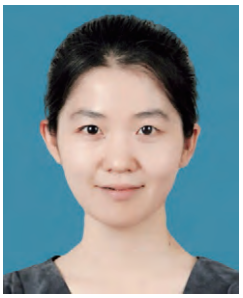
大规模风电经串补送出引起的次同步振荡问题研究综述

近年来风力发电发展迅速，为了解决风电消纳问题，提高风电的利用率，大规模风电外送势在必行。串联补偿技术是当前解决大规模风电外送的经济有效措施之一，但经串联补偿外送风电会引发次同步振荡。首先介绍了三种常见风力发电机组的结构及其特性，然后根据各类机组的特征，归纳了经串补送出引发次同步振荡的产生机理、相关特性及抑制措施，阐述了当前大规模风电送出系统次同步振荡问题的分析方法，最后对后续需要深入研究的部分进行了说明。

肖　莞　徐衍会／华北电力大学电气与电子工程学院



肖　莞／硕士研究生

关键词／Keywords
风电送出·
次同步振荡·
串联补偿·
分析方法·
抑制措施·

0　引言

风能是目前国内外最具商业潜力与活力的可再生能源之一，大规模开发利用风能是我国能源战略的重要组成部分。“十二五”期间，我国已在冀北、蒙西、蒙东、甘肃、新疆、江苏、山东、吉林和黑龙江建立了九个大型风电基地，预计至2020年，我国风电装机规模将超过2亿kW，其中海上风电装机容量达到3 000万kW，风电年发电量达到3 900亿kW·h，风电发电量在全国发电量中的比重超过5%[1]。在上述九个大型风电基地中，除江苏、山东外，其余发电基地的风电消纳能力有限，大容量、远距离风电外送势在必行。串联补偿技术可以提高远距离输电系统的输电容量及稳定性，是当前解决大规模风电外送的经济有效措施之一。与火力发电机组类似，风力发电机组经串补送出也可能会引发次同步振荡（Sub－Synchronous Oscillation，SSO）现象，造成机组脱网或设备损坏。但由于风力发电机组自身结构、并网方式与传统火力发电机组有着本质区别，加之风电场的构成及其系统的复杂性，大规模风电经串补送出所引起的新的次同步振荡问题将更为繁复，该课题的研究也极具挑战性、创新性。

根据相互作用的对象不同，目前风力发电机组的次同步振荡现象可归纳为3种类型：即次同步谐振（Sub-Synchronous Resonance，SSR）、次同步控制相互作用（Sub-Synchronous Control Interaction，SSCI）和装置引起的次同步振荡（Sub-Synchronous Torsional Interaction，SSTI）。其中，次同步谐振是指风力发电机组轴系与固定串补之间的相互作用；次同步控制相互作用是指由风力发电机组控制器与固定串补之间的相互作用引发的次同步振荡；装置引起的次同步振荡主要是指风力发电机组控制器或者相邻的FACTS装置控制器与风力发电机组轴系之间的作用[2-3]。

针对大规模风电经串补送出引起的次同步振荡问题，本文首先介绍了三种常见风力发电机组的结构及其特性，然后根据各类机组的特征，归纳了经串补送出引发次同步振荡的产生机理、相关特性及抑制措施，阐述了当前大规模风电送出系统次同步振荡问题的分析方法，最后对当前研究工作中的不足及后续需要继续开展深入研究的方向予以说明。

1　常见机组的结构及特征

当前应用于风力发电领域的机型主要有三种，即笼型异步风力发电机组、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

双馈异步风力发电机组（Doubly Fed Induction Generator，DFIG）和永磁同步风力发电机组。机组的类别不同，经串补送出引起次同步振荡的类型也不同。

1.1 笼型异步风力发电机组

笼型异步风力发电机组应用较早，其结构较为简单，由定桨距的风力机、齿轮箱、笼型异步发电机、软启动器和并联无功补偿电容器组成，如图1所示。笼型异步发电机的定子回路直接与电网相连，省略了大功率变流器；其转子通过机组轴系与风轮连接。机组轴系主要包括高速轴、齿轮箱和低速轴三部分。齿轮箱的存在增加了轴系的柔性，轴系刚度约为0.15～0.40，轴系自然振荡频率很小，一般为1～2 Hz。笼型异步发电机在额定转速附近运行，正常工作时为恒速恒频，因此其风能转化效率较低。当前，风电场中还存在一定数量在运的笼型异步风力发电机组，但随着技术的发展，其将逐渐被更高效的新型机组所取代。

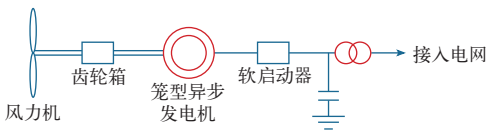


图1 笼型异步风力发电机组结构示意图

1.2 双馈异步风力发电机组（DFIG）

如图2所示，DFIG由风力机、齿轮箱、异步发电机、转子侧变流器（Rotor Side Converter，RSC）和网侧变流器（Grid Side Converter，GSC）组成，其发电机定子回路直接与电网连接，转子回路通过变流器与电网连接，由于定子和转子回路均可以实现向电网馈电，故称为双馈。DFIG的轴系和笼型异步风力发电机组的轴系类似，也具有低自然振荡频率的特点。此外，通过变流器及各类控制，DFIG可以实现有功、无功的解耦控制，确保在不同风速下机组的变速恒频运行，更高效地捕捉风能。凭借较高的风能转换效率以及优良的动态调节特性，DFIG成为当前主流的风力发电机组。

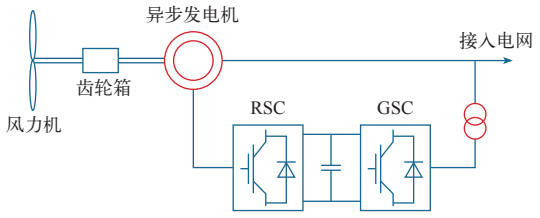


图2 双馈异步风力发电机组结构示意图

1.3 永磁同步风力发电机组

如图3所示，永磁同步风力发电机组由风力机、永磁同步发电机、机侧变流器及其控制系统、网侧变流器及其控制系统和滤波电路等组成，其发电机定子通过AC/DC/AC或AC/AC变频器与电网连接，风力机与发电机直接相连。由于省去了齿轮箱，其轴系刚度要大于以上两种机组，但同时也降低了机组的维护成本，提高了机组运行可靠性和工作寿命。永磁同步风力发电机组采用永磁体励磁，具有较高的转化效率。此外，永磁同步风力发电机组能通过对定子侧变频器的控制，实现最大风能跟踪和有功、无功的解耦控制，且其接入电网稳定性好，具有较好的低电压穿越能力。永磁同步风力发电机组也是目前主流的风力发电机组之一，但由于永磁材料等成本较高、发电机结构复杂及重量较大等因素，其发展收到了一定制约。

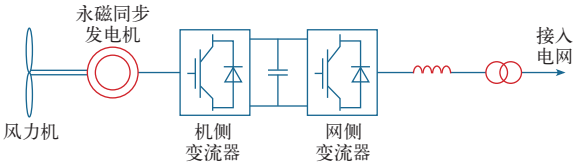


图3 永磁同步风力发电机组结构示意图

2 大规模风电经串补送出引起的次同步振荡问题

近年来，有关风电经串补外送引起的次同步振荡的研究工作主要集中在风力发电机组轴系扭振与串补电网之间引起的SSR现象，以及2009年9月美国德克萨斯州风电场次同步振荡事故后引起广泛关注的DFIG的变流器控制与串补输电线路之间的SSCI问题。而SSTI指风力发电机组控制器或

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

者相邻的FACTS装置控制器与风力发电机组轴系之间的作用，在风电经串补送出过程中一般不会发生，且实际工程中尚未遇到此类问题，因此研究较少。当前，有关SSTI的研究主要集中于火力发电机组经高压直流输电（HVDC）外送引起的次同步振荡问题。

2.1 次同步谐振（SSR）

笼型异步风力发电机组和DFIG的发电机定子回路都直接与电网相连，类似与火力发电机组，谐振电流进入发电机定子绕组进而引发SSR现象。但由于笼型异步风力发电机组和DFIG轴系较短、轴系自然扭振频率较低，需很高的串补度才能激发轴系扭振模态，在适当的串补度下，笼型异步风力发电机组和DFIG经串补并网引发SSR的概率较小[4]。而对于永磁同步风力发电机组，由于其发电机定子回路通过AC/DC/AC或AC/AC变频器与电网连接，而非与电网直接耦合，因此谐振电流无法进入其发电机定子绕组内，因此永磁同步风力发电机组经串补并网不会引发SSR[5]。

当前，对于风力发电机组采用串补外送时引发SSR的机理、分析方法和抑制措施已经开展了相关研究。文献[6-9]探讨了笼型异步风力发电机组采用串补外送时发生SSR的机理，利用时域仿真法研究了笼型异步风力发电机组SSR的影响因素，指出线路串补度越高、输出有功功率越高，次同步谐振发散越严重，并给出了有关抑制措施及其仿真结果。文献[10-12]通过建立DFIG模型，并利用时域仿真法和特征值分析法研究导致DFIG发生SSR的主要因素，研究指出：风速越低，线路串补度越高，谐振频率越高，DFIG的SSR越严重；转子侧换流器（RSC）电流跟踪控制比例系数越大，系统阻尼越差。但上述研究中，线路总串补度在50%以上时才会引发SSR现象，与工程实际中的串补度不符，且分析方法较为单一；此外，研究中未分析多台风力发电机组并网对SSR的影响，并未对DFIG导致SSR的机理及上述因素如何影响其特性进行解释。

2.2 次同步控制相互作用（SSCI）

自2009年美国德克萨斯州某风电场的次同步振荡事故后，SSCI问题开始得到广泛关注。SSCI问题是随着风电发展出现的一种新型次同步振荡形式，与SSR和SSTI不同，SSCI的发生和机械系统无任何联系，是由风力发电机组控制器与固定串补之间的相互作用引起的，其频率和衰减率主要由风力发电机组控制器参数和输电系统参数共同决定，与轴系固有模态频率无关。

对于当前风电场中常见的三种机型，笼型异步风力发电机组由于其发电机定子回路直接与电网相连，系统中无电力电子装置，因此其在采用串补外送风电时不存在SSCI问题。文献[13-14]的研究也表明，笼型异步风力发电机组不存在SSCI问题。永磁同步风力发电机组的发电机定子通过变频器与电网连接，虽然存在电力电子装置，但发电机和电网不直接耦合，谐振电流无法进入发电机内，因此其采用串补外送风电时也不存在SSCI问题。文献[15-16]通过时域仿真也表明，永磁同步风力发电机组不会发生SSCI问题。而对于DFIG，其发电机定子回路直接与电网连接，转子回路通过换流器与电网连接，既与电网有直接的耦合关系，又含有复杂的电力电子控制装置，因此其采用串补外送风电时易发生SSCI问题。

近年来，有关SSCI的产生机理、特性分析和抑制措施的研究工作取得了一些初步成果。

1）在产生机理方面，文献[17]阐述了DFIG采用串补外送风电时SSCI发生的原因。文献[18-20]的研究表明，SSCI发生的原因是风电机组的快速直接电流控制导致系统出现负阻尼。系统发生扰动所产生的谐振电流会在发电机转子上感应出对应的次同步电流，进而引起转子电流波形畸变和相位偏移。转子侧控制器感受到此变化后会调节逆变器输出电压，引起转子中实际电流的改变。如果输出电压助增转子电流增大，谐振电流的振荡将会加剧，进而导致系统震荡，引发SSCI。

2）在特性分析方面，针对控制器参数，目前有研究认为控制器内、外环参数对SSCI的影响很

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大[13,17,21,23]，但也有的研究认为与控制器有关的状态变量并不是SSCI的主要影响因素[25-26]。针对系统参数，目前的研究认为风速与串补度均会对SSCI产生影响。文献[13,21,22,24]通过理论分析得出随着风速、系统阻尼的增大，系统稳定性增强；文献[19,25]通过理论分析得出随着串补度的提高，振荡频率增大，系统等效电阻下降，使得系统趋于不稳定。

3）在抑制措施方面，目前提出的抑制SSCI问题的措施主要有优化DFIG控制器、将固定串补替换为可控串补、安装SSCI保护继电器、合理安排系统运行方式及合理配置各类型风力发电机组的比例等[26]。

3 大规模风电送出系统次同步振荡问题分析方法

目前，已提出的风电场次同步振荡分析方法中，几种典型的分析方法有：频率扫描分析法、特征值分析法、复转矩系数法和时域仿真法，它们各有优缺点和适用范围。

3.1 频率扫描分析法

频率扫描分析法是一种用于串补系统次同步振荡分析的工具，可以筛选出具有潜在谐振风险的系统运行条件，是一种近似的线性方法。利用该方法分析问题时，需将研究的相关系统用正序网来模拟；除待研究的发电机之外的网络中的其他发电机用次暂态电抗等效电路来模拟，对于分析含固定串补系统中的SSR问题十分有效。其优点是所需要的原始数据较少，计算方法简单，物理概念明确；缺点是用其所得的结果是近似的，只能作为筛选可能发生SSCI的系统的工具，无法准确、定量地研究系统发生SSCI的详细特性。

3.2 特征值分析法

特征值分析法是通过建立系统的小扰动线性化模型，求解特征值、特征向量等来分析系统的动态响应的方法。可以分析振荡模式及其阻尼特性；可以找出与SSCI强相关的参与因子，以便进行监测；可以对状态变量进行灵敏度分析，以便采取有效的预防对策。其优点是可以得到上述大量有用的信息，易得出抑制策略实施前后的特征值变化情况；缺点是对系统的描述只用正序网络，求特征值的矩阵阶数高，可能产生“维数灾”，难以应用于多机电力系统的情况，一般在工程上需要将多机系统化简后再用特征值法进行分析。

3.3 复转矩系数分析法

复转矩系数分析法是一种基于线性化模型的频域分析方法，在次同步频率范围内对轴系机械复转矩系数及电气复转矩系数进行频率扫描，根据机械弹性系数和电气弹性系数之和为零的频率下，净阻尼系数的正负来判定系统是否会发生次同步振荡。可以得到电气阻尼系数随频率变化的全貌，还可以考虑到各种控制系统的动态过程及运行工况对次同步振荡的影响。其优点是能够不受矩阵维数和系统规模的限制且计算速度较快；缺点是由于其将电气、机械部分分割开来进行分析，所以无法准确计及机电系统间的相互作用。

3.4 时域仿真分析法

时域仿真分析法是用数值积分的方法求解系统动态特性的微分方程组，得到系统状态变量的时域响应曲线，从而对系统动态特性进行分析的方法。可用于分析包括SSCI在内的各种机网相互作用问题，适用于电力系统在各种大扰动下的暂态分析。其优点是可以得到各参数随时间变化的曲线，可以计及各种非线性因素的作用；缺点是无法为SSCI的发生机理提供信息，而且若对每台风力发电机组及其控制系统进行详细建模将极大地增加仿真的复杂度，导致计算时间长、资源利用率低。时域仿真包括电磁暂态仿真、机电暂态仿真和中长期动态仿真，在进行次同步振荡分析时，必须采用电磁暂态模型汁算。常用的电磁暂态仿真软件有SIMPOW、EMTP和ATP等。

4 结束语

目前，针对大规模风电经串补送出引起的次同步振荡问题研究尚不全面，相关的发生机理、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响因素和特征分析还不够准确，抑制措施仍有待研究和完善。对该课题的研究工作，亟待对如下几方面的问题进行深入研究。

1）当前针对风电SSCI问题的研究大多采用单机无穷大等值系统模型，未考虑不同风力发电机组间的相互作用，今后要多开展大规模风电经串补送出系统的多机次同步振荡问题研究工作。

2）当前对于导致SSCI问题的关键参数，大多研究仅进行了定性分析，无法定量得到相关参数，在今后的工作中需要加强定量分析的部分。

3）现有的抑制措施尚未充分考虑到工程实际中机组类型、数量较多的大规模风电场的适用性，需要在今后的研究工作中不断完善。

参考文献

[1] 2012年中国风电装机容量统计 [R]. 北京：中国风能协会，2012.

[2] 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.

[3] 高本锋，张学伟，李忍. 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Varma R K，Auddy S，Semsedini Y. Mitigation of sub-synchronous resonance in a series-compensated wind farm using FACTS controllers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2008，23 (3)：1645-1654.

[7] Varma R K，Auddy S. Mitigation of subsynchronous oscillations in a series compensated wind farm with static var compensator [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting，Montrail，Canada，2006.

[8] 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]. 电力系统及自动化，2010，34 (8)：101-105.

[9] El-Moursi M S，Bak-Jensen B，Abdel-Rahman M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2010，25 (2)：429-441.

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

[11] Fan L，Zhu C，Miao Z，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.

[12] Miao Z. 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.

[13] 孔永乐. 大规模风电外送次同步振荡机理研究 [D]. 北京：华北电力大学，2013.

[14] Badrzadeh B，Saylors S. Susceptibility of wind turbines to sub-synchronous control and torsional interaction [C]. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)，2012：1-8.

[15] Sahni M，Badrzadeh B，Muthumuni D，et al. Subsynchronous interaction in wind power plants-part II：an ercot case study [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting，2012：1-9.

[16] Ma H T，Brogan P B，Jensen K H，et al. Subsynchronous control interaction studies between fullconverter wind turbines and series-compensated AC transmission lines [C]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting，2012：1-5.

[17] Irwin G D，Jinda A K，Isaacs A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

turbines and series compensated AC transmission lines [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-6.

[18] 卢云. 双馈风电场经串补线路并网引起的次同步振荡研究 [D]. 北京：华北电力大学，2014.

[19] 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，2013，39 (11)：3073-3079.

[20] Irwin G D. Sub-synchronous interactions with wind turbines [C]. Technical Conference-CREZ System Design and Operation, Taylor, Texas, USA, 2010.

[21] Ostadi A, Yazdani A, Varma R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3)：1504-1514.

[22] 王波. 含双馈机组风电场次同步振荡分析与抑制 [D]. 重庆：重庆大学，2013.

[23] Suriyaarachchi D H R, Annakkage U D, Karawita C, et al. A procedure to study sub-synchronous interactionsin wind integrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28 (1)：377-384.

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

[25] 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.

[26] 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.

（收稿日期：2016－01－06）EA

(上接第46页)

参考文献

[1] 颜伟鹏，田书欣，张永鑫，等. 小型光伏发电系统中的高增益DC-DC变换器综述 [J]. 通信电源技术，2010，27 (6)：1-5.

[2] Lai C M, Pan C T, Cheng M C. High-efficiency modular high step-up interleaved boost converter for DC-microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (1)：161-171.

[3] Chen S M, Liang T J, Yang L S, et al. A safety enhanced, high step-up DC-DC converter for AC photovoltaic module application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (4)：1809-1817.

[4] Choi S M, Agelidis V G, Yang J, et al. Analysis, design and experimental results a floating output interleaved-input boost-derived DC-DC high-gain transformer less converter [J]. IEEE IET Power Electronics, 2011, 4 (1)：168-180.

[5] 王琳，胡雪峰，戴国瑞，等. 一种适于燃料电池用高增益Boost变换器 [J]. 电源学报，2014，5 (5)：60-66.

[6] Hwu K I, Yau Y T. High step-up converter based on charge pump and boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (5)：2484-2494.

[7] Kuo-Ching Tseng, Chi-Chih Huang, Wei-Yuan Shih. A high step-up converter with a voltage multiplier module for a photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (6)：3047-3057.

[8] 候世英，陈剑飞，孙韬，等. 基于Switch-Capacitor网络的单开关升压变换器 [J]. 电工技术学报，2013，28 (10)：206-216.

（收稿日期：2016－04－13）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net