

大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述

王伟胜¹, 张冲¹, 何国庆¹, 李光辉¹, 张剑云², 汪海蛟¹

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京市 海淀区 100192;
2. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031)

Overview of Research on Subsynchronous Oscillations in Large-Scale Wind Farm Integrated System

WANG Weisheng¹, ZHANG Chong¹, HE Guoqing¹, LI Guanghui¹, ZHANG Jianyun², WANG Haijiao¹

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems
(China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China;
2. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: With series compensation, weak AC or HVDC, large-scale wind power integrated system has higher possibility to cause wind turbines subsynchronous oscillations (SSO), but their mechanism and characteristics are diverse. This paper presents SSO mechanism in large-scale wind power integrated system with series compensation, which can be classified as three types, i.e. subsynchronous resonance (SSR), subsynchronous torsional interactions (SSTI) and subsynchronous control interaction (SSCI). Some SSO analysis methods are explained in detail, including frequency-scanning method, eigenvalue analysis method, complex torque coefficient method, time-domain simulation, impedance analysis method and magnitude phase motion method. In addition, SSO suppressing strategies are also summarized, including electrical parameter change, additional damping control and additional filter. Finally, future research on SSO of large-scale wind power integrated system is discussed.

KEY WORDS: large-scale wind farms; subsynchronous oscillation; series compensation; high voltage direct current (HVDC); weak AC system; subsynchronous control interaction

摘要: 在大规模风电场并网系统中, 经串联补偿、弱交流系统或 HVDC 并网均有可能引发风电机组的次同步振荡, 但产生机理与相关特性各不相同。文章首先介绍了大规模风电场经串联补偿、弱交流系统或 HVDC 并网系统产生次同步振荡的机理, 分为次同步谐振、装置引起的次同步振荡、次同步控制相互作用 3 个类型; 然后论述了分析大规模风电场并网系统次同步振荡的主要方法, 包括频率扫描分析法、特征根分析法、复转矩系数法、时域仿真法、阻抗分析法以及

幅相运动分析法等; 在此基础上归纳总结了次同步振荡的抑制措施, 包括改变电气参数、附加阻尼控制、附加滤波装置; 最后对于大规模风电场并网系统次同步振荡问题未来的研究方向予以展望。

关键词: 大规模风电场; 次同步振荡; 串联补偿; 高压直流输电; 弱交流系统; 次同步控制相互作用

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0069

0 引言

针对次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO)问题的讨论最早始于 20 世纪 30 年代, 但直到 1970 年, 美国 Mohave 电站先后发生了 2 起次同步振荡导致的发电机组事故, 才引起了广大学者对这一问题的重视, 并在世界范围内掀起了研究的热潮^[1-6]。与汽轮机发电机组相比, 对风电机组次同步振荡问题的研究起步较晚, 但随着风电并网容量的快速增长, 大规模风电场与电网之间相互作用引起的新型次同步振荡问题近几年已成为风电场安全稳定运行的重要挑战之一。

大规模风电场由数百台甚至数千台风电机组组成, 它们类型多样(双馈风电机组、鼠笼式风电机组、直驱风电机组等), 控制参数各异, 而且运行方式各不相同。风电场大多地处偏远地区, 远离负荷中心, 其并网点短路比(short current ratio, SCR)随着风电机组并网数量的增加而降低, 形成弱交流系统。同时, 大规模风电场常采用高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)技术或串联补偿技术实现远距离外送。相关研究表明, 当风电场并入弱交流系统、含串联补偿系统, 以及 HVDC 系统时, 均可能发生次同步振荡。另外, 在不合理的控

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900104); 国家电网公司科技项目(集群新能源发电与电网宽频带耦合机理及仿真与实证研究)。

Project Supported by National Key Research and Development Programme (2016YFB0900104); State Grid Corporation of China Science and Technology Project.

制参数与运行方式下,风电场无功补偿装置将可能加剧SSO问题的严重性,给大规模风电场并网系统的安全稳定运行带来严峻的挑战^[7-11]。

2009年10月,美国德州发生电网故障导致某双馈风电场经过含75%串联补偿的线路并入电网,引发了20 Hz左右的次同步振荡现象,系统电压振荡幅值超过2.0 pu,造成风电机组脱网及crowbar电路损坏^[12-14]。2011年以来,我国华北地区也多次出现以双馈风电机组为主的风电场经串补线路送出时的次同步振荡问题。2015年7月,我国西北某以直驱风电机组为主的风电基地,在没有串联补偿的情况下,多次出现次同步频率范围的持续功率振荡现象,甚至引发200 km以外的直流送出配套火电机组扭振保护动作切机,严重威胁电网的安全稳定运行,影响风电的并网消纳^[15-16]。

由于风电场中存在大量类型多样、控制参数各异的风电机组和无功补偿装置,且运行方式各不相同,其并入不同特征电网而产生次同步振荡的机理与相关特性各不相同,所使用的分析方法以及针对不同的振荡类型所采用的抑制措施也各有区别。本文首先介绍了大规模风电场经串联补偿、弱交流系统或HVDC并网引发次同步振荡的机理,然后论述了分析大规模风电场并网系统次同步振荡的主要方法,在此基础上归纳总结了次同步振荡的抑制措施,最后对于大规模风电场并网次同步振荡问题未来的研究方向予以展望。

1 次同步振荡的产生机理

根据已发表文献,大规模风电场并网系统次同步振荡产生机理按照相互作用的对象不同可以分为3种类型,分别是:次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR)、装置引起的次同步振荡(subsynchronous torsional interactions, SSTI)以及次同步控制相互作用(subsynchronous control interaction, SSCI)^[6,17-19]。

1.1 次同步谐振(SSR)

次同步谐振产生机理如图1所示,在异常运行状态下,串联补偿电路中的补偿电容与风电机组轴系的定子电感之间形成次同步谐振回路,能量以某

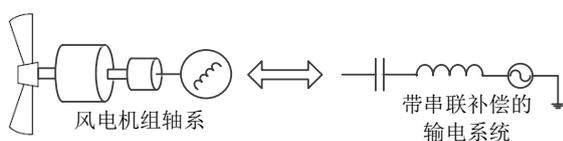


图1 风电机组次同步谐振产生机理

Fig. 1 Mechanism of subsynchronous resonance of wind turbines

个或多个次同步振荡频率在风电机组和电网间不断交换,危及风电机组与电网安全稳定运行。根据具体产生机理,次同步谐振主要包含3种类型:感应发电机效应(inductive generator effect, IGE);扭转相互作用(torsional interactions, TI);暂态扭矩放大作用(transient torque amplification, TA)^[4-5]。

IGE是指在某次同步频率 f_{sr} 下,风电机组转子的等效电阻表现为负阻值特性,当转子等效负值电阻 Z_r 大于电网系统(输电线路、变压器等)和发电机定子在此频率下等效电阻之和 Z_s+Z_g 时,整个风电机组并网系统的等值电阻为负值,形成电气回路的自激,并网次同步电流将持续发散振荡^[20-22]。IGE强调的是一种电气回路的谐振现象。风电机组并网系统的IGE现象通常发生在串补度非常高的情形,并且只涉及电气系统的动态过程,与风电机组轴系无关。风电并网系统中暂未发生扭转相互作用与暂态扭矩放大作用引起的SSO现象,本文不作详细介绍。

文献[23,24]分析了双馈风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)并网系统IGE产生的机理与影响因素,得出串补度的增加与风速的减小会诱发IGE产生的结论。文献[25]指出由于直驱风电机组的背靠背变流器将风力发电机与电网隔离,阻止了电网中的次同步振荡电流与风电机组定子内部绕组的相互作用。因此,直驱风电机组不存在次同步谐振现象。文献[26]指出双馈型风电机组和鼠笼风电机组的轴系长度较短,转子转动惯量较大,而且存在齿轮箱,这使得这2种类型的风电机组轴系自然扭振频率较低(1~5 Hz),因此只有当输电线路串补度非常高时才会引发此类型风电场并网系统的次同步振荡。文献[27]建立了双馈风场并网带串补的交流系统等效模型,通过仿真复现了SSR现象,并利用特征根方法分析其主导因素为风速、风机并网数量以及控制方式,揭示了DFIG次同步谐振的产生机理。考虑输电线路的经济性与可靠性,实际工程中的串补度一般小于70%,电气谐振的自激条件难以实现。因此,在正常情况下,SSR并不是风电机组主要的次同步振荡类型^[28-32]。

1.2 装置引起的次同步振荡(SSTI)

如图2所示,当并网系统中的风电场中的风电机组变流器、HVDC或者FACTS (flexible alternative current transmission systems)装置等控制参数设计与运行方式不合理时,风电机组轴系可能与电力电子设备控制器之间相互作用,引起风电并网系统发生次同步振荡。上述电力电子设备控制器的快速响应能力可能会对风电机组电磁转矩及转速的相位差

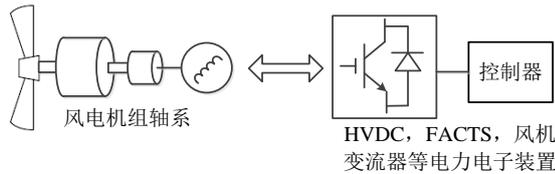


图2 装置引起的风电机组次同步振荡产生机理

Fig. 2 Mechanism of subsynchronous torsional interactions of wind turbines by power electronic equipment

产生负面影响,当两者之间的相位差大于 90° 时,风电机组将引入负阻尼效应,诱发系统发生次同步振荡。

目前,由于动态无功补偿装置可以提供紧急无功支撑、提高电压静态稳定性和暂态稳定性以及增加系统输送的容量等优点,被广泛应用于大规模风电并网系统。MMC-HVDC 由于其输出电压畸变小、有功无功解耦控制等优势,成为海上风电并网系统的解决方案。但是这些电力电子装置本身的快速响应能力有可能诱发并加剧风电机组发生次同步振荡的风险。

装置引起的次同步振荡主要研究集中在火电机组领域,由于风电在实际工程中尚未遇到此问题,因此研究较少。文献[33]初步研究了鼠笼风电机组经 HVDC 送出时的次同步振荡问题。文献[34]指出双馈风电机组次同步扭振的主要原因是转子侧变流器级联控制回路参数设置不合理引起的,并提出附加阻尼控制策略抑制振荡的产生。文献[35, 36]建立了风电经 MMC-HVDC 并网的小信号阻抗模型,根据奈奎斯特判据判断系统的稳定性,并提出了环流控制方法改善系统的稳定性。文献[37]利用阻抗分析法研究了大型双馈风电场经 MMC-HVDC 系统并网中次同步电流的分布与传播,并提出了基于附加次同步电流抑制的送端换流站控制策略。文献[38]研究了 SVC 的接入位置对风电场经串补并网系统次同步振荡的影响,并提出了相应的控制策略。文献[39]研究了海上风电场经 VSC-HVDC 并网的功率振荡问题,提出了对 VSC 和风机控制器的阻尼控制的一种新型设计准则,同时讨论了鲁棒性与控制延迟、风机机械共振、风场可提供的阻尼以及功率曲线对实际工程阻尼设计的限制。文献[40]建立了风电机组与 MMC 的阻抗模型,发现风电场经 HVDC 并网系统产生振荡的机理为风电机组变流器与 HVDC 系统相互作用引起的,并提出一种有源阻尼控制方法有效地降低了振荡发生的风险。

1.3 次同步控制相互作用(SSCI)

如图3所示,由风电机组控制器与弱交流系统

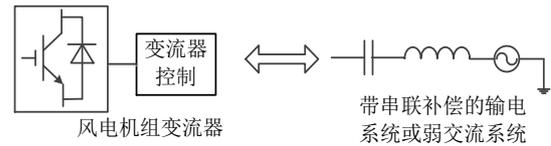


图3 次同步控制作用产生机理

Fig. 3 Mechanism of subsynchronous control interaction of wind turbines

或者串联补偿之间的相互作用引发的次同步振荡称为次同步控制相互作用(SSCI)。SSCI 与风力发电机组的轴系扭振无关,其振荡频率与弱交流系统阻抗、输电线路串补度、风电机组控制器以及系统运行方式相关。文献[41-43]指出对于双馈风电机组,当电网中产生次同步电流时,如果双馈型风电机组变流器的输出电压增大发电机转子中感应到的次同步电流,将会加剧电网次同步电流的振荡,从而使 DFIG 转子侧控制器与串补线路之间形成互激,导致系统发生次同步振荡现象。文献[44]通过理论与实际风场测量数据详细分析了风电机组与串补系统相互作用引起的次同步振荡特性,揭示 SSCI 的产生主要原因是 DFIG 在次同步频率下具有负阻尼特性,分析结果表明风电机组的振荡频率随着时间、电网运行方式及发电机数量的不同而不断变化。文献[23,45-46]指出电网串补度的增大、风速的降低以及双馈风电机组转子侧电流环的控制参数的增大将增加 SSCI 的发生风险。文献[15]研究表明直驱风电机组控制器在次同步频率下呈现具有负电阻的容性阻抗特性,当其接入弱交流电网时,将与电网输电线路中的电感构成电气谐振回路,并因负阻尼效应产生次同步振荡。文献[17]通过仿真分析得出双馈风电机组发生 SSCI 的条件。然而,鼠笼型风电机组因其无变流器控制装置,因此不存在 SSCI 问题。

2 次同步振荡分析方法

适用于大规模风电场并网系统次同步振荡问题的分析方法主要包括频率扫描分析法、特征根分析法、复转矩系数法、时域仿真法、阻抗分析法以及幅相运动分析法等^[43,47]。

2.1 频率扫描分析法

频率扫描分析法可以筛选出具有次同步振荡风险的系统运行方式,它是一种近似的线性方法。首先,建立风电机组并网系统的正序网络;其次,从待研究的风电机组看向并网系统侧,计算系统中的其他电网元件(主要包括其他风电机组、线路、变压器等)的次暂态等值阻抗;然后通过计算得到 SSO 等值电阻和 SSO 等值电抗随频率变化的曲线^[4,47]。

当SSO等值电抗在零附近所对应的次同步频率点上的SSO等值电阻小于零时,系统产生次同步振荡风险较高,而且等值电阻绝对值越大电气振荡越容易发散。

文献[23]采用频率扫描分析法研究了双馈风电机组并网系统中IGE产生的机理与影响因素,得出串补度的增加与风速的减小会诱发IGE的产生。文献[48]采用此方法指出双馈风电机组并网系统发生次同步振荡的参与因子主要是风电机组与电网的状态变量,控制器的变量对振荡特性影响较小,驱动系统的状态变量几乎对振荡没有影响。

频率扫描分析法可以有效地定性筛选有次同步振荡风险的风电机组,而且方法比较简单,成本较低。但该方法存在以下缺点:不适用于存在电力电子等非线性元件的计算;没有考虑系统运行方式以及控制器暂态特性的影响,由于简化了发电机模型,分析结果不够精确。所以需要采用精确分析法进一步对风电场次同步振荡的程度与特性进行验证。

2.2 特征根分析法

首先在系统中加入小扰动信号,其次对系统建立线性化模型,然后通过求解系统状态矩阵的特征根、特征向量和相关因子来判断系统稳定性的方法是特征根分析法^[47]。具体步骤如下:首先建立风电机组并网系统的详细数学模型,并在稳定运行点附近进行线性化,得到近似线性的状态空间矩阵:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X \quad (1)$$

然后计算系数矩阵A的特征根 λ_n :

$$\lambda_n = \sigma_n + j2\pi f_n \quad (2)$$

其中: σ_n 为次同步振荡特征根实部; f_n 为次同步振荡模态频率。最后,根据特征根在复平面上的分布判断系统的稳定性。当特征根分布于复平面的左半平面时,则相应的次同步频率下不发生振荡或者振荡收敛,且阻尼系数与其特征根实部的绝对值成正比。当特征根位于虚轴上或者复平面的右半平面时,则相应次同步频率下振荡模态不稳定,且实部数值越大,越容易发生振荡。

文献[15]通过特征根方法分析得到直驱风机并入弱交流系统时会产生次同步振荡,在这种振荡模态下,直驱风机表现为具有负阻特性的容性阻抗,与电网产生谐振回路,诱发次同步振荡的产生。文献[23]通过此方法指出双馈风电机组经串补并网系统中风速的减小和串补度的增加会诱发IGE,转子侧变流器电流环控制器参数的增大会诱发SSCI的产生。文献[49]利用此方法设计了抑制风电并网系

统次同步振荡的附加阻尼控制器,并取得了较好的效果。文献[50-52]建立了双馈风电场串补系统等值模型,通过特征值灵敏度分析了各因素变化对风机稳定性与安全运行域的影响,结果表明,串补度越高、风机转子侧变流器的电流环比例系数越大,稳定面积越小,影响稳定性最大的因素为风机转速,而线路串补度和风机并网台数对谐振频率有重要影响。文献[53]建立了包含直驱风电机组、电缆、变压器、电容器以及并联电抗器的典型风电场并网系统模型,利用特征根方法分析零极点的分布从而判断系统的稳定性,并通过仿真发现变流器动态特性及电网强弱都会影响风电场的稳定性。

特征根分析法科学理论严密,物理概念清晰,分析方法精确,可以用于优化设计控制器以抑制次同步振荡,适用于分析除了TA作用之外的各种次同步振荡问题。但是其只能用于描述系统的正序网络,且随着电力系统规模越来越大,线性化系统状态矩阵的维数将会非常高,使用特征根法时将出现严重的“维数灾”问题。它只能用于孤立模态的动态特性分析,不能分析连续频率的动态特性,且难以用数学模型表达特征根与元件参数、运行参数的关系。

2.3 复转矩系数法

复转矩系数分析法将频率扫描方法和特征根分析方法进行了结合,具体如下:首先对系统中的某一发电机转子相对角度 δ 上施加一个频率为 ω ($\omega < 50$ Hz)的强制小干扰分量 $\Delta\delta$,然后分别计算风电机组电气部分与机械部分的电气复转矩 $\Delta\dot{T}_e$ 和机械复转矩 $\Delta\dot{T}_m$ ^[54],其中电气复转矩系数分为电气弹性系数和电气阻尼系数,机械复转矩系数分为机械弹性系数和机械阻尼系数。当电气弹性系数和机械弹性系数之和为0时,系统处于临界状态,如果此时系统阻尼为负,则表明在次同步频率 ω 下,系统将发生次同步振荡。电气复转矩系数和机械复转矩系数可以通过系统的传递函数模型得到。与此同时,电气复转矩系数还可以通过物理系统的测试曲线或者时域仿真响应曲线计算得出^[55]。

文献[56]提出一种根据复转矩系数频率扫描的计算结果来估算次同步谐振模式特征值的方法,方便判断系统是否发生次同步振荡。文献[57]提出一种微小扰动稳态响应算法用于计算含TCSC的电力系统次同步谐振的复转矩系数,这种算法可以推广到复杂的大规模风电并网系统。文献[58]基于定转子转矩分析法将转速变化引起风电机组电磁转矩

变化量分为转子和定子变化量,分析其对次同步谐振的阻尼性质及大小,得出当两者阻尼之和为负时系统产生次同步谐振。文献[59]采用复转矩系数法分析了风速、串补度、线路电阻和转子侧换流器 PI 参数对双馈风电机组次同步振荡阻尼特性的影响,并提出了在双馈风机转子换流器中附加混合次同步阻尼控制器抑制系统次同步振荡。文献[60]基于复转矩分析法提出了适用于次同步振荡稳定器的瞬时无功功率次同步谐振抑制策略,并通过实时仿真与现场试验验证了策略的有效性。

2.4 时域仿真法

时域仿真法是通过建立包含风力发电机组、电力电子装置及电网元件的等值模型,在电磁暂态仿真软件中用数值积分方法求解并网系统动态特性的微分方程组,得到系统中变量随时间变化的响应曲线,从而分析系统动态特性的方法。时域仿真可以模拟元件从几百纳秒至几秒之间的电磁暂态及机电暂态过程,仿真过程不仅可以考虑风电机组、电力电子装置的控制特性,电网元件(如避雷器、变压器、电抗器等)的非线性特性,输电线路分布参数特性和参数的频率特性,还可以进行线路开关操作和各种故障类型模拟。

文献[15]采用基于 PSCAD 的时域仿真法分析了直驱风电场并入弱交流系统次同步振荡产生的机理,研究了交流电网强弱、风机出力、风机并网台数、风机控制参数及 SVC 对次同步振荡特性的影响。文献[23]通过基于 PSCAD 的时域仿真法分析得到双馈风电机组经串补并网系统 SSCI 产生的机理,并提出振荡的主要原因是转子侧变流器电流环的快速响应性能。文献[61]通过时域仿真分析法与特征值分析法研究了双馈风机在最大功率跟踪、恒转速和定功率运行区域的次同步振荡特性,结果表明风速越低,次同步振荡发生的风险越大。文献[62]利用电磁暂态仿真与 Prony 分析方法研究了风机传动链、变流器控制和串补电容对双馈风机并网系统 SSO 的影响,提出了在转子侧变流器附加滤波器抑制 SSO 的控制策略,并通过仿真验证了所提方案的有效性。文献[63]通过定义阻尼敏感指数(damping sensitivity index, DSI)提出一种风电并网系统等效方法,并通过仿真证明此方法的可行性与精确性,此方法将大大降低模型的复杂度与仿真计算时间。

时域仿真法的优点主要有:模型适用范围广泛,适用于非线性设备的暂态过程模拟,详细模拟控制和故障过程,分析不同强度扰动下的次同步振荡,可计算次同步等效电抗、复转矩系数等,为其

他分析方法做仿真验证^[47]。但缺点是难以分析次同步振荡的振荡模式、阻尼特性、产生机理、影响因素和预防与抑制策略等。

2.5 阻抗分析法

阻抗分析法通过建立电力电子装置的小信号频域阻抗模型,利用奈奎斯特判据或者推广的奈奎斯特判据对系统稳定性进行判定,是近年来国内外学者重点关注的理论方法。根据建立阻抗模型所用坐标系不同,阻抗分析又可分为:静止坐标中建立正、负序阻抗模型和 dq 坐标中建立阻抗模型^[64-71]。

J. Sun 教授于 2009 年提出了基于谐波线性化的电力电子装置正负序阻抗建模方法,得到了具有物理含义清晰的正负序阻抗以及应用简便的稳定性判据^[64,65]。本方法克服了传统相量模型在频域范围上的局限性以及电磁暂态模型不可线性化的问题,并且在此阻抗模型基础上建立的系统等效电路模型可以有效地揭示不同电力电子装置(新能源变流器、FACTS 及 HVDC 等)与电网之间相互作用,包括常见的次同步和超同步振荡问题的机理和根源,为解决这些问题提供了有效的解析手段。

文献[35-37]通过建立 MMC-HVDC 的小信号阻抗模型,利用阻抗分析法研究了大型双馈风电场经 MMC-HVDC 系统并网中次同步电流的分布与传播,并提出了基于附加次同步电流抑制的送端换流站控制策略。文献[66]利用此方法分析了海上风电场经 HVDC 并网的次/超同步振荡问题,建立了风电场的正、负序阻抗模型,并指出风机变流器电流环、锁相环参数及 HVDC 电压电流控制对系统稳定性的影响。文献[67]建立了 DFIG 的阻抗模型,通过奈奎斯特判据揭示双馈风机并入串补系统 SSR 产生的机理,并且分析了风速、串补度和机侧变流器控制参数对 SSR 稳定性的影响。文献[68]提出一种基于 dq 坐标的阻抗建模方法,揭示了变流器并网失稳的主要原因是 dq 坐标系中变流器阻抗的负电阻阻抗特性,并通过改善锁相环的参数有效提高了系统的稳定性。文献[69]提出电压源换流器并网系统的稳定性主要由 VSC 输入导纳的固有特性决定,研究表明系统不稳定的原因是系统特征方程含有非负的特征根,并提出了减小不稳定区域的参数设计方案。文献[70]在同步旋转坐标系下利用阻抗方法建立了 DFIG 并网系统等效二阶串联 RLC 电路模型,此模型可以定量分析 SSR 的阻尼特性与振荡频率。文献[71]提出一种基于阻抗的聚合 RLC 模型,此模型不仅可以通过电路参数量化分析振荡产生机理与特性,还可以用于分析 GSC 的直流电压控

制、RSC的外环控制以及DFIG的并网台数对振荡的影响,已成功用于分析实际工程问题。

由于该理论是在小干扰理论下衍生的,所以它不能用于分析TA作用下的次同步振荡,而且随着电力电子化电力系统的普及,越来越多的电力电子设备并入公共电网,对于基于阻抗的多输入多输出系统稳定性判据需要进一步的深入研究。但是阻抗分析方法有一定的局限性,难以应用到直流电压、转速等秒级时间尺度动态问题的分析和研究中^[72]。

2.6 幅相运动分析法

文献[72]提出了基于幅相运动的电力电子化电力系统电压功角稳定分析方法。文献[73]考虑直流电压控制的影响提出了基于幅相运动方程的并网变流器建模方法,建立了内在电势与功率波动之间的状态方程,并与时域仿真、特征根方法对比证明了此方法的可行性。文献[74]基于幅相运动方程分析了电压源换流器并入弱电网时电流环控制范围内的相互作用,提出可以将电流环分为自稳定和与电网互作用2部分,通过分析得到加速电流控制将会降低系统阻尼,恶化系统稳定性。文献[75]通过建立降阶的小信号模型研究了DFIG并网系统直流电压稳定问题,模型中虽然忽略了电流环的影响,但是考虑了运行点、电网强度控制外环作用。

3 次同步振荡的抑制措施

自2009年美国德州双馈风电场发生次同步振荡引起关注之后,国际上众多学者对风电场并网系统的次同步振荡进行了大量的研究,提出了多种方法以抑制次同步振荡的产生或者降低其发生的风险。本文根据抑制机理的不同分为以下几种类型:改变电气参数、附加阻尼控制、附加滤波装置^[5,76]。

3.1 改变电气参数

3.1.1 改变系统运行方式

在风电场并网系统实际运行过程中,如果已经检测到系统中存在次同步振荡现象,可通过避开不安全的运行方式来避免事故的进一步扩大。例如切除风电机组,切除无功补偿设备,SVG恒电压控制改为恒无功控制、风电场或者HVDC降功率运行等等。文献[15]指出SVG恒电压控制改为恒功率控制后会有效降低次同步振荡的发生概率。这是一种成本较低、工程实用的措施,但不能完全解决次同步振荡,而且会限制风电场和电力系统的经济运行,仅作为临时应急措施或辅助措施。

3.1.2 控制风机合理短路比

大型直驱风电场接入弱交流系统或者双馈风

电场经串补并入电网时会出现次同步振荡风险,因此可在规划阶段通过评估风电机组接入总容量与电网短路容量以及串补度的关系,合理规划风电发展。适当增强网架结构,降低输电线路与变压器阻抗,提高风电场并网点短路比,同时优化输电线路串补度,也可以降低次同步振荡发生风险。但是增强网架结构会大幅度地增加风电建设成本,经济效益不高。建设初期合理的规划风电装机容量更对解决此问题更有帮助。

3.1.3 优化风电机组控制器

通过优化控制器参数、改善控制策略,提高风电机组抑制次同步振荡的能力,改变风电机组的输出阻抗特性,从而改变风电机组与电网相互作用的次同步振荡谐振点,可以有效降低次同步振荡对系统安全稳定运行的危害。文献[66]通过优化风电机组变流器电流环和锁相环的控制参数降低了风电场并网系统次同步振荡发生的风险。

3.1.4 串联型FACTS装置

常用来抑制风电并网系统次同步振荡的串联型FACTS装置主要包括可控串联补偿电容器(TCSC)、门级控制串联电容器(GCSC)、静止同步串联补偿器(SSSC)等^[77-83]。文献[80]分析了TCSC和GCSC对风电场次同步振荡的抑制策略,并通过仿真验证了大干扰下对SSCI的阻尼效果。虽然串联型FACTS装置通过合理的设计能够取得很好的抑制效果,但它串接于系统之中,结构上不够灵活,缺乏可靠性,且全控型的FACTS装置价格昂贵。

3.2 附加阻尼控制

3.2.1 风电机组变流器附加阻尼控制

文献[84-88]指出在风电机组转子侧变流器(RSC)或者网侧变流器(GSC)控制系统中附加阻尼控制,可以抑制风电场的次同步振荡,且转子侧附加阻尼效果较好。文献[89]通过建立风电串补系统的传递函数,提出采用次同步电流附加阻尼控制方法抑制双馈风电并网系统次同步谐振。文献[90-92]提出在DFIG的转子换流器的控制器内电流环d轴或者q轴上附加一个陷波器以抑制次同步振荡,特征根分析与仿真结果证明所提方法有效,并且d轴比q轴抑制效果较好。此方法通过修改双馈风电机组变流控制器控制方式,引入阻尼控制环节实现抑制次同步振荡的方式,不需要额外增加设备,是一种经济有效的方式。但是在工程实际中会受到控制器硬件的限制,在已建成风电场的风电机组中难以增加额外的阻尼控制回路。

3.2.2 并联 FACTS 装置的次同步阻尼控制

抑制风电场并网系统次同步振荡的主要并联 FACTS 装置包括静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)、统一潮流控制器(UPFC)以及超导储能(SMES)等^[93-102]。文献[93]采用概率法研究了多运行方式下风电场次同步振荡的统计属性,利用参与因子分析其相互作用模式,并提出了基于附加阻尼的 SVC 抑制措施。文献[94]提出一种基于 VSC 的集中抑制风电并网系统 SSCI 引起次同步振荡的装置一次同步振荡阻尼器(subsynchronous damper, SSD),通过特征值分析设计了 SSD 的控制参数为 SSCI 提供正阻尼,并利用时域仿真验证所提装置的有效性。文献[95]提出一种基于统一潮流控制的串联侧与并联侧换流器附加阻尼抑制次同步振荡的方法。文献[96]指出可以通过改变 UPFC 的控制与风电机组桨距角控制中附加阻尼控制提高次同步频率下的电气阻尼,从而抑制系统发生次同步振荡。文献[97]提出一种同时注入次同步与超同步电流的次同步振荡阻尼器。文献[98]针对并联型有源次同步振荡抑制器提出了只发次同步或超同步电流的单频调制阻尼控制策略。文献[99]提出一种由多模式补偿电流计算器与补偿电流发生器组成的新型机端次同步阻尼器,同时研发了一台 10 MVA 的样机。文献[100]通过定义稳定性能指标(stabilizing ability index, SAI)对附加励磁阻尼抑制 SSR 的性能进行了量化分析。文献[101]提出一种基于 SVG 的有源阻尼方式来抑制系统振荡的发生。

相比串联型 FACTS 装置,并联型 FACTS 装置在结构上灵活可靠,在工程使用上更为方便,但是并联型的抑制能力有限,不能从根本上解决次同步振荡问题。

3.3 附加滤波装置

3.3.1 阻塞滤波器

与抑制火电机组的次同步振荡相似,在风电场并网系统输电线路串联在次同步频率下具有高阻抗,工频下具有低阻抗特性的阻塞滤波器(block filter, BF),阻断风电机组机械系统与电网电气系统的相互作用,从而可抑制次同步振荡的产生^[5,103]。这种方法的优点是结构简单,但是存在一些缺点制约了其大规模工程应用:1) BF 对频率十分敏感,当环境温度导致元件参数变化时,容易失谐;2) 体积大、造价高,运行时会有功率损耗且维护困难。

3.3.2 旁路阻尼滤波器

旁路阻尼滤波器(bypass damping filter, BDF)是并联在串补线路中,由一个电阻和多个 LC 并联

谐振滤波器串联组成。正常运行状况下, BDF 在工频下具有高阻抗,在次同步频率下具有低阻抗,因此滤波器中的工频电流很小,次同步电流很大,从而抑制次同步振荡的发生^[5,104]。BDF 对于 IGE 的抑制作用最为有效,它可以抑制频率在 90%基频以下的次同步振荡,但是高于此范围, BDF 就无能为力了。与 BF 类似, BDF 也存在参数整定困难、容易失谐等缺点,目前还没有实际投运的工程。

4 结论与展望

由于我国电网规模庞大,网架结构复杂,各风电基地与电网相连接的方式也不尽相同,风电机组类型多样、控制参数各异,多种电力电子装置接入,导致西北和华北地区振荡机理亦不同。因此,大规模风电场并网系统的次同步振荡的产生机理、振荡特性、影响因素、抑制策略等亟待深入研究。未来的研究方向可从以下几方面进行。

1) 无串联补偿的以直驱风电机组为主的大型风电场次同步振荡问题。目前针对接入弱交流系统下以直驱风电机组为主的风电场的次同步振荡问题研究较少,其振荡发生机理与特性较为复杂,参与因子较多,亟需开展研究。

2) FACTS 装置(静止无功补偿器 SVC、静止无功发生器 SVG 等)、VSC-HVDC 等电力电子装置对风电并网系统次同步振荡特性的影响需要进一步的深化研究。

3) 大规模风电并网系统的异构型多机次同步振荡问题分析。现有针对风电场并网系统问题的研究大多以单机无穷大系统为背景,多机系统仅考虑了相同控制参数、同种类型风电机组的情况,未考虑不同类型、不同控制参数风电机组间的相互作用。相应的抑制措施同样未考虑对风电机组种类各异、控制参数不同而且数量庞大的大规模风电场并网系统的适用性。

参考文献

- [1] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [2] IEEE Committee Report. First supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 1872-1875.
- [3] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Proposed terms and definitions for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2): 506-511.
- [4] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Terms, definitions

- and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1333.
- [5] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to subsynchronous resonance problems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(5): 1810-1818.
- [6] IEEE Committee Report. Reader's guide to subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 150-157.
- [7] F Mei, B al. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 728-736.
- [8] 肖湘宁, 郭春林, 高本峰, 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: 116-132.
- [9] 高本峰, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 基于实时数字仿真器的 SVC 抑制次同步振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 6-10. Gao Benfeng, Xiao Xiangning, Zhao Chengyong, et al. Study on mitigation of SSO with SVC based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 6-10(in Chinese).
- [10] L Wang, X R Xie, Q R Jiang, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [11] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 10-15. Bi Tianshu, Kong Yongle, Xiao Shiwu, et al. Review of subsynchronous oscillation with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 10-15(in Chinese).
- [12] Andres E Leon, Jorge A Solsona. Subsynchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on power systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [13] L C Gross. Subsynchronous grid conditions: New event, new problem, and new solutions[C]//Proceedings of Western Protective Relay Conference. Spokane, Washington, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [14] J Adams, C Carter, S H Huang. ERCOT experience with subsynchronous control interaction and proposed remediation[C]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society Transmission, Distribution Conference Exposition. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [15] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风电机组风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372. Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [16] 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): 20-26. Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [17] G Irwin, A Jindal, A Isaacs. Subsynchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [18] B Badrzadeh, M Sahni, Y Zhou, et al. General methodology for analysis of subsynchronous interaction in wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1858-1869.
- [19] T Ackermann, R Kuwahata. Lessons learned from international wind integration studies[C]//AEMO Wind Integration WP4(A). Melbourne, Australia: Commissioned by Australian Energy Market Operator, 2011: 52-67.
- [20] R Varma, S Auddy, Y Semsedini. Mitigation of subsynchronous resonance in a series-compensated wind farm using FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1645-1654.
- [21] L Fan, R Kavasseri, Z L Miao, et al. Modeling of DFIG based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [22] Jiang Hao, Liu Hui, Wu Linlin, et al. Review of three types of oscillations between wind farms and other power system components[C]//12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China: IET, 2016: 1-6.
- [23] 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[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079. Li Ran, Lu Yun, Liu Huilan, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079(in Chinese).
- [24] P Pourbeik, R Koessler, D Dickmader, et al. Integration of large wind farms into utility grids (Part 2 - Performance issues)[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Washington, USA: IEEE, 2003: 1520-1525.
- [25] R Varma, A Moharana. SSR in double-cage induction generator based wind farm connected to series-compensated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2573-2583.
- [26] C Zhu, L Fan, M Hu. Control and analysis of DFIG-based wind turbines in a series compensated network for SSR damping[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [27] Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [28] C Zhu, M Hu, Z Wu. Parameters impact on the performance of a double-fed induction generator-based wind turbine for subsynchronous resonance control[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(2): 92-98.
- [29] D Suriyaarachchi, U Annakkage, C Karawita, et al. A procedure to study subsynchronous interactions in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 377-384.
- [30] T Ackermann, R Kuwahata. Lessons learned from international wind integration studies[R]. AEMO Wind Integration WP4(A). Commissioned by Australian Energy Market Operator, 2011.
- [31] 高本峰, 张学伟, 李忍, 等. 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(7): 1-10. Gao Benfeng, Zhang Xuewei, Li Ren, et al. Studies of subsynchronous oscillation in system with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(7): 1-10(in Chinese).
- [32] 于淼, 谢欢, 宋玮. 大规模风电场汇集地区次同步振荡研究[J]. 华北电力技术, 2016(8): 18-23. Yu Miao, Xie Huan, Song Wei. Study of subsynchronous oscillation problem in large-scale wind power influx area[J]. North China Electric Power, 2016(8): 18-23(in Chinese).
- [33] Shafiu A, Anaya Lara O, Bathurst G, et al. Aggregated wind turbine models for power system dynamic studies[J]. Wind Engineering, 2006, 30(3): 171-185.
- [34] Vladislav Akhmatov. 风力发电用感应发电机[M]. 北京: 中国电

- 力出版社, 2009: 216-230.
- [35] Lü Jing, Cai Xu, Marta Molinas. Frequency domain stability analysis of MMC-based HVDC for wind farm integration[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 4(1): 141-151.
- [36] 吕敬, 蔡旭, 张占奎, 等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3771-3781.
Lü Jing, Cai Xu, Zhang Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3771-3781(in Chinese).
- [37] 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[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4852-4860.
Lü Jing, Dong Peng, Shi Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-Based HVDC with large Doubly-Fed Induction Generator-Based wind farm integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4852-4860(in Chinese).
- [38] 赵欣, 高山, 张宁宇. SVC 接入位置对次同步振荡的影响机理与 SVC 控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(25): 107-114.
Zhao Xin, Gao Shan, Zhang Ningyu. Influence of SVC location on subsynchronous oscillation and SVC control strategy research[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(25): 107-114(in Chinese).
- [39] Lorenzo Zeni, Robert Eriksson, Spyridon Goumalatsos, et al. Power oscillation damping from VSC - HVDC connected offshore wind power plants[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(2): 829-838.
- [40] Mohammad Amin, Marta Molinas. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(1): 378-392.
- [41] E Larsen. Wind generators and series-compensated AC transmission lines[C]//*Proceedings of IEEE Power and Energy Society Transmission, Distribution Conference Exposition*. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2012: 1-4.
- [42] J Adams, C Carter, S H Huang. ERCOT experience with subsynchronous control interaction and proposed remediation[C]//*Proceedings of IEEE Power and Energy Society Transmission, Distribution Conference Exposition*. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [43] 高本峰, 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 subsynchronous control interaction in wind turbine generators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(16): 154-161(in Chinese).
- [44] Xie Xiaorong, Zhang Xu, Liu Huakun, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7867094/>. DOI:10.1109/TEC.2017.2676024.
- [45] A E Leon, J A Solsona. Performance improvement of full-converter wind turbines under distorted conditions[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(7): 652-660.
- [46] 张剑, 肖湘宁, 高本峰, 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, XiaoXiangning, 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(in Chinese).
- [47] 徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. *电网技术*, 1999, 23(6): 36-39.
Xu Zheng, Luo Huiqun, Zhu Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations[J]. *Power System Technology*, 1999, 23(6): 36-39(in Chinese).
- [48] Suriyaarachchi DHR, Annakkage U D, Karawita C, et al. A procedure to study subsynchronous interactions in wind integrated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 28(1): 377-384.
- [49] 王波, 卢继平, 龚建原, 等. 含双馈机组转子侧附加控制的风电场次同步振荡抑制方法[J]. *电网技术*, 2013, 39(9): 2580-2584.
Wang Bo, Lu Jiping, Gong Jianyuan, et al. A method to suppress subsynchronous oscillation of wind farm composed of doubly fed induction generators with additional rotor side control[J]. *Power System Technology*, 2013, 39(9): 2580-2584(in Chinese).
- [50] 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(in Chinese).
- [51] 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(in Chinese).
- [52] 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(in Chinese).
- [53] Esmail Ebrahimzadeh, Frede Blaabjerg, Wang Xiongfei, et al. Modeling and identification of harmonic instability problems in wind farms[C]//*IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Milwaukee, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [54] I M Canay. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part I: theory[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982(10): 3630-3638.
- [55] 王晋, 郭春林, 肖湘宁, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的复转矩系数法的实现[J]. *华东电力*, 2010(12): 1854-1857.
Wang Jin, Guo Chunlin, Xiao Xiangning, et al. Realization of PSCAD/EMTDC based complex torque coefficient approach[J]. *East China Electric Power*, 2010(12): 1854-1857(in Chinese).
- [56] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等. 含 TCSC 的电力系统次同步谐振的复转矩系数分析法[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(12): 16-20.
Lü Shirong, Liu Xiaopeng, Guo Qiang, et al. Complex torque coefficient method for analysis of subsynchronous resonance in power systems with TCSC[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(12): 16-20(in Chinese).
- [57] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等. 次同步谐振分析中复转矩系数与特征根之间的关系[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(3): 16-19.
Lü Shirong, Liu Xiaopeng, Guo Qiang, et al. Relationship between complex torque coefficients and eigenvalues in subsynchronous resonance analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(3): 16-19(in Chinese).
- [58] 董晓亮, 谢小荣, 韩英铎, 等. 基于定转子转矩分析法的双馈风机次同步谐振机理研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4861-4869.
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Han Yingduo, et al. Mechanism study

- of DFIG-related SSR based on separate stator and rotor torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4861-4869(in Chinese).
- [59] 高本峰, 李忍, 杨大业, 等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-21.
Gao Benfeng, Li Ren, Yang Daye, et al. Damping characteristics and countermeasures of DFIG subsynchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-21(in Chinese).
- [60] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 次同步振荡动态稳定器抑制若阻尼次同步振荡的机理与实验[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 135-141.
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): 135-141(in Chinese).
- [61] 董晓亮, 谢小荣, 刘辉, 等. 双馈风机串补输电系统全运行区域的次同步特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2429-2433.
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Liu Hui, et al. SSR characteristics of a wind farm connected to series-compensated transmission system under all operation region of DFIG[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2429-2433(in Chinese).
- [62] 黄耀, 王西田, 陈昆明, 等. 双馈风电场次同步相互作用的机理仿真验证与实用抑制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2364-2369.
Huang Yao, Wang Xitian, Chen Kunming, et al. SSI mechanism simulation validation and practical mitigation strategy of DFIG-based wind farms[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2364-2369(in Chinese).
- [63] Chen Wuhui, Wang Danhui, Xie Xiaorong, et al. Identification of modeling boundaries for SSR studies in series compensated power networks[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7857807/>. DOI:10.1109/TPWRS.2017.2669402.
- [64] Sun J. Small-signal methods for AC distributed power systems-a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [65] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [66] Liu Hanchao, Sun J. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1181-1190.
- [67] Miao Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [68] Bo Wen, Dong Dong, Dushan Boroyevich, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26-33.
- [69] Lennart Harnefors, Wang Xiongfei, Yepes A G, et al. Passivity-based stability assessment of grid-connected VSCs-an overview[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 116-125.
- [70] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Li Yu, et al. A small-signal impedance method for analyzing the SSR of series-compensated DFIG-based wind farms[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [71] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Zhang Chuanyu, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [72] 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): 5145-5155.
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): 5145-5155(in Chinese).
- [73] Yuan Hao, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7819461/>. DOI:10.1109/TPWRS.2017.2653939.
- [74] Yan Yabing, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing. Interaction analysis of multi VSCs integrated into weak grid in current control time-scale[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [75] Jiabing Hu, Yunhui Huang, Dong Wang, 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.
- [76] 杨琳. 新能源电力系统的次同步振荡与阻尼控制特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [77] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 26-30.
Ge Jun, Tong Luyuan, Geng Juncheng, et al. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 26-30(in Chinese).
- [78] H A Mohammadpour, Y J Shin, E Santi. SSR analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a gate-controlled series capacitor[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Fort Worth, Texas, USA: IEEE, 2014: 3110-3117.
- [79] H A Mohammadpour, M M Islam, D Coats, et al. Subsynchronous resonance mitigation in wind farms using gate-controlled series capacitor[C]//4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Arkansas, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [80] R K Varma, S Auddy, Y Semsedini. Mitigation of subsynchronous resonance in a series-compensated wind farm using FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1645-1654.
- [81] E Moursi, M S, V Khadkikar. Novel control strategies for SSR mitigation and damping power system oscillations in a series compensated wind park[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 5335-5342.
- [82] 吕世荣. 具有可控串联电容补偿电力系统的次同步谐振研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- [83] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等. TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 14-18.
Lü Shirong, Liu Xiaopeng, Guo Qiang, et al. Mechanism analysis for mitigating subsynchronous resonance by TCSC in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 14-18(in Chinese).
- [84] S O Faried, I Unal, D Rai, J Mahseredjian. Utilizing DFIG-based wind farms for damping subsynchronous resonance in nearby turbine-generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 452-459.
- [85] Lingling Fan, Zhixin Miao. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3):

- 349-358.
- [86] Chanxia Zhu, Lingling Fan, Minqiang Hu. Subsynchronous resonance damping via doubly fed induction generator[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(12): 876-883.
- [87] L Fan, C Zhu, Z Miao, 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.
- [88] R K Varma, S Auddy. Mitigation of subsynchronous oscillations in a series compensated wind farm with static var compensator[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2006: 331-337.
- [89] 胡应宏, 邓春, 谢小荣, 等. 双馈风机-串补输电系统次同步谐振的附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1169-1173.
Hu Yinghong, Deng Chun, Xie Xiaorong, et al. Additional damping control of DFIG series compensated transmission system under subsynchronous resonance[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1169-1173(in Chinese).
- [90] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Li Yu, et al. Damping subsynchronous resonance in series-compensated wind farms by adding notch filters to DFIG controllers[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia(ISGT ASIA). Latin, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [91] Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Damping DFIG-associated SSR by adding subsynchronous suppression filters to DFIG converter controllers[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [92] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Li Yu, et al. Damping DFIG-associated SSR with subsynchronous suppression filters: a case study on a practical wind farm system[C]//International Conference on Renewable Power Generation. Beijing, China: IEEE, 2015: 1-6.
- [93] 边晓燕, 施磊, 周歧斌, 等. 基于概率法的并网双馈风现场次同步相互作用及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2740-2747.
Bian Xiaoyan, Shi Lei, Zhou Qibin, et al. Subsynchronous interaction and its suppression measurement caused by grid-integration of DFIG-based wind farms using probabilistic method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2740-2747(in Chinese).
- [94] Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, 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.
- [95] 朱鑫要, 金梦, 李建生, 等. 统一潮流控制器附加阻尼抑制次同步谐振的理论及仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 44-49.
Zhu Xinyao, Jin Meng, Li Jiansheng, et al. Theory and simulation of supplementary damping control for unified power flow controller to mitigate sub-synchronous resonance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 44-49(in Chinese).
- [96] 顾威, 李兴源, 王渝红, 等. UPFC 对风电场次同步谐振的抑制作用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 101-105.
Gu Wei, Li Xingyuan, Wang Yuhong, et al. Mitigation effects of UPFC on subsynchronous oscillation in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 101-105(in Chinese).
- [97] Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, et al. Mitigation of multimodal subsynchronous resonance via controlled injection of super-synchronous and subsynchronous currents[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1335-1344.
- [98] 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(in Chinese).
- [99] Xie Xiaorong, Wang Liang, Guo Xijiu, et al. Development and field experiments of a generator terminal subsynchronous damper[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1693-1671.
- [100] Xie Xiaorong, Liu Huakun, Han Yingduo. SEDC's ability to stabilize SSR: a case study on a practical series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3092-3101.
- [101] V P Boopathi, R Muzamil Ahamed, R P Kumudini Devi, et al. Analysis and mitigation of subsynchronous oscillations in a radially-connected wind farm[C]//Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy. Bangalore, India: IEEE, 2014: 13-15.
- [102] 田旭, 姜齐荣, 谢小荣. 电力系统次同步谐振抑制措施综述[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 74-79.
Tian Xu, Jiang Qirong, Xie Xiaorong. Review of measures to mitigate subsynchronous resonance in power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 74-79(in Chinese).
- [103] 马凯. 基于阻塞滤波器抑制次同步谐振的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [104] P Belkin. Event of 10-22-09[C]//CREZ Technical Conference, 2010. Texas, USA: Electric Reliability Council of Texas, 2010: 1-6.



王伟胜

收稿日期: 2017-01-16。

作者简介:

王伟胜(1968), 男, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与并网技术, 电力系统分析、稳定和控制等, E-mail: wws@erpi.sgcc.com.cn;

张冲(1988), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电与并网技术, 新能源发电并网系统次同步振荡, E-mail: zhangchongdzy@163.com。

(责任编辑 李兰欣)