹的谐波振荡,正引发广泛的关注^[25]。

从时间先后顺序来看,早期是大型机组互联引起的低频(机电)振荡(low-frequency/electromechanical oscillation, LFO),然后是大型汽轮机组相关的次同步谐振/振荡(subsynchronous resonance/oscillation, SSR/

SSO),再而是风电机组相关的次/超同步振荡。而随着新一代电力系统中“双高”(即高比例可再生能源和高比例电力电子设备)发展趋势的来临,控制动态主导的频率涵盖从数Hz到数千Hz的宽广范围的“宽频”振荡(wide-band oscillation)问题正在凸显,将成为电力系统发展中新的重大技术挑战之一。

分别用低频振荡(low-frequency oscillation)、次同步谐振/振荡(subsynchronous resonance/oscillation)、风电次同步谐振/振荡(wind + subsynchronous resonance/oscillation)作为主题词(key word),在Web of Science数据库进行检索。计算历年文献数占电力系统稳定性研究方向文献的比例,得到逐年的文献分布情况如图1所示。可见,低频振荡的研究始于1962年前,并在20世纪70~80年代和2010年左右各有一个研究高潮。对汽轮机组次同步振荡的大量研究约始于1969年,并在20世纪70年代中后期达到高潮,然后逐渐衰减。风电次同步振荡方向的研究始见于2006年,相关研究目前仍处稳步上升阶段。

3.1 低频振荡

低频振荡于1964年在美国西部电网早期著名的联网工程,即西北(Northwest)电网和西南(Southwest)电网互联时出现^[26]。在格兰峡谷(Glen Canyon)附近联网运行后,发现大量机组的扭矩、转速和输出功率中出现0.1 Hz左右持续波动,严重影响系统的安全运行和区间交换容量。后经大量理论与试验分析,发现该低频振荡的发生机理:多个大型发电机组的机械惯性系统,通过电网的电磁耦合构成类似于含多质块的弹簧振子体系。以图2所示的两机系统为例,振荡频率决定于惯性时间

图1 电力系统振荡文献分布情况

Figure 1 Annual distribution of the literatures on power system oscillation

常数和等效弹性系数。由于汽轮机组惯性较大, 振荡频率较低, 通常在0.01~2.5 Hz范围, 且随着系统规模的扩展, 总体惯性增加, 振荡模式的频率会更低。对于一个包含 N 台机组的互联电力系统, 理论上存在 $N-1$ 个低频振荡模式, 包括单个机组对其他机组整体的本地模式(local mode)、区域内机组之间的区内模式(intra-area mode)和区域电网之间的区间模式(inter-area mode)。

从图1可见, 低频振荡分析与控制的研究长盛不衰, 早期以本地模式和区内模式为主, 主要研究如何改善发电机的励磁控制(excitation control)来抑制低频振荡。早在20世纪70年代提出的PSS已逐渐成为发电机组控制的标配功能, 并形成了诸如PSS1A、PSS2B、PSS3B、PSS4B等标准化模块。我国从1980年开始大量开展该方向的研究, 在PSS基础上进一步发展出线性最优控制(linear optimal control, LOC, 20世纪80年代初)^[27,28]、非线性励磁控制(nonlinear excitation control, NEC, 20世纪80年代末)^[29]和最优分散协调控制(optimal decentralized coordinated control, 20世纪90年代)^[30]等技术, 来解决多机系统的低频振荡问题, 取得了丰富的理论和实践成果。

进入21世纪以来, 电网的规模更大。以我国而言, 开展了全国联网工作, 国家电网辖内形成了从东北电网最北端伊敏电厂, 跨华北、华中电网, 直达西南川渝电网最西南端二滩电厂的地理跨度达4000多千米、总容量达499 GW的超大规模长链式电网。而南方电网也形成了从云南最西端到广东最东端, 跨越云、桂、贵、粤四省的地理跨度达2000 km、总容量达307 GW的大规模长链式电网。导致低频振荡的频率更低(最低达 10^{-2} Hz量级)、振荡覆盖机组更多和地域更广, 而局部测量对振荡的可观性较差, 导致机组的局部控制(如此前的PSS)往往不能很好地抑制区间(超)低频振荡问题。为突破这一技术瓶颈, 21世纪初开始发展基于同步相量(synchrophasor)的广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)^[31]和广域阻尼控制(wide-area

damping control)技术^[32,33]; 基于高精度的卫星授时、大范围的实时通信、灵活定制的信息结构和强大的计算决策能力, 实现对低频振荡在全系统范围的监测、预警和闭环控制。

3.2 汽轮机组的次同步谐振/振荡

1970年以前, 电力系统的动态分析只是将发电机组轴系看成一个单质块刚体, 没有意识到机械扭振模式会参与形成系统动态乃至引发不稳定性。直到1970年底和1971年美国Mohave电厂先后发生两次大轴损坏事件, 人们才认识到汽轮机组机械系统本身就是一个多质块-弹簧体系, 存在次同步频率的固有扭振模式, 且其与串补电网之间相互作用可能导致包括扭振互作用、感应发电机效应(induction generator effect, IGE)和暂态扭矩放大(torque amplified, TA)在内的SSR风险^[19,34]。1977~1980年间, 美国西部电网的Navajo电厂^[35]、San Juan电厂^[36]相继出现SSR问题。同时, 加拿大Lambton电厂发现PSS也会恶化低阶扭振模式的阻尼, 进而导致扭振^[36]。1977年10月, 在美国Square Butte HVDC系统调试中发现直流换流站与相邻汽轮发电机组的低阶扭振模式相互作用, 导致HVDC-TI现象^[37]。随后将PSS、HVDC、SVC及其他控制设备与邻近汽轮机组之间相互作用引发的次同步频率振荡统称为装置型次同步振荡(device dependent SSO)^[38]。在这些实际问题的驱动下, 学术界和工业界对SSR/SSO开展了深入的研究, 提出了诸如频率扫描、复转矩系数法、特征值法等风险评估方法和10多种控制、保护措施^[39], 其中扭应力继电器(torsional stress relay, TSR)、附加励磁阻尼控制(supplementary excitation damping control, SEDC)、阻塞滤波器(blocking filter, BF)和基于晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)的动态稳定器等均在美国1970~1980年的SSR/SSO防控工程中得到实际应用。IEEE电力系统工程委员会还成立了一个专门工作组来推动SSR/SSO的研发工作^[40]。

图2 (网络版彩色)低频振荡的基本原理。(a) 两机系统; (b) 弹簧振子系统

Figure 2 (Color online) Principle of low-frequency oscillation. (a) Two-generator system; (b) spring system

20世纪末至今,美国等西方国家中新增火电机组和串补装置减少,次同步振荡问题不再突出.而进入21世纪以来,中国、印度、巴西等国的串补和直流工程增多,导致SSR/SSO问题再次凸显(图3(a)),从而引发了新一轮的理论研究和工程实践.作者团队自2006年开始,先后参与我国上都、托克托、锦界以及印度KMPCIL等多个大型火电厂SSR/SSO防控工程的研发,取得了一些理论和实践成果.(1)分析方面.构建了次同步振荡的多维度定量分析理论,揭示了其在时间-空间和性能上的多维度特征,将评估结果从单一性指标扩展到多性能定量指标,大幅提高了电磁和机械应力的计算精度.(2)控制方面.提出了次同步振荡的机-网协同优化控制方法,解决了此前控制技术效能较低和鲁棒性差的问题,实现了机-网运行方式多变条件下多模式振荡的高效、鲁棒稳定.(3)装备和工程方面.研发了我国首套多模式优化SEDC、多时间尺度协调TSR以及国际上首台基于电力电子变流技术的机端次同步阻尼控制器(图3(b)),在上都电厂自主实施了我国首个电厂侧次同步谐振防控工程^[41,42].这些创新性研究成果推动了次同步振荡分析、控制技术的升级换代,填补了我国在次同步振荡控制、保护装备及工程应用领域的空白.

3.3 风电机组相关的次/超同步振荡

进入21世纪以来,风电、光伏等新能源发电技术迅速发展,其参与或引发的新型次/超同步振荡问题出现并引起广泛关注^[43].2009年10月,美国德州南部某

电网因线路故障造成双馈风电机组放射式接入串补电网,引发严重的次同步振荡并导致部分机组撬棒电路损坏^[18].2011年,我国冀北沽源地区风电场在低风速工况下多次出现次同步振荡事件,最严重时曾造成上千台风电机组脱网^[44].2015年7月1日,我国新疆哈密地区发生了大规模直驱风电机组与弱交流电网相互作用引发严重的次/超同步振荡,导致功率振荡频率接近电网“花园”电厂火电机组的固有扭振频率,激发严重的轴系扭振,造成该厂3台机组跳闸,系统频率短暂急剧下降^[24].

新型次/超同步振荡主要源于多变流器控制与交直流电网之间在次/超同步频率范围的动态相互作用,与旋转机组惯性和轴系动态主导的传统机电(低频)振荡、次同步谐振/振荡有本质的区别,具体振荡现象参见文献^[45~47].其分析与控制面临诸多新的挑战,包括:(1)机理不清晰,难以系统诠释风电次/超同步振荡的原理、条件与特征;(2)传统建模/分析方法,如时域状态空间模型-特征值分析方法、单输入单输出阻抗模型-奈奎斯特判据等,在评估实际系统(多个风电场、大量异构风电机组、黑/灰箱设备)次/超同步振荡时面临巨大困境,难以实现对振荡频率、阻尼、灵敏度等的精准定量分析;(3)理论上需解决系统工况和振荡频率时变条件下的自适应和/或鲁棒控制难题,实践中缺乏抑制风电次/超同步振荡的高效控制装备.

针对上述挑战,作者团队依托冀北沽源、新疆哈密等实际工程,开展了“产-学-研-用”联合技术攻关,在机理、分析与控制等方面取得了一些重要进展,包

图3 (网络版彩色)次同步谐振损坏的机组轴系(a)和研发的振荡控制、保护装备(b)

Figure 3 (Color online) Damage caused by SSR (a) and anti-SSR control & protection (b)

括: (1) 提出了次/超同步振荡类“电阻-电感-电容(RLC)串联谐振”的电路诠释, 阐明了风电机组及其电力电子控制与电网动态相互作用导致负阻尼电磁振荡的机理, 为工程上理解、分析和解决这一新型稳定性问题提供了新思路. (2) 构建了“结构保留”和互补频率耦合的阻抗网络模型, 提出了基于聚合阻抗频率特性的稳定性判据和定量分析方法^[48], 提供了精准、高效评估大型风电系统次/超同步振荡风险的新途径. (3) 提出了机组侧阻抗重塑与电网侧次/超同步阻尼控制(grid-side sub/super-synchronous damping control, GSDC)相协同的抑制策略(图4(a)), 构建了基于阻抗模型全工况优化的控制参数设计方法, 研制了国际上首台网侧次/超同步阻尼控制装置(图4(b)), 为解决工况多变和频率时变条件下的振荡抑制难题提供了新的方法和装

备^[49].

4 电力系统振荡研究的新挑战

新一代能源电力系统的突出特点之一是“双高”, 即高比例可再生能源和高比例电力电子设备(后者又被部分专家称为“电力系统电力电子化”). 如图5所示, 电源侧, 风光等可再生能源持续增长, 2016年我国新增装机中风电、光伏占比已超过燃煤机组, 达到41.8%, 其中绝大部分通过电力电子变流器接入系统; 电网侧, 基于电力电子技术的(特)高压直流、柔性交流和直流输电技术广泛应用; 用户侧, 基于变流器的分布式发电、直流配网和微电网技术蓬勃发展. “双高”趋势正显著改变系统的动态行为, 带来新的振荡问题. 据不完全统计, 近期国内外有多个系统发生了严重振荡事件,

图4 (网络版彩色)风电次/超同步振荡的机-网侧协同控制策略(a)及网侧阻尼控制装置(b)

Figure 4 (Color online) Coordinated control strategy (a) and grid-side damping controller (b) to counteract sub/super-synchronous oscillation associated with wind power

图5 (网络版彩色)“双高”电力系统示意

Figure 5 (Color online) Power system with high penetration of renewables and power electronics

图6 (网络版彩色)宽频带振荡的实际案例
Figure 6 (Color online) Wide-band oscillation events

频率涵盖从数Hz到超kHz的宽广范围(图6); 宽频带振荡问题正严重威胁系统稳定、设备安全和用电质量, 制约可再生能源的高效消纳。

初步研究表明, 宽频带振荡发生的根源是可再生能源机组/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。因此, 精准认识进而高效改善该动态相互作用成为消除宽频带振荡的关键科学问题。然而, 由于大量异构设备多尺度控制动态的广谱性、集群而非个体行为的时变性, 以及复杂耦合作用的非线性, 宽频带振荡的建模、分析与控制极为困难, 主要表现在: (1) 宽频带下, 设备和系统的建模需要兼顾不同时间尺度的动态及其间复杂的耦合关系, 导致模型的结构、阶数和参量呈现出显著的频变和非线性特征。 (2) 宽频带振荡中多模式并存且随源-网方式变化而此起彼伏, 兼受扰动强弱影响而可能处在线性或非线性主导的不同阶段, 导致振荡模式的准确定位和振荡特征的定量分析面临前所未有的挑战。 (3) 实际复杂系统中, 多样化设备参与不同时间尺度耦合动态的复杂性、宽频带多模式振荡的频变性、机网运行方式的时变性, 使得控制系统的整体配置和参数设计面临巨大的适应性和鲁棒性难题, 而此前研发的次/超同步振荡控制技术与装备将难以适应振荡频率宽频时变的情况, 亟须升级更新。

因此, 亟须深入开展理论研究与实践探索, 重点需关注三方面的关键问题: 一是如何刻画多样化异构设

备、复杂电网及其耦合整体从数Hz至数千Hz广谱范围内的动态特性, 即广谱建模问题; 二是如何解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, 即宽频分析问题; 三是如何在各种运行方式和扰动场景下高效协调源/器-网动态行为以抑制宽频带振荡, 即协调控制问题。目标是构建新的理论方法体系, 解决“双高”电力系统宽频带振荡这一新问题, 进而推动可再生能源的持续增长和输配电系统的柔性化发展。

5 总结与展望

工频振荡是现代电力系统的工作基础和基本形态, 而系统中机械、电磁与控制相互作用引发的非工频振荡则是保障安全稳定运行所极力避免的动态行为。抑制非工频振荡的努力贯穿于电力工业的发展历程, 从多旋转机组之间的低频机电振荡、机械-电磁相互作用的次同步谐振/振荡到控制动态主导的次/超同步电磁振荡, 推动着电力系统振荡机理、建模、分析与控制的理论与技术发展。当今, 在高比例可再生能源和高比例电力电子(双高)背景下, 新一代电力系统将面临源/器-网多时间尺度动态相互作用引发的从数Hz至数千Hz宽频带振荡的新挑战, 亟须解决广谱建模、宽频分析、协调控制等关键科学问题, 构建新的理论与方法体系, 推动电气工程学科的创新发展和电力工业的清洁低碳化转型。

参考文献

- 1 Jia Y. Collected Works of Jia Yi (in Chinese). Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1975 [贾谊. 贾谊集. 上海: 上海人民出版社, 1975]
- 2 Cao Z. Collected Works of Cao Zijian (in Chinese). Beijing: Beijing Library Press, 2004 [曹植. 曹子建集. 北京: 北京图书馆出版社, 2004]
- 3 Zhou D. A brief history of the development of electric power industry in the world (in Chinese). Sino-Glob Energy, 2012, 17: 103 [舟丹. 世界电力工业发展简史. 中外能源, 2012, 17: 103]

- 4 Sulzberger C. Pearl Street in miniature: Models of the electric generating station. *IEEE Power Energy Mag*, 2013, 11: 76–85
- 5 Sulzberger C L. Triumph of AC-from Pearl Street to Niagara. *IEEE Power Energy Mag*, 2003, 1: 64–67
- 6 Sulzberger C L. Triumph of AC. 2. The battle of the currents. *IEEE Power Energy Mag*, 2003, 1: 70–73
- 7 Brittain J E. Electrical engineering hall of fame: Nikola Tesla. *Proc IEEE*, 2005, 93: 1057–1059
- 8 China Electricity Council (CES). Data List of National Electric Power Industry Statistics Express in 2018 (in Chinese). Beijing: CES, 2019 [中国电力企业联合会. 2018年全国电力工业统计快报数据一览表. 北京: 中国电力企业联合会, 2019]
- 9 Xie X R, Liu H K, He J B, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2016, 36: 2366–2372 [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. 中国电机工程学报, 2016, 36: 2366–2372]
- 10 Tang Y. Fundamental theory of forced power oscillation in power system (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2006, (10): 29–33 [汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论. 电网技术, 2006, (10): 29–33]
- 11 Chen L, Min Y, Chen Y P. Study on internal resonance in power system low frequency oscillation (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2014, 38: 160–167 [陈磊, 闵勇, 陈亦平. 电力系统低频振荡中的内共振现象研究. 电网技术, 2014, 38: 160–167]
- 12 Ye H, Song Y B, Liu Y T. Forced power oscillation response analysis and oscillation type discrimination (in Chinese). *Proc CSEE*, 2013, 33: 197–204, 29 [叶华, 宋佑斌, 刘玉田. 强迫功率振荡响应解析与振荡类型判别. 中国电机工程学报, 2013, 33: 197–204, 29]
- 13 Carson J R. Theory of the transient oscillation of electrical networks and transmission systems. *Proc AIEE*, 1919, 38: 407–489
- 14 Evans R D, Wagner C F. Studies of transmission stability. *J AIEE*, 1926, 45: 374–383
- 15 Park R H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. *Trans AIEE*, 1929, 48: 716–727
- 16 Nickle C A, Pierce C A. Abridgment of stability of synchronous machines: Effect of armature circuit resistance. *J AIEE*, 1930, 49: 134–138
- 17 Concordia C. Two-reaction theory of synchronous machines with any balanced terminal impedance. *Electr Eng*, 1937, 56: 1124–1127
- 18 Butler J W, Concordia C. Analysis of series capacitor application problems. *Electr Eng*, 1937, 56: 975–988
- 19 Ballance J, Goldberg S. Subsynchronous resonance in series compensated transmission lines. *IEEE Trans Power App Syst*, 1973, 92: 1649–1658
- 20 IEEE Committee Report. Second supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems. *IEEE Trans Power App Syst*, 1985, 104: 321–327
- 21 Xie X R, Wang L P, He J B, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2017, 41: 1043–1049 [谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析. 电网技术, 2017, 41: 1043–1049]
- 22 Adams J, Carter C, Huang S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation. *PES T&D 2012. IEEE*, 2012. 1–5
- 23 Wang L, Xie X, Jiang Q, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 30: 2772–2779
- 24 Liu H, Xie X, He J, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 32: 4708–4720
- 25 Lv J, Dong P, Shi G, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration (in Chinese). *Proc CSEE*, 2015, 35: 4852–4860 [吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经MMC-HVDC并网的次同步振荡及其抑制. 中国电机工程学报, 2015, 35: 4852–4860]
- 26 Schleif F R, White J H. Damping for the northwest-southwest tieline oscillations-an analog study. *IEEE Trans Power App Syst*, 1966, PAS-85: 1239–1247
- 27 Wang Z H, Han Y D, Cui W J, et al. Synthetic analysis and performance of optimal excitation regulators. *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 1987, (1): 20–29 [王仲鸿, 韩英铎, 崔文进, 等. 最优励磁调节器的性能及综合分析. 清华大学学报(自然科学版), 1987, (1): 20–29]
- 28 Lu Q, Wang Z H, Han Y D. Optimal Control of Power Transmission System (in Chinese). Beijing: Science Press, 1982 [卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制. 北京: 科学出版社, 1982]
- 29 Sun Y Z, Lu Q, Gao J D. Nonlinear excitation control for multimachine system (in Chinese). *Proc CSEE*, 1989, (6): 18–24 [孙元章, 卢强, 高景德. 多机电力系统非线性励磁控制的研究. 中国电机工程学报, 1989, (6): 18–24]
- 30 Han Y D, Wang Z H, Chen H J. Optimal Decentralized Coordinated Control of Power System (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1997 [韩英铎, 王仲鸿, 陈淮金. 电力系统最优分散协调控制. 北京: 清华大学出版社, 1997]
- 31 Xie X R, Xin Y Z, Xiao J Y, et al. WAMS applications in Chinese power systems. *IEEE Power Energy Mag*, 2006, 4: 54–63
- 32 Xie X, Lu C. Optimization and coordination of wide-area damping controls for enhancing the transfer capability of interconnected power systems. *Electr Power Syst Res*, 2008, 78: 1099–1108
- 33 Xie X R, Xiao J Y, Tong L Y, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurement (in Chinese). *Automat Electron Power Syst*, 2004, 2: 37–40 [谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制. 电力系统自动化, 2004, 28: 37–40]

- 34 Bowler C, Ewart D, Concordia C. Self excited torsional frequency oscillations with series capacitors. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1973, 92: 1688–1695
- 35 Farmer R G, Schwalb A L, Katz E. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1977, 96: 1226–1232
- 36 Watson W, Coultres M. Static exciter stabilizing signals on large generators—Mechanical problems. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1973, 92: 204–211
- 37 Bahrman M, Larsen E V, Piwko R J, et al. Experience with HVDC-turbine-generator torsional interaction at Square Butte. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1980, 99: 966–975
- 38 IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee Power System Engineering Committee. Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations. *IEEE Trans Power App Syst*, 1985, 104: 1326–1334
- 39 IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee Power System Engineering Committee. Countermeasures to subsynchronous resonance problems. *IEEE Trans Power App Syst*, 1980, PAS-99: 1810–1818
- 40 IEEE Torsional Issues Working Group. A bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems. *IEEE Trans Power App Syst*, 1976, 95: 216–218
- 41 Xie X, Guo X, Han Y. Mitigation of multimodal SSR using SEDC in the Shangdu series-compensated power system. *IEEE Trans Power Syst*, 2011, 26: 384–391
- 42 Xie X, Wang L, Han Y. Combined application of SEDC and GTSDC for SSR mitigation and its field tests. *IEEE Trans Power Syst*, 2016, 31: 769–776
- 43 Xie X R, Liu H K, He J B, et al. On new oscillation issues of power systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 2821–2828 [谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析. *中国电机工程学报*. 2018, 38: 2821–2828]
- 44 Xie X, Zhang X, Liu H, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions. *IEEE Trans Energy Convers*, 2017, 32: 1117–1126
- 45 Shair J, Xie X, Wang L, et al. Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 2019, 99: 159–168
- 46 Li R, Lu Y, Liu H L, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2013, 37: 3073–3079 [栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析. *电网技术*, 2013, 37: 3073–3079]
- 47 Zhang J Y. Research on the mechanism of subsynchronous oscillations of wind farms in Hami (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 5447–5460 [张剑云. 哈密并网风电场次同步振荡的机理研究. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 5447–5460]
- 48 Liu H, Xie X, Liu W. An oscillatory stability criterion based on the unified dq-frame impedance network model for power systems with high-penetration renewables. *IEEE Trans Power Syst*, 2018, 33: 3472–3485
- 49 Zhang X, Xie X R, Shair J, et al. A grid-side subsynchronous damping controller to mitigate unstable SSCI and its hardware-in-the-loop tests. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2019.2930289

Summary for “电力系统振荡研究进展”

Advances on power system oscillation

Xiaorong Xie^{*} & Haozhi Li

State Key Laboratory of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^{*} Corresponding author, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

Power system is one of the largest man-made systems, which over the years has become the vital infrastructure for modern life. The foundation of today's power system is three-phase alternating current (AC), which is adopted as the main stream technology for its advantages in voltage transforming, wide-area networking and long-distance power transmitting. The AC power system is a self-sustained oscillatory system operating at nominal frequency, i.e., 50 or 60 Hz. However, the multi-time-scale dynamics in a power system, mechanical, electrical or their coupled are prone to cause the exchange of energy at wide range of frequencies other than the nominal one, which is collectively known as the oscillation issues in a power system. Such oscillations would lead to power quality degradation, equipment failure, or even worse, system instability. Actually, the development history of power system is also a history of continuous “battle” against the oscillation problems.

This article reviews the basic concepts and classification of the classical as well as emerging power system oscillations. The mechanism, origin and research advances of various oscillations are re-visited and discussed, from the earlier and long-standing low frequency oscillation (LFO), and then subsynchronous oscillation/resonance (SSO/SSR) associated with turbo-generators and wind turbine generators, to the latest wide-band oscillations involving the sophisticated dynamics of increasing renewables and power electronics in a power system.

LFO incident was reported for the first time in 1964 in American Western Interconnection, where the formation of a larger power system by combining two smaller one, i.e., Northwest and Southwest systems, caused power oscillation at about 0.1 Hz. Later studies showed that the multiple machines with mechanical inertial but electrically connected through networks function like a mass-spring system, leading to LFOs at a frequency ranging from 0.01 to 2.5 Hz, depending on the size of the system. Initially, excitation control was improved by adding the function of power system stabilizer (PSS) to mitigate LFO. Later, advanced control, including linear optimal control, nonlinear control and optimal decentralized coordinated control, were developed to solve the problem. Since 2000, the continuous increase of system size and coverage causes very-low-frequency oscillation issues, to address which, several new technologies, for instance, wide-area monitoring and control, flexible AC transmission system (FACTS) control, has been commissioned in China and around the world.

SSR/SSO is induced by the interactions between the multi-mass shaft of a turbo-generator and the series-compensated AC or HVDC transmissions. The frequency of power oscillation is subsynchronous, or less than the nominal frequency but generally above the 2.5 Hz. The first SSR incident was captured at Mohave Power generating Station in 1970. In China, however, SSR/SSO has been a severe stability concern since 2000, the time witnessing the widely usage of series compensation and HVDC to transfer electricity from remote coal-fueled power plants. After more than ten years' continuous research, we have developed effective tools and countermeasures, for instance, multi-dimensional analysis, optimized control and coordinated protection, to solve practical SSR/SSO problems in China and some other countries.

The integration of wind power introduces new interactive dynamics that involve wind turbine converters and AC grids. It is called sub-/super-synchronous control interaction (SSCI), which would result in a different type of oscillation from several Hz to double nominal frequency. Such sub/super-synchronous oscillations associated with wind power has entered people's vision since 2009 and gained widespread attention after the occurrence of several actual incidents in US and China. To address this new issue, we have developed novel frequency-domain modeling and analysis methods to quantify the risk first, and then control strategies on either generator/converters side or grid side to modify the interaction to stabilize SSCI. These methods and strategies have been put into practice, for instance in Guyuan and Hami systems in China, to verify their effectiveness.

At this moment, power system is undergoing profound changes, one of which is the rapid growth of renewables and power electronics in all sections, including generation, transmission and consumption of electricity. Such a change is triggering power system oscillations in a very wide band, i.e., from several Hz to several thousand Hz. The underlying reason is the multi-time-scale dynamic interactions among the huge number of converters and the increasingly complicated power grid. This leads to open challenges that are yet to be solved, including the need of: (1) Wide-spectrum models to represent the multi-time-scale dynamics; (2) advanced analysis methods to quantify the stability of wide-band oscillations; and (3) adaptive and coordinated controls to mitigate the oscillation under varying system conditions. In a nutshell, systematic and in-depth researches are required to establish new theories and methodologies for this emerging issue so as to promote the sustainable growth of renewable energy and the low-carbon development of power system.

power system, low frequency oscillation, subsynchronous resonance/oscillation, wide-band oscillation, damping control

doi: [10.1360/TB-2019-0834](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0834)