

新能源电力系统次同步振荡问题研究综述

肖湘宁 罗超 廖坤玉

(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

摘要 随着风力发电等新能源并网容量的增加,大功率电力电子技术的广泛采用,以多源多变换复杂交直流系统为组成架构的新能源电力系统逐渐形成,由此引发的次同步振荡新问题不断凸显,次同步振荡的概念和内涵不断延伸,它们的起因、表现形式、影响程度、监测和抑制方法等诸多错综复杂的问题再一次引起世界范围的广泛重视。本文首先总结新能源电力系统次同步振荡的基本问题与发展态势,并剖析我国次同步振荡问题的特点与表现,最后提出当前次同步振荡研究中的新问题,以及在抑制技术等方面面临的挑战与应对措施,以期推动我国次同步振荡问题的研究。

关键词: 新能源电力系统 风力发电机组 火力发电机组 次同步振荡 次同步控制相互作用
中图分类号: TM712

Review of the Research on Subsynchronous Oscillation Issues in Electric Power System with Renewable Energy Sources

Xiao Xiangning Luo Chao Liao Kunyu

(School of Electrical and Electronic Engineering North China Electric Power University
Beijing 102206 China)

Abstract With the increasing penetration of renewable energy sources, especially the wind power generation, and broad application of the high-power power electronic technology, electric power system with renewable energy sources is evolved, which is constituted by complicated AC-DC system with multi energy resources and multi conversions. As a result, new subsynchronous oscillation (SSO) problems are prominent constantly. The concept and connotation of SSO is extended gradually. And various intricate issues, such as their causes, forms, impact, monitoring and countermeasures attract wide attention throughout the world again. This paper firstly summarizes the basic issues and development trend of SSO, and analyzes the characteristics and forms of SSO problems in China. Finally, new issues of current SSO research, challenges ahead, especially in mitigation measures, and the corresponding strategies are put forward, aiming at promoting the SSO study in China.

Keywords: Electric power system with renewable energy sources, wind power generator, thermal power generator, subsynchronous oscillation, subsynchronous control interaction

0 引言

电力系统次同步振荡(Subsynchronous Oscillation, SSO)属于电力系统稳定性问题之一。回顾其研究发展历程,1985年IEEE SSR工作组(Subsynchronous Resonance Working Group, SSRWG)将其定义为:

电力系统受到扰动偏移其平衡点后出现的一种运行状态,在这种运行状态下,电网与汽轮发电机组之间在一个或多个低于系统同步频率的频率下进行显著能量交换,但不包括汽轮发电机组的刚体模式^[1]。在这里,电网一词包括串联电容补偿系统、直流输电系统以及其他大功率电力电子装置。

次同步振荡问题的开端是系统中容性负载或串补线路引发的次同步频率谐振,可追溯至20世纪

30年代,发电机带容性负载或者是空载长输电线路时,会出现机端电压不断上升导致电压失控的现象,属于自励磁问题,在异步条件下又称为感应发电机效应(Induction Generator Effect, IGE),其只涉及电气系统谐振^[2,3]。随后,在20世纪70年代,随着串联补偿输电线路的商业化应用,出现了大型火电机组经串补输电送出的轴系扭振相互作用(Torsional Interaction, TI)问题,如1970年12月和1971年10月美国Mohave电厂出现的两次严重的机组轴系扭振事故,造成了发电机大轴的损坏^[4]。之后又发现,在系统操作或者故障时,也可能激发暂态过程中的强烈扭振,造成机轴的疲劳累积损伤,这种现象被称为“暂态扭矩放大作用(Transient Amplification, TA)”。学者们将上述三种均涉及电气系统LC谐振的次同步振荡问题统称为次同步谐振(Subsynchronous Resonance, SSR)。

1977年,经现场试验确认,美国Squire Butte电厂出现的汽轮发电机轴系扭振现象与高压直流(HVDC)输电线路密切相关^[5],此外,美国的CU^[6]、IPP,瑞典的Fenno-Skan,印度的Rihand-Delhi等高压直流输电工程分析也都论证了次同步振荡存在的可能性。进一步研究发现,HVDC、静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)等快速功率调节装置都有可能激发扭振,这种振荡被称为“装置引起的次同步振荡”^[7]。由于这时不存在谐振电路,因此不再属于次同步谐振,而被统一称为“次同步振荡”。

近年来,随着电力系统的不断发展,次同步振荡的概念和内涵进一步延伸,新问题不断凸显。新能源的快速增长,电力电子技术的广泛应用,智能电网及能源互联网概念的兴起,电力系统正面临着前所未有的变革,有学者称其为“多源多变换电力电子化的电力系统”^[8]。电力电子技术在增强了电力系统可控性、灵活性的同时,也带来了新的次同步扰动问题,例如HVDC以及各种功率控制器的快速电力调节,造成发电机组电气阻尼能力发生变化或被削弱,由此引起机电耦合相互作用以及导致强迫型次同步振荡的发生^[9];大规模新能源基地经串补或弱交流送出系统中已监测到频率时变的次同步振荡现象^[10-14];电力电子装置之间的相互操控作用也愈加复杂起来,引起多个电力电子控制器之间的相互作用,有可能导致次同步控制相互作用的发生^[15]。可以看出,现代电力系统中次同步振荡问题已呈现

出新的特点,其产生机理、表现形式、监测与控制措施等诸多问题还需进一步进行研究。在此背景下,有必要对次同步振荡基本问题重新梳理,为此,本文首先总结了次同步振荡的基本问题与发展态势,并剖析了我国次同步振荡问题的特点与表现;最后提出了当前次同步振荡研究中的新问题,以及在抑制技术等方面面临的挑战与应对措施。

1 次同步振荡基本问题与发展

自Mohave电厂出现两次严重的机组轴系振荡事件后,学术界和工业界掀起了次同步振荡问题研究的热潮,国际电气与电子工程师协会(IEEE)于1973年成立了次同步谐振工作组,全面组织和开展了次同步振荡的一般机理、异步发电机效应、同步发电机扭振、同步机阻尼和弹性系数、分析方法、抑制和监测技术等方面的研究,给出了次同步振荡的定义、术语、符号和次同步振荡现象的分类^[1],提出了研究次同步振荡的单机-无穷大系统和两机-无穷大系统两个标准模型^[16,17]。随后,次同步工作组还定期对国际上关于次同步振荡研究的文献进行归纳整理,先后五次在IEEE期刊上发表了参考文献目录,为次同步研究与交流提供了便利。

当前,我国传统的大型火力和水力发电基地仍然是发电量的主体,串补技术与高压直流输电技术仍然是大规模能源基地远距离送出的主要技术手段,同时高压直流输电也是区域电网互联主要措施之一,交直流混联输电主干网架正在形成,原有的次同步振荡问题仍然是重要问题之一。另一方面,在电源侧,规模化风电和规模化光伏发电基地不断发展,并网容量不断增加,大容量电力电子技术广泛应用,次同步振荡呈现出新的特性。随着新问题的产生,已发布的术语和定义不能完全涵盖或用来解释新现象,需要重新梳理次同步振荡的类型与基本问题。

(1) 次同步振荡。次同步振荡是在电力系统运行平衡点受到扰动后产生的一种异常电磁及机械振荡现象,此时电网与汽轮发电机组之间在其联合系统低于工频的一个或者多个自然振荡频率进行显著的能量交换,这里不包括汽轮机—发电机轴系刚体振荡模式。

(2) 次同步谐振。次同步谐振是指当汽轮发电机组与串联电容补偿的输电系统相互耦合时产生的弱阻尼、零阻尼或者负阻尼增幅的机电振荡现象。它包括感应发电机效应、次同步扭振相互作用以及暂

态力矩放大。

(3) 装置引起的次同步振荡。装置引起的次同步振荡是汽轮发电机轴系与电网元件之间的相互作用。这种作用已经在直流换流控制器、电力系统稳定控制器等装置中发现，任何能够在次同步振荡频率的范围内对功率或发电机转速进行快速控制或响应的装置都是可能的次同步振荡激发源。

(4) 新能源并网引起的次同步振荡。新能源并网次同步振荡现象最早于 2009 年发生在美国德克萨斯州的某风电场^[10,11]，类似的次同步振荡现象在加拿大 Buffalo Ridge 地区^[12]和我国华北某地区都有文献报道^[13]。已有研究表明，该问题与双馈感应风机的变流器控制和线路串补电容有关^[18]，与轴系扭振无关，因此有学者称其为次同步控制相互作用 (Subsynchronous Control Interaction, SSCI)。研究和工程实践表明，风机与弱电网也存在 SSCI 的风险。文献[13,19]通过对双馈风力发电机等效电路的分析，指出 SSCI 是一种变流器控制参与的 IGE。文献[20]建立了风机的阻抗模型，分析了双馈感应发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 发生 IGE 的风险区域，并指出 IGE 是 DFIG 次同步振荡诱发的主导因素。但是，次同步振荡导致电压、电流波形畸变，从而加剧次同步振荡的机理还需要进一步研究。由此可以看出，关于 DFIG 经串补送出的次同步振荡机理尚未有统一结论^[21]。值得注意的是，此时的次同步振荡问题表现为电压、电流等电气参量的次同步频率振荡，IEEE 推荐采用“次同步频率分量”或“次同步间谐波”来描述相关参量^[22]。需要指出的是，上述问题均与基于全控型电力电子器件的功率变换器密切相关。图 1 为新能源电力系统次同步振荡问题的一种分类方法^[23]。



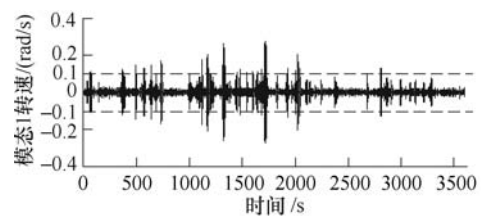
图 1 次同步振荡问题分类

Fig.1 Classification of SSO problems

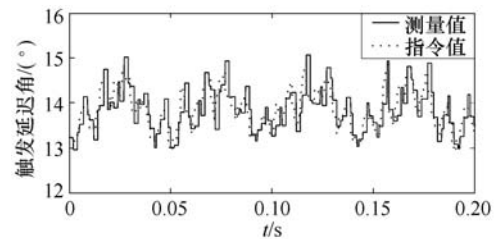
随着风电等新能源渗透率的增加，以及大功率电力电子新技术的广泛采用，SSCI 将愈发突出，由此产生的次同步频率分量在源网侧传播，激发其他形式的次同步振荡。因此，在新能源电力系统中，次同步振荡问题表现出多源、多形态、随机幅频特性的多类振荡问题相互耦合与影响的特点。

2 我国次同步振荡问题的特点与表现

我国的次同步振荡问题最早出现于 20 世纪 80 年代，华北电管局对神头电厂 3 号机进行“快关汽门”试验后发现机组振动异常，轴系出现疲劳损伤特征。早期，我国的 SSO 多集中于大型火电机组与串补输电线路之间，即次同步谐振问题，如我国的锦界电厂^[24]、托克托电厂^[25]、上都电厂^[26]、伊敏一、二期电厂^[27]等。随后，大型火电机组与 HVDC 之间的次同步振荡问题表现活跃，如绥中电厂—高岭背靠背直流^[28]、盘南电厂—贵广二回直流^[29]，伊敏三期电厂等均存在发散的次同步振荡的风险。而除了发散型次同步振荡以外，我国的呼伦贝尔地区的鄂温克、呼贝等电厂经伊穆直流送出时也出现了收敛型的频发次同步振荡，在采取抑制措施前，机组轴系模态振荡幅值频繁超过轴系扭应力继电器 (Torsional Stress Relay, TSR) 保护装置的报警值和疲劳累积阈值，每天达上百次，存在严重的疲劳累积，大大影响机组轴系的服役年限。图 2 所示为次同步振荡发生时呼贝电厂机组模态 1 典型波形和伊穆整流侧触发延迟角的现场录波，文献[30]分析结



(a) 呼贝电厂模态 1 录波



(b) 直流整流侧触发延迟角

图 2 频繁次同步振荡的现场录波图

Fig.2 Records of the frequently SSO in field

果表明, 频繁次同步振荡与直流整流侧功率快速调节密切相关。

随着我国新能源, 特别是风电渗透率的逐步增加, 在我国河北沽源和吉林的风电场相继发生了双馈感应风机经串补交流线路送出的次同步控制相互作用问题^[13]。此外, 我国的新疆哈密地区发生了更为复杂的大规模双馈和直驱风电机组经弱交流和天中特高压直流系统送出的次同步振荡问题^[14,31], 首次出现了次同步频率分量传递带来的危害, 风电产生的频率变化的次同步电流在多个不同电压等级的交流系统中传播, 最终诱发了火电机组的轴系扭振, 进而导致机组扭振 TSR 保护启动, 三台火电机组跳闸。

综上所述, 我国的 SSO 问题非常突出, 并具有如下特点:

(1) SSO 现象频繁发生。据统计, 全国已发生有影响的 SSO 事件 10 余起。我国能源赋存与负荷需求的逆向分布格局使得电能的大规模远距离输电成为必然, 远距离串联电容补偿工程和高压直流输电工程规模巨大。目前我国已建成 220kV 及以上的串补线路 20 余条, 500kV 及以上的直流输电线路 20 余条, 位于世界前列, 发生次同步振荡的概率总量明显增加。

(2) 新能源并网引发的次同步振荡问题突出, 振荡呈现随机时变、振荡频率范围宽的特点, 例如, 现场监测表明, 我国沽源地区风电场次同步振荡频率的变化范围可达 4~12Hz。我国新能源装机容量位居世界首位, 且大多位于偏远地区, 一方面网架结构薄弱; 另一方面又通过串补和直流输电远距离送出, 容易诱发次同步振荡问题。此类问题在我国沽源、内蒙、吉林、新疆哈密地区都有报道。

(3) SSO 问题错综复杂。大规模互联电网与长距离交直流混合输电是我国电力系统的一大特点, 电力电子技术广泛采用, 电网互联以及交直流混合输电使得系统电气阻尼特性十分复杂, 同时大功率换流设备接入不当会削弱系统的阻尼能力, 次同步振荡激发原因、传送路径和电磁/机电影响有待深入分析; 火电、风电经串补交流和高压直流送出时都可能激发 SSO, 不同类型的 SSO 之间可能存在相互影响。

(4) SSO 影响范围广, 危害性大。我国逐渐形成完整长距离输电和跨大区域源网协同的网架结构, 系统运行电压等级不断提高, 网络规模也不断扩大, 次同步振荡扰动将会影响整个电网安全稳定

运行。例如, 伊穆直流对次同步阻尼的削弱作用, 以及系统中的强迫扰动源使得呼伦贝尔地区多个电厂次同步振荡现象频繁发生; 新疆哈密地区风电出现次同步振荡, 导致 300 多公里外电厂三台 660MW 的火电机组保护动作脱网, 引起电网功率振荡。

3 次同步振荡基础问题研究

针对次同步振荡研究中出现的新现象、新问题, 结合我国次同步问题的特点与表现, 本文提出了以下基础问题, 供读者参考与讨论:

1) 弱阻尼下的火电机组轴系扭振疲劳。如前所述, 内蒙古呼伦贝尔地区出现了频发的次同步振荡导致大型火电机组严重疲劳累积的问题。文献[32]表明, 该问题的根本原因是在强直流系统弱交流系统导致的弱阻尼条件下, 强制激励与系统的自由响应共同作用所导致的火电机组轴系频繁扭振。随着我国多条大容量直流输电工程的逐步投运, 系统在次同步频率下呈现弱阻尼的风险也会逐渐增高。针对这一问题, 文献[30]提出了系统电气阻尼敏感度分析方法, 确定了单机经直流送出系统中, 次同步扭振相互作用路径中的电气阻尼对相关参量的敏感程度, 从而确定了影响系统电气阻尼的关键因素。但对于复杂的多机—交直流互联系统, 如何准确和有效地分析电气阻尼的敏感度特性, 是尚待解决的重要问题之一。

2) 风电并网的次同步振荡问题。与火电机组次同步轴系扭振不同, 风电场次同步振荡问题的另一个重要特点是振荡频率时变, 并且变化范围较大, 这给风电次同步振荡的监测与抑制带来了新的挑战。目前对于风电次同步振荡的研究主要集中于双馈感应风机经交流串补线路产生的次同步控制相互作用, 而对于风机经弱交流系统、风火打捆远距离外送的次同步振荡问题的研究则较少。

对于风电并网的次同步振荡机理, 目前有如下两类:

(1) 负电阻下的次同步谐振。无论是直驱还是双馈, 其均可以在次同步或超同步频率下等效为随频率变化的阻抗, 而该阻抗可能在一定频率下呈现容性特征, 与电网的等效感抗串联后, 可能存在一个或多个谐振点。若在谐振点对应的频率下, 系统等效电阻为负值, 或从奈奎斯特稳定判据的角度, 系统相位裕度较小时, 在该频率下就会出现类似感应发电机效应的自激振荡。

(2) 扰动电压产生的次同步频率分量。对于双

馈风机，发电机为异步运行，变速恒频的特性使得其定转子之间的频率存在一定的关系。图 3 给出了 DFIG 不同风速和正序扰动电压下定子间谐波电流幅频图，表明转子侧变流器（Rotor Side Converter, RSC）扰动电压在 DFIG 定子侧感应出的间谐波电流具有频率和有效值的双重时变特性。该特性使转子中存在的频率分量所形成的磁场会在定子中形成相应的次同步或超同步分量，进而使双馈风机在一定程度上表现为次同步间谐波的发生源，当系统在相应频率下的等效阻抗较小时，有可能导致次同步间谐波的放大，且其频谱特性会随风速而随机时变。

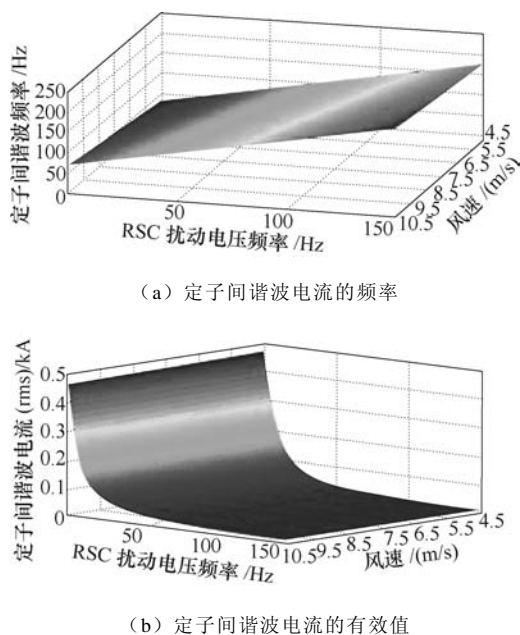


图 3 不同风速和正序扰动电压下定子间谐波电流幅频图

Fig.3 Amplitude-frequency of stator interharmonic current under different wind speed and positive sequence disturbing voltage

风火打捆是大规模风电送出与消纳的另一有效措施，文献[33]运用时域仿真法研究了大型风电场与火电厂捆绑经串补线路送出的次同步谐振特性，认为大型风电场与火电厂捆绑送电会减小风电场电气量的振荡幅值，但不会对振荡的阻尼产生明显影响。文献[34]提出通过在双馈感应风机的网侧变流器中附加阻尼控制抑制附近火电机组次同步谐振的方法。但两篇文献均未深入分析风电机组自身次同步谐振/振荡问题对附近火电机组的影响。为此，需要深入研究随机时变次同步频率分量（次同步间谐波）的产生机理、传播路径与规律及对系统稳定性的影响。

3) 多源多端直流外送系统的次同步相互作用。随着多端直流（Multi-Terminal DC, MTDC）输电工程的逐步建设及其在大容量远距离输电中的广泛应用，其安全稳定问题也将进一步受到关注，次同步相互作用就是其中之一。由于 MTDC 的多源多端送电特性以及换流器对次同步频率及其相应分量的变换、传递和调制作用，次同步相互作用可能不仅仅发生于单一集中式规模化的电源与相应的送端系统之间，某一端的次同步频率分量可能通过变流器进入到多端直流输电系统中，并进一步通过变流器传递给其他各端的交流系统。当其他各端交流系统中存在对此次同步频率分量敏感的电源或功率变换装置时，就可能在此激励下发生相互作用的次同步振荡，而多端直流控制系统特性既可能阻碍也可能恶化此相互作用，造成整个电网在次同步频率下的不稳定。这种振荡既可能是多端大型火电机组之间相近的轴系扭振模态通过 MTDC 的相互作用，也可能是规模化新能源，尤其是规模化风电机组经过 MTDC 与另一端的规模化风电机组或者是火电机组在相近频率或者互补频率下的相互作用。

4) 电力电子装置的次同步振荡问题。文献[15]表明在弱交流系统下，紧密耦合的两个静止无功补偿器或可控串联补偿装置（Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC）有发生控制互作用的风险。文献[35]建立了包括电压/功率外环、电流内环和锁相环（Phase Locked Loop, PLL）的 VSC 阻抗模型，结果表明在次同步频率范围内 VSC 有可能呈负阻尼，导致其与电网间不稳定的次同步相互作用，并提出了主动阻尼控制方法，文献同时指出，关于此类作用机理还需进一步研究。由于电力电子装置的强非线性，此类振荡现象十分复杂，目前基于平衡点线性化的分析方法不能完全揭示其机理，还需深入研究其非线性动力学特性。

5) 次同步振荡风险与影响评估。次同步振荡风险与影响评估对于电网规划与运行具有重要意义，也是次同步振荡抑制措施选择的理论依据。

如前所述，对于某些次同步振荡新问题，其产生机理仍有待深入研究，对其风险评估，尚未建立相关指标。例如，对于由传统 HVDC 引发的次同步扭振相互作用，曾提出采用机组作用系数法对其可能诱发次同步振荡的风险进行评估。但该方法仅适用于距离 HVDC 整流侧电气距离较近的火电机组的散发型次同步振荡，对于距离相对较远的火电机组弱阻尼频发次同步振荡则缺乏风险的指向性。此外，

对于风电机组送出的次同步振荡问题，以及可能出现的多端直流输电系统的次同步相互作用问题，多变压器建模以及多尺度动态刻画面临挑战，需要提出新的稳定性判据与量化方法，并据此提出有效的风险性评估指标。

另一方面，已有的针对次同步振荡风险与影响评估的研究中，大多只关注某一种次同步问题，或是将各类次同步振荡问题分别进行考虑，并未考虑各类次同步振荡之间的交互影响。传统的次同步振荡问题，由于其产生机理十分清晰，涉及的次同步电气量传递关系也十分明确。例如，扭振相互作用主要是大型汽轮发电机轴系扭振动态，其传播路径主要是相关串补电网或高压直流输电系统中的次同步电气量通过次同步电磁转矩与发电机机械系统形成耦合回路；感应发电机效应涉及电感-电容间电气谐振量，并与大型机组形成 R-L-C 谐振放大回路。对于风电等新能源发电系统引发的次同步振荡问题，考虑到风机参数、接入点的分散性，其振荡分量的传播路径十分复杂，而这些分量从低电压向高电压逐级传播，还会影响到更多的功率快速控制装置（如 HVDC），甚至激发出机组的固有振荡（扭振）模式，因此，其振荡的传播路径将更为复杂，特性也会受到更多因素的影响。这方面的研究仍处在起始阶段。

4 次同步振荡抑制技术面临的挑战及其应对措施

4.1 次同步振荡抑制技术发展概述

次同步振荡涉及电源侧和电网侧之间的相互作用，因此，改变电源侧和电网侧结构参数或加装次同步振荡抑制装置都能有效地对次同步振荡进行防控。本文将从电源侧和电网侧的角度对目前广泛研究和已投入工程应用的抑制措施进行介绍。表 1 总结了目前研究中常用的抑制方法。

电网侧抑制方法是指在某些容易引发次同步振荡的线路上安装抑制装置的方法。这些线路主要是指容易激发次同步谐振的固定串联补偿线路和可能引起次同步扭转相互作用的高压直流输电线路。这类抑制方法一方面是消除谐振条件，如阻塞滤波器^[36,37]，另一方面是依托于电网规划建设或已经投入的功率控制设备，依靠功率控制设备自身的阻尼能力或采用附加次同步阻尼控制的方式对附近存在 SSO 风险的机组进行保护。主要的功率控制设备包括串联型 FACTS 装置^[38-45]、并联型 FACTS 装置^[46-48]以及直流输电系统^[49-52]。

电源侧抑制方法的优势是能够直接、真实地提取与发电机轴系扭振频率相关的电气量，如发电机

表 1 常用抑制方法总结

Tab.1 Summarization of countermeasures in common use

抑制思路	具体方法	应用对象	工程应用	特点
无源滤波	阻塞滤波器 (BF)	IGE, TI, TA	美国 Navajo 电厂 (1970), 我国托克托电厂 (2010)	占地面积大, 参数要求严格, 投资大
机组励磁控制	附加励磁阻尼控制 (SEDC)	TI	美国 Navajo 电厂 (1970) 和 Jim Bridger 电厂 (1970), 我国上都 (2007)、伊敏、海拉尔等电厂 (2009)	抑制能力和响应速度受励磁系统限制
风机变流器控制	变流器参数优化	SSCI	无	抑制能力有限, 鲁棒性差
	变流器附加阻尼控制	SSCI	无	占用风机变流器容量, 实现复杂
串联 FACTS	可控串补 (TCSC)	IGE, TI, TA, SSCI	英国 Boardman (1993), 我国伊敏电厂 (2009)	灵活性和可靠性差, 投资大
	静止同步串联补偿器 (SSSC)	IGE, TI, TA, SSCI	无	
并联 FACTS	半控型 FACTS	IGE, TI, TA, SSCI	美国 San Juan 电厂 (1980) 我国锦界电厂 (2009)	抑制能力与容量和控制系统设计有关
	全控型 FACTS	IGE, TI, TA, SSCI	我国上都电厂 (2012)、呼伦贝尔电厂 (2014)	
HVDC 控制	附加阻尼控制器 SSDC	HVDC-TI, SSCI	我国伊穆直流等 (2009)	抑制效果受发电机的位置限制, 对多机多模态的次同步振荡抑制能力有限
	次同步分量阻断	HVDC-TI	无	

转速、电磁功率等；同时因靠近目标机组而能够对其提供更强的阻尼作用；可以针对实际需要进行专门的控制器设计，实现一（机组/电厂）对一（电源侧抑制装置）的次同步振荡抑制模式。目前较为常用的抑制方法主要有附加励磁阻尼控制（Supplementary Excitation Damping Control, SEDC）^[53-56]和基于并联型 FACTS 拓扑结构的机端 SSO 阻尼方法^[57-65]。

针对风机经串补送出的次同步振荡问题，已有文献提出的风电机组次同步振荡抑制策略主要包括变流器控制参数优化^[19,66]、风机变流器附加阻尼控制^[67-69]和基于 FACTS 的抑制策略^[70-75]。

全控型电力电子变流器具有动态响应速度快、波形调制能力强、控制策略设计灵活等优点，代表了当前最先进的次同步振荡抑制技术，该技术成功应用在我国的上都电厂^[76]和呼贝电厂^[32,77]。图 4 为基于该技术研发的次同步振荡抑制器（Subsynchronous

Dynamic Stabilizer, SSODS) 在呼贝电厂中的应用效果。可以看出，SSODS 具有良好的动态响应特性，在各种扰动下都能有效提高模态阻尼，抑制效果十分明显。

随着全控型电力电子变流器技术的不断成熟，成本不断降低，容量等级不断提高，该方案将具有广阔的应用空间。

4.2 面临的挑战与应对措施

对于传统火电机组的次同步振荡问题，抑制技术已十分完备，在我国也得到了广泛应用。然而，当前次同步振荡激发原因、传送路径和电磁/机电影响错综复杂，抑制技术面临一系列新的挑战：

(1) 次同步振荡激发原因、传送路径十分复杂，振荡频率大范围时变，次同步振荡模态辨识与监测困难，阻尼控制信号选取、抑制方案的选择面临挑战。

(2) 系统呈强非线性特性，新能源随机性、波动性十分明显，运行方式复杂多变，控制器设计困难，有效性与鲁棒性面临挑战。

(3) 多种次同步振荡扰动源相互耦合，相互影响，次同步振荡问题错综复杂，单一抑制方案难以满足要求，多种抑制方案之间的协调优化设计面临挑战。

针对上述挑战，次同步振荡抑制解决方案需要从源网两侧综合考虑，借助全控型电力电子变流器抑制技术，结合先进的数字信号处理器和广域测量系统，构建源网协调阻尼控制、源网协调运行、源网协调保护的多级防控体系，如图 5 所示为其中一种可行的设计方案。图 5 中，监测方法、监测布点、各类抑制装置的安装位置、阻尼控制器设计以及协调控制优化设计方法等一系列关键问题还需深入研究。

5 结论

在新能源电力系统中，次同步振荡的概念和内涵进一步延伸，新问题不断凸显，次同步振荡发生的频率变化范围不断扩大。各类次同步振荡问题交互作用，次同步振荡激发原因、传送路径和电磁/机电影响错综复杂。次同步振荡问题仍然是我国现代电力系统中安全稳定运行的重大问题之一。因此，研究次同步振荡问题的影响与对策是我国电力能源发展的重大需求，复杂次同步振荡问题的产生机理、监测与抑制/保护方法等关键问题亟待进一步解决。

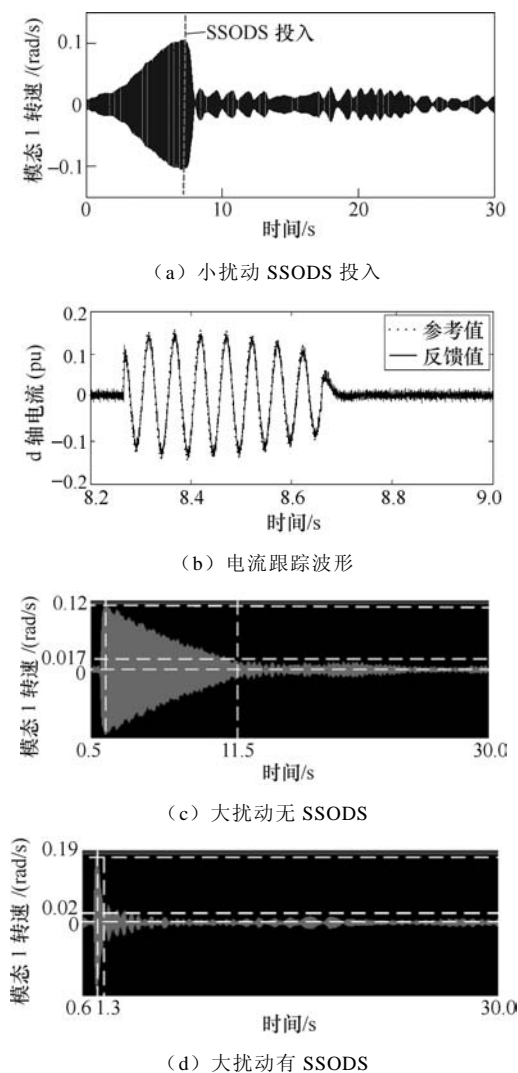


图 4 呼贝电厂现场模态录波

Fig.4 Modal records of Hulunbuir power plant in field

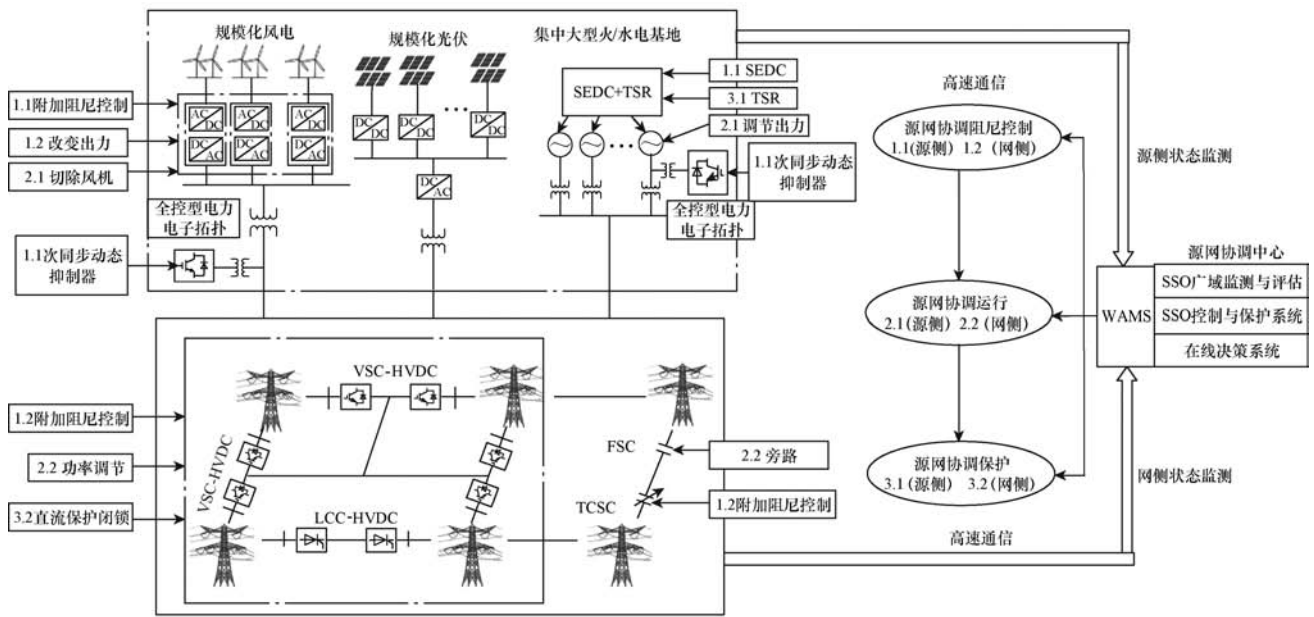


图5 新能源电力系统 SSO 源网协调防控体系

Fig.5 The source-grid coordination of SSO prevention and control system in electric power system with renewable energy sources

参考文献

[1] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.

[2] Concordia C, Carter G K. Negative damping of electrical machinery[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1941, 60(3): 116-119.

[3] Butler J W, Concordia C. Analysis of series capacitor application problems[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1937, 56(8): 975-988.

[4] Walker D N, Bowler C E J, Jackson R L, et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.

[5] Bahrman M, Larsen E V, Piwko R J, et al. Experience with HVDC-turbine-generator torsional interaction at Square Butte[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(3): 966-975.

[6] Koo M, Sabaté A, Magalló P, et al. Field tests and analysis of torsional interaction between the coal Creek turbine-generators and the CU HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, 100(1): 336-344.

[7] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[8] 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.

[9] Xiao Xiangning, Zhang Jian, Gao Benfeng, et al. Simulation and study on mitigation measures of frequent subsynchronous oscillation with low amplitude at multi power plants[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1340-1353.

[10] Lawrence C Gross. Sub-synchronous grid conditions: new event, new problem, and new solutions[C]//37th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane Washington, 2010: 1-19.

[11] Adams J, Carter C, Huang Shun-Hsien. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), IEEE PES, Orlando, 2012: 1-5.

[12] Narendra K, Fedirchuk D, Midence R, et al. New microprocessor based relay to monitor and protect power systems against sub-harmonics[C]//IEEE Pro-

- ceedings of Electrical Power Energy and Conference (EPEC), Winnipeg, 2011: 438-443.
- [13] Liang Wang, Xie X R, Jiang Q R. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(8): 1-8.
- [14] 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.
- [15] Pilotto L A S, Long W F, Edris A A. Basic mechanisms of control interactions among power electronic-assisted power systems[C]//IEEE/PES, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, 2001, 1: 397-402.
- [16] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1672.
- [17] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 96(5): 1057-1066.
- [18] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149.
- Zhang Jian, Xiao Xiangning, Gao Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on subsynchronous control interaction of a DFIG-based wind-power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149.
- [19] 王亮, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 26-31.
- Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 26-31.
- [20] 陈武晖, 宿端鹏, 汪旒, 等. 双馈风电场感应发电机效应的风险区域变化机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5469-5478.
- Chen Wuhui, Su Duanpeng, Wang Ni, et al. Evolving mechanism of risk region for induction generator effect of doubly-fed wind farms[J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(20): 5469-5478.
- [21] 高本锋, 刘晋, 李忍, 等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 154-161.
- Gao Benfeng, Liu Jin, Li Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.
- [22] IEEE Std 1459—2010 IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions[S]. 2010.
- [23] 肖湘宁, 郭春林, 高本锋, 等. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [24] 徐政, 张帆. 神木电厂串补送出方案次同步谐振的计算分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 111-114.
- Xu Zheng, Zhang Fan. SSR analysis of series compensation transmission scheme for Shenmu power plant[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 111-114.
- [25] 谢小荣, 刘平, 张仁伟, 等. 托克托电厂阻塞滤波器引发机组异步自励磁的分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 79-83.
- Xie Xiaorong, Liu Ping, Zhang Renwei, et al. Analysis on asynchronous self-excitation induced by blocking filter installed in Tuoketuo power plant[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 79-83.
- [26] 李国宝, 张明, 郭锡玖, 等. 上都电厂串补输电系统次同步谐振解决方案研究[J]. 中国电力, 2008, 41(5): 75-78.
- Li Guobao, Zhang Ming, Guo Xijiu, et al. The solution to SSR problem in Shangdu series compensation transmission system[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 75-78.
- [27] 郑蕤. 带串联补偿的交直流并列系统次同步振荡特

- 性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [28] 王继伟, 鄂士平. 高岭换流站工程次同步振荡原因及解决办法[J]. 东北电力技术, 2009, 30(11): 20-21. Wang Jiwei, E Shiping. Cause and solution to subsynchronous oscillation for Gaoling converter station[J]. Northeast Electric Power Technology, 2009, 30(11): 20-21.
- [29] 李立涅, 洪潮. 贵广二回直流输电系统次同步振荡问题分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 90-93. Li Licheng, Hong Chao. Analysis of the SSO problem caused by Guizhou-Guangdong II HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 90-93.
- [30] 张剑. 间歇式次同步振荡及次同步控制互作用问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [31] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27. Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [32] Xiao X, Luo C, Zhang J, et al. Analysis of frequently over-threshold subsynchronous oscillation and its suppression by subsynchronous oscillation dynamic suppressor[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(9): 2127-2137.
- [33] 晏小彬, 刘天琪, 李兴源, 等. 大型风电场次同步谐振分析[J]. 华东电力, 2012(8): 1328-1333. Yan Xiaobin, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Subsynchronous oscillation of large-scale wind farm[J]. East China Electric Power, 2012(8): 1328-1333.
- [34] Faried S O, Unal I, Rai D, et al. Utilizing DFIG-based wind farms for damping subsynchronous resonance in nearby turbine-generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 452-459.
- [35] Alawasa K M, Mohamed A R I, Xu W. Active mitigation of subsynchronous interactions between PWM voltage-source converters and power networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 121-134.
- [36] Farmer R G, Schwab A L, Katz E. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1977, 96(4): 1226-1232.
- [37] Xie X, Liu P, Bai K, et al. Applying improved blocking filters to the SSR problem of the Tuoketuo power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(28): 227-235.
- [38] 周长春, 刘前进. 抑制次同步谐振的 TCSC 主动阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 130-135. Zhou Changchun, Liu Qianjin. Active damping control of TCSC for subsynchronous resonance mitigation[J]. Journal of Chinese Electrical Engineering Science, 2008, 28(15): 130-135.
- [39] 张少康, 李兴源, 张振, 等. TCSC 及其主动阻尼控制对次同步谐振的抑制[J]. 电网技术, 2010, 31(1): 22-26. Zhang Shaokang, Li Xingyuan, Zhang Zhen, et al. Research on suppressing subsynchronous resonance by TCSC and its active damping control[J]. Power System Technology, 2010, 31(1): 22-26.
- [40] 刘敏, 周孝信, 田芳, 等. 抑制次同步振荡的可控串补附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 65-70. Liu Min, Zhou Xiaoxin, Tian Fang, et al. Supplementary damping control of TCSC for subsynchronous oscillation suppression[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 65-70.
- [41] 高本锋, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 142-147. Gao Benfeng, Xiao Xiangning, Zhao Chengyong, et al. Study of hybrid series compensator on subsynchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 142-147.
- [42] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于本地测量信号的 TCSC 抑制次同步振荡附加控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 22-25. Zhu Xukai, Zhou Xiaoxin, Tian Fang, et al. Additional control of subsynchronous oscillation based on local measurement signal TCSC suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 22-25.
- [43] 郑翔, 徐政, 张静. TCSC 次同步谐振附加阻尼控制

- 器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2):181-186.
- Zheng Xiang, Xu Zheng, Zhang Jing. A TCSC supplementary damping controller for SSR mitigation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 181-186.
- [44] Bongiorno M, Angquist L, Svensson J. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1033-1041.
- [45] Thirumalaivasan R, Janaki M, Prabhu N. Damping of SSR using subsynchronous current suppressor with SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 64-74.
- [46] Khalilinia H, Ghaisari J. Sub-synchronous resonance damping in series compensated transmission lines using a statcom in the common bus[C]//Power and Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009: 1-7.
- [47] Padiyar K R, Prabhu N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.
- [48] Prabhu N, Janaki M, Thirumalaivasan R. Damping of subsynchronous resonance by subsynchronous current injector with STATCOM[C]//TENCON 2009, Singapore, 2009: 1-6.
- [49] Piwko R J, Larsen E V. HVDC system control for damping of subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(7): 2203-2211.
- [50] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
- Gao Benfeng, Zhao Chengyong, Xiao Xiangning. Design and implementation of SSDC for HVDC[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(2): 501-506.
- [51] 唐酿, 肖湘宁, 李伟, 等. HVDC附加次同步阻尼控制器设计及其相位补偿分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1015-1021.
- Tang Niang, Xiao Xiangning, Li Wei, et al. Design of HVDC additional subsynchronous damping controller and its phase compensation analysis[J]. High Voltage Technology, 2011, 37(4): 1015-1021.
- [52] Rauhala T, Järventausta P. On feasibility of SSDC to improve the effect of HVDC on subsynchronous damping on several lower range torsional oscillation modes[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, 2010: 1-8.
- [53] Farmer R G, Schwalb A L. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(4): 1226-1232.
- [54] Bowler C E J, Baker D H, Mincer N A, et al. Operation and test of the Navajo SSR protective equipment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 1030-1035.
- [55] 谢小荣, 郭锡玖, 吴景龙, 等. 上都电厂串补输电系统附加励磁阻尼控制抑制次同步谐振的现场试验[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 27-32.
- Xie Xiaorong, Guo Xijiu, Wu Jinglong, et al. Field tests of SEDC for damping subsynchronous resonance in Shangdu series-compensated transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 27-32.
- [56] 吴熙, 蒋平. SEDC与TCSC联合抑制次同步振荡的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 179-184.
- Wu Xi, Jiang Ping. Research on sub-synchronous oscillation mitigation using supplementary excitation damping controller and thyristor controlled series capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 179-184.
- [57] Ramey D G, Kimmel D S, Dorney J W, et al. Dynamic stabilizer verification tests at the San Juan station[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, PER-1(12): 5011-5019.
- [58] 张帆, 徐政. 采用 SVC 抑制发电机次同步谐振的理论与实践[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 26-31.
- Zhang Fan, Xu Zheng. Study on the theory and practice of SVC suppressing subsynchronous resonance of generator[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(3): 26-31.
- [59] 岑炳成, 刘涤尘, 董飞飞, 等. 抑制次同步振荡的 SVC 非线性控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 129-135.
- Cen Bingcheng, Liu Dichen, Dong Feifei, et al. Nonlinear control method of static var compensator for damping subsynchronous oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 129-135.

- [60] 李伟, 肖湘宁, 赵洋. 无功发生源抑制次同步振荡的机理分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 168-174.
Li Wei, Xiao Xiangning, Zhao Yang. Study on the mechanism of suppressing subsynchronous oscillation by reactive power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 168-174.
- [61] 张剑, 肖湘宁, 高本锋. 并联型无源与有源次同步振荡阻尼装置对比分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 77-82.
Zhang Jian, Xiao Xiangning, Gao Benfeng. Comparative analysis of shunt-type passive and active sub-synchronous oscillating damping devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 77-82.
- [62] 李志鹏, 谢小荣. 应用静止同步补偿器抑制次同步谐振的模态互补电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 22-27.
Li Zhipeng, Xie Xiaorong. Model complementary current control method for suppressing sub-synchronous resonance using static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 22-27.
- [63] 王冠青, 孙海顺, 朱鑫要, 等. STATCOM附加电压控制抑制次同步谐振的理论和仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 33-38.
Wang Guanqing, Sun Haishun, Zhu Xinyao, et al. Theory and simulation of STATCOM suppression of sub-synchronous resonance by additional voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 33-38.
- [64] 罗超, 肖湘宁, 张剑, 等. 并联型有源次同步振荡抑制器阻尼控制策略优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 150-158.
Luo Chao, Xiao Xiangning, Zhang Jian, et al. The optimal damping control strategy design of parallel active subsynchronous oscillation suppressor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 150-158.
- [65] Zhang J, Xiao X, Zhang P, et al. Suppressing intermittent subsynchronous oscillation via sub-synchronous modulation of reactive current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2321-2330.
- [66] Irwin G D, Jindal A K, Isaacs A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012: 1-6.
- [67] Fan Lingling, Zhu Chanxia, Miao Zhixin, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [68] Mohammadpour H A, Santi E. SSR damping controller design and optimal placement in rotor-side and grid-side converters of series-compensated DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 388-399.
- [69] Huang P H, El Moursi M S, Xiao W D, et al. Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(3): 1442-1454.
- [70] Mohammadpour H A, Siegers J, Santi E. Controller design for TCSC using observed-state feedback method to damp SSR in DFIG-based wind farms[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, 2015: 2993-2998.
- [71] Mohammadpour H A, Santi E. Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1022-1033.
- [72] Mohammadpour H A, Ghaderi A, Santi E. Analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms interfaced with gate-controlled series capacitor[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 1998-2011.
- [73] Golshannavaz S, Mokhtari M, Nazarpour D. SSR suppression via STATCOM in series compensated wind farm integrations[C]//19th Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, Iran, 2011: 1-6.
- [74] Moharana A, Varma R K, Seethapathy R. SSR mitigation in wind farm connected to series

- compensated transmission line using STATCOM[J]. IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Denver, CO, 2012: 1-8.
- [75] Wang L, Xie X, Jiang Q, et al. Centralised solution for subsynchronous control interaction of doubly fed induction generators using voltage-sourced converter[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2751-2759.
- [76] 谢小荣, 郭锡玖, 吴景龙, 等. 基于电力电子变流器的机端次同步阻尼控制器研究与测试[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 666-671.
- Xie Xiaorong, Guo Xijiu, Wu Jinglong, et al. Research and test of a generator terminal subsynchronous damping controller based on power electronic converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 666-671.
- [77] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 次同步振荡动态稳定器抑制弱阻尼次同步振荡的机理与实验[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 135-140.
- Lu Jingjing, Xiao Xiangning, Zhang Jian, et al. Mechanism and experiment of subsynchronous oscillation-dynamic stabilizer for suppressing subsynchronous oscillation with weak damping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 135-140.
-
- 作者简介**
- 肖湘宁 男, 1953 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统次同步振荡、现代电能质量、电力电子技术在电力系统中的应用。
E-mail: xxn@ncepu.edu.cn
- 罗 超 男, 1987 年生, 博士研究生, 研究方向为电力系统次同步振荡的分析与控制。
E-mail: ceelch@126.com (通信作者)
- (编辑 郭丽军)